Н. И. БЫКОВ, П. Н. КАПТЕРЕВ

ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА И СТРОИТЕЛЬСТВО НА НЕЙ

Издание отменено
Оставлено для [illegible]

ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ
МОСКВА — 1940

212

Н. И. БЫКОВ, П. Н. КАПТЕРЕВ

Издание отменено
Оставлено для справок

550.3
Б95.

ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА
и
СТРОИТЕЛЬСТВО НА НЕЙ

0-4817, 2639-Сиб
Ост-16307.

Библиотека

УЧЕТ
58

ПРОВЕРЕНО 1978

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТРАНСПОРТНОЕ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
Москва — 1940

ЦБНТИ
МИНАВТОДОРА РСФСР
ОИФ 13.08.84 187

В книге дано описание опытных научно-исследовательских работ по изучению вечной мерзлоты, проведенных авторами на Сковородинской мерзлотной станции.

На основе полученного экспериментального материала авторы дают критику существующих положений по вопросам строительства в районах вечной мерзлоты и рекомендуют рациональные приемы строительства применительно к условиям, аналогичным вечной мерзлоте района Сковородинской мерзлотной станции.

Книга рассчитана на широкий круг инженеров, техников и строителей.

6—95

Цена 8р. 25 к.
Переплет 75 к.

Редактор *С. Я. Боженков*
Техн. редактор *Г. П. Ратнер*
Рецензенты проф. *М. И. Сумгин* и проф. *А. В. Ливеровский*
Корректор *М. М. Жемчугова*
Сдано в набор 17/X 1939 г.
Подписано к печати 19/I 1940 г.
Формат бумаги 60×92¹/₁₆ 23¹/₄ п. л. + 1 вклейка 49 000 зн. в п. л. 24,[illegible] уч. авт. л
ЖДИЗ 34120. Заказ 19682. Тираж 4000 экз.
Уполн. Главлита А-22198

1-я типо-литография Трансжелдориздата НКПС,
Москва, Большая Переяславская, 46.

Издание отменено
Оставлено для справок

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 5
Введение 8

Глава I

Виды вечной мерзлоты и ее распространение

§ 1. Затруднительность точного определения понятия «вечная мерзлота» 16
§ 2. Деятельный слой 19
§ 3. Виды вечной мерзлоты 25
§ 4. Структура мерзлых слоев 28
§ 5. Почвенные и погребенные льды 29
§ 6. Географическое распространение и мощность вечная мерзлота . . 36

Глава II

Термический режим грунтов

§ 7. Недостаточная изученность температур грунтов. Измерение этих температур заленивленными термометрами 42
§ 8. Опытные термометрические площадки Сковородинской мерзлотной станции 47
§ 9. Суточные и годичные температурные циклы 55
§ 10. Средние многолетние температуры 59
§ 11. Амплигуды колебаний температуры на различных глубинах . . . 65
§ 12. Минимумы и максимумы температур грунтов на разных глубинах . 67
§ 13. Сроки замерзания и оттаивания грунтов на разных глубинах . . 70
§ 14. Влияние снегового покрова на температуру грунтов 73
§ 15. Температура грунтов под дном водоемов 76
§ 16. Теплопроводность и теплоемкость грунтов 82

Глава III

Замерзание, пучение и оттаивание грунтов

§ 17. Замерзание воды 90
§ 18. Замерзание грунтов и пучение дневной поверхности 92
§ 19. Механизм пучения грунтов и миграция влаги 104
§ 20. Некоторые лабораторные опыты Сковородинской мерзлотной станции над замораживанием грунтов и др. 120
§ 21. Анализ пучения в естественных условиях 139
Анализ пучения 12 столбов на оголенной площадке 139
Установка $Б_3$ и полученные результаты 159
Борьба с пучением 175
Опыт пучения под нагрузкой. Установка $Б_2$ 177
Опытная ограда вокруг территории станции и результаты наблюдений над ней 187
Утепленный бугор и новая теория пучения Сумгина 193
§ 22. Горизонтальное перемещение грунтов 196
§ 23. О влажности деятельного слоя и вечно мерзлых грунтов 204
§ 24. Сопротивление вечно мерзлых грунтов сжимающим усилиям . . 208

Глава IV

Влияние некоторых искусственных факторов на деятельный слой и вечную мерзлоту

§ 25. Постановка задачи 220
§ 26. Влияние на термический режим изоляционных щитов, заложенных в деятельном слое 222
§ 27. Температурный режим под жилыми домами и устойчивость их фундаментов 229
§ 28. Протаивание под локомобилями и под бассейном у лесозавода в Игарке. Протаивание в Читинской электростанции 245
§ 29. Изменение температурного режима в выемках и под насыпями . . 246
§ 30. Практические выводы и дальнейшие задачи 248

Глава V

Деформация сооружений и изыскания в районах распространения вечной мерзлоты

§ 31. Вопрос об изучении деформаций сооружений в районах распространения вечной мерзлоты 254
§ 32. Деформации дорожного полотна 255
§ 33. Деформации искусственных сооружений 256
§ 34. Деформации производственных и жилых зданий 260
§ 35. Изыскания для промышленно-фабричного и поселкового строительств 266
§ 36. Некоторые детальные исследования и их методика 279
§ 37. Изыскания для шоссейных и железных дорог 293

Глава VI

Фундаменты в условиях вечной мерзлоты

§ 38. Несколько общих замечаний об устройстве фундаментов в районах распространения вечной мерзлоты 298
§ 39. Фундаменты при деятельном слое из непучинистых грунтов . . . 301
§ 40. Фундаменты в условиях пучащего деятельного слоя 302
§ 41. Смерзание с вечной мерзлотой. Выдергивающие силы пучения по Цытовичу и Сумгину. Сопротивление вечно мерзлых грунтов скалыванию 310
§ 42. Фундаменты в виде отдельных столбов. Сваи 315
§ 43. О сохранении вечной мерзлоты под фундаментами и о возможности ее оттаивания под ними 330
§ 44. Пример сооружения фундаментов на трещиноватой скале 335
§ 45. О значении времени года при устройстве фундаментов 339
§ 46. Об учете возможности поднятия мерзлоты под зданием 340
§ 47. Предложения разных авторов по строительству фундаментов . . 340

Глава VII

Дорожное полотно и искуственные сооружения

§ 48. Дорожное полотно. Устройство дорожного полотна на марях. Борьба с наледями 345
§ 49. Устройство мостовых устоев и быков в условиях вечной мерзлоты . 354

Библиография 370

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга рассчитана главным образом на инженеров и техников, усвоивших строительные дисциплины, но не знакомых с вечной мерзлотой, с ее свойствами, на тот случай, если этим инженерам и техникам придется вести изыскания или строительство в районах ее распространения или же проектировать для этих районов.

Кроме того, мы полагаем, что строитель, изыскатель или проектировщик не ищет случайной рецептуры для каких-то случайных условий или каких-нибудь универсальных рецептов, но желает сознательно подойти к решению стоящих перед ним задач, самостоятельно отыскивая или выбирая наилучшие решения на основании знания свойств вечной мерзлоты и динамики явлений, происходящих в районах ее распространения.

Поскольку наука о вечной мерзлоте и о строительстве на ней только создается и поскольку в связи с этим при изложении учения о вечной мерзлоте в описании явлений и в определении действующих при этом причин есть много противоречивого, мы сочли целесообразным держаться следующего порядка.

По каждому вопросу, который рассматривается в этой книге, приводятся наиболее распространенные в настоящее время описания явлений и их объяснения. Эти описания явлений и их объяснения сопоставляются с наблюдениями и исследованиями Сковородинской мерзлотной станции, причем отмечается соответствие или несоответствие последних с первыми, на основании чего и делаются затем надлежащие выводы.

Особое внимание уделяется практическим выводам, касающимся строительства; поэтому рецептура, предлагаемая различными авторами по вопросам строительства (в особенности, если она противоречит опытам Сковородинской мерзлотной станции), подвергается возможно тщательному анализу, причем главное внимание уделяется разбору различных предложений, находящихся в трудах, получивших более или менее широкое распространение среди строителей (труды Цытовича и Сумгина, Евдокимова-Рокотовского, отчасти Морозова и др.).

Исследования и опыты Сковородинской мерзлотной станции описаны с возможной тщательностью и притом не только те, которые дали более или менее исчерпывающий ответ на поставленные вопросы, но и менее удачные, в которые вкрались те или иные методические ошибки. Это сделано, во-первых, для того, чтобы читатель видел, на основании каких данных авторами делаются те или иные выводы и

каким способом они получены; во-вторых, чтобы он мог или вполне сознательно принять эти выводы или, найдя их неудовлетворительными, отвергнуть.

Кроме того, в настоящей книге многие выводы относятся к вполне определенным грунтам с вполне определенным температурным режимом, и распространять эти выводы на другие грунты или даже аналогичные, но находящиеся в других температурных условиях, было бы неправильно.

Поэтому инженеру, которому придется строить в условиях, отличных от тех, для которых, например, даются строительные советы в данной книге, следует некоторые исследования повторить и найти решение для тех новых условий, в которых ему надо будет возводить то или иное сооружение.

Если к этому добавить, что выработанной методики исследования свойств деятельного слоя и вечно мерзлых грунтов нет, то будет понятно, что знакомство с теми методами, которые уже применялись и даже с методическими ошибками, является для строителя и изыскателя весьма ценным и даже необходимым.

Кроме того, вопросы методики исследования деятельного слоя и вечно мерзлых грунтов и определения их свойств являются совершенно неотъемлемой частью изысканий и строительства.

Создавая настоящую книгу, авторы не думали, конечно, о всеобъемлющем труде, освещающем все свойства вечно мерзлых грунтов и все вопросы строительства на вечной мерзлоте; поэтому читатель не найдет здесь даже попыток к определению, например, модуля упругости Юнга, коэфициента Пуассона и т. п. Не найдет он также рассуждений о применимости формул и теорий Буссинеска, Шлейхера, Винклера, Сен-Венана и др., так как авторы этой книги сильно сомневаются в плодотворности таких попыток по крайней мере в настоящее время, на современном уровне наших знаний вечной мерзлоты.

Авторы этой книги несколько лет работали непосредственно в районах вечной мерзлоты, но отнюдь не обольщают себя надеждой, что они уже могут ответить на все вопросы, возникающие при строительстве на вечной мерзлоте. Для этого нужно очень много и долго работать целым учреждениям. Но так как время не ждет, а строительство в районах вечной мерзлоты ширится с каждым днем, то авторы полагают целесообразным теперь же поделиться своим опытом, хотя бы неполным и несовершенным. Наши наблюдения ограничиваются преимущественно областью вечной мерзлоты в пределах Дальневосточного края. Основной базой наших опытов и наблюдений была Сковородинская научно-исследовательская мерзлотная станция.

По первоначальному плану в эту книгу должны были войти несколько глав, трактующих о водоснабжении в условиях вечной мерзлоты; но поскольку авторам стало известно, что появится в печати солидный труд, где вопросы водоснабжения рассматриваются с большей полнотой, чем это возможно было сделать в настоящей книге, мысль о введении глав, трактующих о водоснабжении, отпала.

Ссылки на цитируемые в настоящей книге труды других авторов даны в скобках в виде условных обозначений, например: (54, стр. 99—102). Первая цифра указывает на порядковый номер, под которым цитируемая книга помещена в прилагаемом в конце книги списке трудов, учитываемых составителями этой книги. В приведенном выше примере цифра 54 означает ссылку на книгу Богданова, «Вечная мерзлота и сооружения на ней».

В заключение авторы считают своим долгом с благодарностью отметить исключительно ценную работу сотрудников Сковородинской НИМС: старшего наблюдателя В. С. Григорьева и начальника гидрометеорологической группы И. И. Тукалевского, немало способствовавших нормальному проведению исследований и опытов, поставленных на Сковородинской мерзлотной станции и тем самым весьма способствовавших созданию этой книги.

Введение, первая и вторая главы, а также начало третьей (о замерзании воды) написаны почти исключительно научным сотрудником Академии наук СССР П. Н. Каптеревым; все остальное написано инж. Н. И. Быковым.

Быков

Гаспра, июнь 1939 г.

ВВЕДЕНИЕ

Первые сведения о существовании вечной мерзлоты в северной части Азиатского материка были сообщены русскими в половине XVII века. Позже был целый ряд подтверждений о наличии на севере Азии вечной мерзлоты со стороны как русских ученых, так и иностранных путешественников, но все эти сведения были случайны и поэтому мало убедительны.

Начало научного исследования вечной мерзлоты было положено знаменитым путешествием А. Ф. Миддендорфа (впоследствии академика) по северу Азии. В 1843 — 1845 гг. он объехал огромные и почти неисследованные районы, начиная с низовьев Енисея и кончая Приамурьем — Таймыр, Якутия, южное побережье Охотского моря. А. Ф. Миддендорф произвел весьма ценные наблюдения над вечной мерзлотой и сделал значительное количество термометрических наблюдений в мерзлых грунтах. Он же впервые наметил южную границу распространения вечной мерзлоты, после чего стало видно, какую огромную площадь мерзлота занимает в Азии. А. Ф. Миддендорфа по праву считают основателем мерзлотоведения.

Дальнейшее изучение вечной мерзлоты мало продвигалось вперед. Дело в том, что мерзлотой охвачены именно те огромные пространства нашей родины, где при царском правительстве и при ничтожной плотности и малой культурности населения не производилось никаких капитальных работ. Отдельные же наблюдения, относящиеся к вечной мерзлоте, сделанные попутно во время различных экспедиций, не обобщались.

40 лет назад возникли серьезные затруднения, когда начали строить Забайкальскую ж. д., проходящую в значительной части по мерзлоте. Строители оказались совершенно не подготовленными к решению задач, которые ставило строительство на вечной мерзлоте. Большинство строителей не имело понятия о том, что такое вечная мерзлота, так как науки мерзлотоведения тогда еще не существовало; поэтому строили по существующим правилам и нормам, без учета специфических особенностей вечной мерзлоты. Понятно, что строительство терпело от этого аварии и значительные убытки.

Когда в 1912 — 1916 гг. строили Амурскую ж. д., пролегающую в большей своей части также по районам с вечной мерзлотой, ошибки строительства Забайкальской ж. д. вновь повторились, так как прежний опыт был не изучен и не обобщен. Первая серьезная техническая книга, посвященная строительству на вечной мерзлоте,

Н. С. Богданова, «Вечная мерзлота и сооружения на ней» появилась в 1912 г. При окончании постройки Амурской ж. д. появилась известная книга геолога А. В. Львова «Поиски и испытания водоисточников водоснабжения на западной части Амурской ж. д. в условиях вечной мерзлоты почвы», Иркутск, 1916 г. Эта книга и до сих пор служит ценным пособием благодаря огромному количеству собранного в ней материала. Опыт строительства Амурской ж. д. опять-таки не был обработан и не стал достоянием для будущих строек.

В 1927 г. появилась книга М. И. Сумгина «Вечная мерзлота почвы в пределах СССР», Владивосток, 1927 г. Она привлекла внимание широких научных и технических кругов к вечной мерзлоте, хотя техники эта книга почти не затрагивает. Впервые стало формироваться сознание, что вечную мерзлоту необходимо внимательно изучать. В 1937 г. эта книга вышла вторым изданием.

В 1930 г. при Академии наук СССР была образована комиссия по изучению вечной мерзлоты (КИВМ). В некоторых институтах в это время ставились лабораторные опыты над изучением мерзлых грунтов и проводился ряд экспедиций для изучения вечной мерзлоты в определенных районах СССР. Организовано было несколько мерзлотных станций на местах, из которых самыми значительными являются Сковородинская научно-исследовательская мерзлотная станция (бывш. г. Рухлово Читинской обл., ранее Дальневосточный край), затем станция в Бомнаке (на р. Зее), при Петровском заводе (Забайкалье), при ст. Ксениевская Забайкальской ж. д., в Игарке на Енисее, в Якутске, на Анадыре.

Что такое вечная мерзлота. На этот вопрос ответить, как увидим, довольно трудно.

Существуют попытки дать определение вечной мерзлоты по двум признакам: с одной стороны, по особенной твердости замерзшего грунта, поскольку его частицы сцементированы льдом, а с другой,— по признаку наличия в грунте отрицательных температур. Например, Воейков отмечает, что «местами, особенно в Забайкалье, где климат очень сух, даже и при температуре ниже 0° на нескольких саженях глубины почва может быть настолько суха, что она может быть не мерзлая, т. е. частицы не сцементированы льдом».

Прасолов мерзлоту почвы определяет следующим образом (Забайкалье): «Мерзлота обнаруживалась большей частью непосредственно углублением ям до ее верхнего уровня или же, в немногих случаях, опусканием термометра на дно ямы. Горизонт мерзлоты ясно отмечается своей плотностью и присутствием в нем мелких вкраплений льда. Углубиться в этот горизонт далее 10 — 15 *см* было очень трудно при обыкновенных средствах; в большинстве случаев в породах и почвах суглинистых и однородных он имеет характер сплошного, плотно спаянного льдом слоя. Только там, где песок прослаивает глину, мерзлота образует тонкие пропластки, или гнезда, чередующиеся с совершенно рыхлой породой. Иногда эти пропластки были так неясны и так быстро расплывались от таяния,

что присутствие мерзлоты можно было обнаружить только термометром, показывавшим обыкновенно в мерзлоте —0,5° С».

А. А. Григорьев (1930 г.) называет вечной мерзлотой «слой литосферы, температура которой круглый год держится ниже точки плавления льда», а С. Г. Пархоменко называет мерзлотой «слои, которые не оттаивают в течение круглого года».

Из приведенных цитат видно, что определение «мерзлоты», или «мерзлого грунта», даже независимо от длительности мерзлого состояния последнего весьма различно.

Много возражений вызывало также наименование мерзлоты «вечной», так как термин «вечный» указывает на неизменность во времени, что неверно по существу, так как мерзлота образовалась в определенную геологическую эпоху и, вероятно, будет иметь свой конец. Поэтому предлагались различные другие наименования, например просто «мерзлота» (В. Б. Шостакович, 1916 г.), «постоянно мерзлый грунт» (Р. И. Аболин, 1913 г.), «устойчивая мерзлота» (А. Половинкин, 1922 г.) и т. д.

Может быть, наиболее удачным является термин «многолетняя мерзлота», предложенный Толстихиным, однако в науке удержался старый термин «вечная мерзлота». В этом нет ничего опасного, если только под этим термином все понимают одно и то же.

Этот вопрос был предметом длительной дискуссии и в настоящее время еще не может считаться вполне решенным. Наибольшее распространение в научно-технической литературе имеют следующие определения (по М. И. Сумгину, 1934 г.):

«В основание самого понятия вечной мерзлоты кладется температура почвы. Поэтому вечно мерзлой почвой, или вечной мерзлотой называется слой почвы или породы, находящейся на некоторой глубине от дневной поверхности и имеющей отрицательную или нулевую температуру, длящуюся непрерывно неопределенно долгое время — от двух лет до десятков тысячелетий. Входит ли в состав вечно мерзлой почвы или породы вода (переохлажденная или в фазе льда) — безразлично: раз почва или порода имеет отрицательную температуру, длящуюся непрерывно годами, — это вечная мерзлота. Если отрицательную или нулевую температуру, длящуюся непрерывно годами, имеют твердые горные породы, изверженные или осадочные, то и такие породы относятся к вечной мерзлоте».

«Почвы или породы, имеющие положительную температуру, носят в области вечной мерзлоты название т а л ы х п о ч в, или — на народном языке — т а л и к о в».

«Слой почвы, лежащий над вечной мерзлотой и ежегодно летом оттаивающий, а зимой замерзающий, называется слоем л е т н е г о о т т а и в а н и я, или с л о е м з и м н е г о п р о м е р з а н и я. За последнее время этому слою стали придавать наименование д е я т е л ь н о г о (активного) слоя. И действительно, процессы, происходящие в этом слое, играют весьма важную роль во многих явлениях, совершающихся в почвах в области вечной мерзлоты: от характера почв деятельного слоя зависит проникновение теплоты в толщу вечно

мерзлых слоев; в нем разыгрываются интересные гидрологические явления; деятельный слой является ареной развития корневой системы всей растительности; напряжения, развивающиеся под фундаментами при замерзании деятельного слоя, в дальнейшем его охлаждении, служат часто причиной деформаций зданий, сооруженных на вечной мерзлоте, и т. д.».

«Слой вечной мерзлоты сверху и снизу ограничивается некоторыми поверхностями. Поверхность, с которой на той или иной глубине в почве начинается вечная мерзлота, называется верхней ее границей, или верхней поверхностью, а поверхность, где вечная мерзлота кончается и глубже которой начинаются положительные температуры, называется нижней ее границей, или нижней поверхностью».

«Расстояние между дневной поверхностью почвы и верхней границей вечной мерзлоты, измеренное в единицах длины, есть мощность деятельного слоя (слоя зимнего промерзания или летнего протаивания), расстояние же между верхней и нижней границами вечной мерзлоты, тоже измеренное в единицах длины, есть мощность вечной мерзлоты».

Основные затруднения строительства на вечной мерзлоте

Здесь вкратце укажем на те основные затруднения, с которыми приходится сталкиваться при освоении районов мерзлоты и при строительстве на ней.

Разбор наиболее характерных из этих явлений будет сделан в той части труда, который посвящен строительству на мерзлоте.

Пучины на жел.-дор. путях известны на очень многих железных дорогах, находящихся в местах, где нет вечной мерзлоты. Однако особенного распространения и интенсивности они достигают именно в районах вечной мерзлоты. Например, на одной почти не ремонтируемой жел.-дор. ветке отмечалось пучение полотна на высоту до 84 *см*.

С другой стороны, наблюдаются значительные просадки. Устои и быки мостов иногда выпучиваются из земли. Особенно сильно страдают мосты временных типов, например мосты на свайных и ряжевых опорах; эти мосты становятся иногда совершенно не годными для движения. Иногда в деревянных трубах вода, оттаивая мерзлоту, идет не в трубе, а прокладывает себе ход под нею.

Откосы выемок иногда оплывают, так как вскрытая выемкой мерзлая почва оттаивает и превращается в грязь. Бывали случаи, когда при разработке выемки наталкивались на мощные, в несколько метров толщиной, пласты сплошного льда. Такая выемка превращалась в грязевое корыто.

Наблюдаются и такие явления, когда выступающая из откосов скальной выемки вода зимой быстро замерзает и образует огромные ледяные натеки — наледи. На жел.-дор. сети существуют участки, где только при помощи ежедневного скалывания и удаления такого льда в течение зимы удается сохранить движение по дороге.

Бывали случаи значительных мерзлотных оползней. Например, в 1932 г. на Енисее, южнее Гальчихи, обрушился в реку участок берега длиной около 300 *м*. После оползня обнаружился мерзлый грунт. В меньших размерах оползень подобного рода произошел в 1937 г. по правому берегу р. М. Тунгуски в Олекминской тайге.

Так как вечно мерзлые наносные грунты часто переувлажнены, то в мерзлом состоянии они не отличаются от скалы. Но стоит таким грунтам оттаять, как они превращаются в грязь. Указанное явление наблюдается при пробивке шурфов, рытье котлованов, а также при прокладке шахт, подземных галлерей и т. д. Если работа производится в теплое время года, стенки всех этих сооружений оттаивают, оплывают и на их крепление часто тратится много времени и средств.

Фиг. 1. Наледь и наледный бугор

Зимой грунтовые воды, стесненные или даже остановленные в своем движении, приподнимают верхние слои земли, в результате чего получаются «бугры пучения», достигающие более 2 *м* высоты. В случае выхода наружу грунтовых вод последние, постепенно замерзая, образуют ледяные поля иногда площадью в несколько квадратных километров. Это — так называемые грунтовые наледи. Они могут подходить к полотну железной дороги и покрывать его льдом. В особенности же наледи вредят подъездным путям и всяким грунтовым дорогам. Поверхность льда наледей неровная, часто покрытая большими ледяными буграми, так что дорога, залитая наледями, становится непроезжей. Представление о грунтовой наледи и наледном бугре могут дать фиг. 1 и 2.

Очень часто встречаются речные наледи. При промерзании реки суживается или даже совсем закрывается проток воды по руслу. Тогда вновь поступающая вода или приподнимает лед буграми или выливается на поверхность, заливая лед и долину. При низких берегах и в широких долинах эти зимние разливы воды достигают иногда громадных размеров. Особенно сильно страдают от речных наледей мосты шоссейных и грунтовых дорог.

Близ одного завода построили хлебопекарную печь без учета мерзлотных условий. Она стала погружаться в оттаявшую под ней мерзлоту, содержавшую значительное количество льда. Через неко-

Фиг. 2. Наледный бугор по фиг. 1 после вскрытия (вода вытекла)

торое время печь опустилась настолько глубоко, что ею воспользовались как фундаментом и построили на ней вторую печь. Однако и вторая печь опустилась настолько, что сейчас на ней построена уже третья печь.

Крупные каменные или бетонные сооружения также испытывают серьезные деформации. Ремонт Читинских железнодорожных мастерских обошелся дороже, чем сама их постройка, сделанная еще до революции. Эти мастерские фактически перестроили по частям заново. Целый ряд жел.-дор. депо по Забайкальской и Амурской ж. д. также деформируется.

В районах вечной мерзлоты вопрос о водоснабжении является сложным для разрешения. На первый взгляд это может показаться странным, так как там много рек и много воды. Однако большинство

этих рек (кроме крупных) промерзает зимой до дна, и водоснабжение из них становится в конце зимы невозможным. Прокладка водопроводных труб в вечной мерзлоте представляет также значительные затруднения. В непромерзших участках рек, в которых нередко промерзание происходит не сплошь, часто наблюдается так называемый замор — порча воды, в результате которой она становится не годной для питья.

Грунтовые воды иногда проявляют себя бурно и даже катастрофически. Например, неоднократно приходилось наблюдать прорыв их в подпольях домов, представляющих место наименьшего сопроти-

Фиг. 3. Дом, залитый наледью

вления по причине запоздалого промерзания грунта под отопляемым помещением. В начале февраля 1934 г. такой прорыв произошел в подполье столярной мастерской у ст. Сковородино Амурской ж. д. Поступавшая из подполья вода быстро замерзала, и уже в марте того же года дом не только внутри был заполнен льдом, но и снаружи образовалась наледь, которая дошла до самой крыши. Летом дом пришлось разобрать, так как он был поврежден льдом. В январе 1936 г. аналогичный случай произошел там же с другим домом. Прорыв и замерзание грунтовых вод были настолько стремительны, что из дома не успели вытащить кровати и другую мебель, — все это очень быстро примерзло. Поток воды из-под дома хлынул к путям желез-

ной дороги и только путем отвода наледных вод через пробитые выше буровые скважины удалось прервать поток, дававший до 900 $м^3$ воды в сутки. На фиг. 3 показан дом в Сковородине, затопленный наледью в 1936 г.

Необходимость скорейшего изучения вечной мерзлоты для СССР

Зарождающаяся наука—мерзлотоведение—во многих отношениях находится еще в стадии собирания и описания материала. Это особенно сказывается при решении практических задач, с которыми постоянно приходится сталкиваться при строительстве в районах вечной мерзлоты.

То, что в настоящее время сделано и делается в области изучения вечной мерзлоты, проводится по преимуществу советскими учеными. Заграничный опыт нам сравнительно мало помогает, хотя кроме огромной территории в СССР вечная мерзлота занимает также более половины Канады и Аляски.

Изучение вечной мерзлоты в СССР должно быть так поставлено, чтобы в ближайшее время можно было дать строителям руководящие указания, на основе которых обеспечивалось бы наиболее просто устойчивое строительство, а не итти ощупью и в силу этого часто терпеть неудачи.

Постановлением президиума Академии наук СССР от 15 мая 1936 г. создан комитет по изучению вечной мерзлоты, ныне преобразуемый в научно-исследовательский институт. Институт должен стать центром для всестороннего изучения вечной мерзлоты, которого так нехватало до сих пор.

ГЛАВА I

ВИДЫ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ И ЕЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ

§ 1. Затруднительность точного определения понятия «вечная мерзлота»

В тех местах, где зима бывает с морозами, земля промерзает на ту или другую глубину. Например, в Москве грунт промерзает приблизительно на 1,6 *м*, но весной полностью оттаивает. Однако случается, в особенности в местах с более глубоким зимним промерзанием грунтов и к тому же в местах прикрытых (например, толстым моховым покровом), что в холодное лето земля оттаять полностью не успевает. Тогда получается так называемый перелеток, т. е. мерзлый слой, «переживший» лето. Перелетки отмечались во многих местах, где нет вечной мерзлоты, и, возможно, иногда сбивали с толку наблюдателей, принимавших их за вечную мерзлоту.

Находки в вечной мерзлоте неразложившихся трупов вымерших животных (мамонта и волосатого носорога) являются указанием на очень давнее существование вечной мерзлоты и непрерывность ее длительности в продолжение огромного промежутка времени: они не могли бы сохраняться в талых грунтах или в таких, которые оттаивали хотя бы на время. Трупы животных замерзли вскоре после их гибели и так пролежали, скованные вечной мерзлотой, до наших дней. Мы не знаем точно, когда вымерли эти животные, но во всяком случае это произошло не столетия, а тысячелетия назад.

Таким образом, исходя из изложенного можно различать:

1) обычное зимнее промерзание грунтов с ежегодным их оттаиванием;

2) перелетки — промерзание, сохраняющееся под ряд не более двух лет;

3) вечную мерзлоту — промерзание, сохраняющееся в течение многих лет.

По каким же признакам мы можем установить, что имеем дело с мерзлотой вообще, а тем более с вечной мерзлотой?

По наиболее распространенному сейчас определению М. И. Сумгина, вечная мерзлота, как уже сказано, характеризуется только по термическому признаку, а именно: температура вечной мерзлоты должна быть или отрицательной или нулевой, но не выше, причем присутствие воды и фаза ее в расчет не принимаются. Такое определение было бы подходящим, если бы температура грунтов точно соответствовала их физическому состоянию. К сожалению, здесь мы

встречаемся с противоречием, которое не так просто разрешить. Следует считаться с тем, что вода в грунтах часто замерзает не при 0°, а при более низкой температуре. Если грунт переувлажнен, то при 0° и достаточном подтоке холода в таком грунте образуются пересекающиеся в различных направлениях ледяные пластинки, между которыми грунт, сделавшийся более «сухим», сохраняет свою пластичность даже при довольно значительном понижении температуры. Известно, что в капиллярах вода замерзает при температурах тем более низких, чем меньше диаметр капилляра, а в мельчайших капиллярах вода в природных условиях совсем не замерзает, равно как и так называемая пленочная вода.

Процесс замерзания более осложняется в том случае, если грунтовая вода содержит значительное количество примесей, например солей. Тогда точка замерзания вообще понижается, и при 0° мы будем иметь вполне талый грунт. При дальнейшем понижении температуры из раствора начнет вымерзать чистая вода, а оставшийся раствор будет делаться все более и более концентрированным, и для его замерзания потребуется все более и более низкая температура.

Когда грунтовой термометр показывает 0°, грунт в этом месте может находиться в трех состояниях. Исследование показывает, что при этих условиях грунт может быть мерзлым чаще всего в тех случаях, когда он от более низких температур переходит к более высоким, и при 0° испытывает недостаток в калориях, необходимых для превращения льда в воду. Наоборот, при 0° грунт может неопределенно долгое время быть талым, если он идет к замерзанию и ему нехватает фригорий для обращения воды в лед. Наконец, при замерзании значительно увлажненного грунта наблюдается и третье состояние — смешанное, когда ледяные пластины пронизывают талый грунт.

В природе встречаются удивительные случаи «симбиоза» мерзлого грунта, талого грунта и льда при 0°, как, например, в глубокой Игарской скважине (о которой речь будет ниже), где эти разнородные элементы расположены слоями.

Встречаются и иные случаи. Например, под дном Северного полярного моря находятся грунты, имеющие температуру значительно ниже нуля (вероятно до —1,9°) и все же остающиеся рыхлыми, так как пропитывающая их соленая вода океана замерзает только при —1,9° (Сумгин М. И., 1936 г.). Следовательно, несмотря на такую низкую температуру, эти грунты все же немерзлые, т. е. не сцементированные льдом. Возникает затруднение в квалификации таких грунтов: вечная это мерзлота или нет?

Опубликованные сведения о наличии и глубине залегания вечной мерзлоты, собранные в работах А. В. Львова, М. И. Сумгина, Белокрылова, Евдокимова-Рокотовского и др., в огромном большинстве случаев основываются не на термометрических измерениях, а на данных бурения и шурфования. Наличие мерзлоты признается или в случае большого сопротивления мерзлого грунта проникновению в него бура или в случае присутствия в грунте ледяных кристаллов или

ОСН-16304

включений льда. Таким образом, практически далеко не всегда приходится пользоваться термометрическим признаком для установления присутствия вечной мерзлоты.

Однако одного года для окончательного вывода о том, имеем ли мы дело с вечной мерзлотой, бывает недостаточно. Например, для площадки с естественным покровом Сковородинской станции верхней границей вечной мерзлоты обыкновенно считается 2,5 *м*. И действительно, в основной скважине на глубине 2,5 *м* максимальная температура за 5 лет (1928 — 1932 гг. включительно) не поднималась выше —0,1°, но в 1933 г. она перешла через 0° и была +0,3°, в 1934 г. она была +0,2°, а в 1935 г. остановилась на 0°.

Таким образом, в определении понятия «вечная мерзлота» мы сталкиваемся с целым рядом противоречий, примирить которые в настоящее время еще не удается. Конечно, нельзя игнорировать термометрических показателей, так как кроме теоретических соображений к этому побуждают и практические потребности, например сооружение и эксплуатация водоснабжения в условиях вечной мерзлоты. Водопровод, проходящий в грунтах с температурой ниже 0°, может замерзнуть, несмотря на то, что грунты вечной мерзлоты могут быть и немерзлыми. Но термометрические показатели далеко не всегда совпадают с показателями физического состояния грунтов. Поэтому в силу практической необходимости приходится пока различать области грунтов с температурами, никогда не превышающими 0°, от областей, где мы имеем дело с вечно мерзлыми грунтами. Географически эти области могут не совпадать полностью. Более того, при вертикальном разрезе мы можем встретиться с чередованием талых и мерзлых слоев. Такое положение еще более усложняет дело, так как при всех прочих равных условиях (в том числе и температурных) на различных глубинах мы встречаем воду то в жидкой, то в твердой фазе. Отсюда ясно, что все существующие определения вечной мерзлоты имеют условный характер.

Ввиду всего сказанного нужно думать, что было бы правильно несколько уточнить наиболее распространенное определение вечной мерзлоты, основанное исключительно на температурных показаниях, и определить мерзлые грунты так:

Мерзлыми грунтами называются такие грунты с отрицательной или нулевой температурой, в которых то или иное количество воды находится в твердой фазе.

Не обольщая себя мыслью, что такое определение является безупречным, все же можно считать его более совершенным, чем основанное только на температурных показаниях. Предлагаемое определение избавит изыскателя, например, от недоуменного вопроса, к какой группе грунтов — к талым или к мерзлым — отнести грунты с нулевой температурой, часто встречающиеся в Игарке.

В самом деле, нулевая температура грунта ровно ничего не говорит о состоянии влаги в грунте, и только нахождение кристаллов льда или отсутствие таковых может помочь решению вопроса. Точно

так же о незамерзшем грунте с температурой, например, —0,2° не придется говорить, что это мерзлота еще не замерзшая или талая, аналогично тому, как о переохлажденной воде не говорится, что это жидкий, неотвердевший лед.

Необходимость констатации наличия льда в грунте для отнесения его к разряду мерзлых признается и С. Г. Пархоменко и М. И. Евдокимовым-Рокотовским, а также Н. А. Цытовичем и М. И. Сумгиным— авторами книги «Основы механики мерзлых грунтов», которые пишут: «Итак, мерзлым грунтом мы называем такой грунт, в котором имеется лед» (60, стр. 10).

Предложенное выше определение мерзлого грунта, которого мы и будем придерживаться в последующем, давая изыскателю и строителю возможность правильно определить талые и мерзлые грунты и создать ясную картину их напластований, конечно, не характеризует ни их сопротивляемости внешним силам, ни их теплопроводности, ни их электропроводности и т. д.

Для определения этих свойств как талых, так и мерзлых грунтов нужны дополнительные исследования, о которых будет сказано ниже.

§ 2. Деятельный слой

С понятием вечной мерзлоты тесно связано понятие верхнего оттаивающего, или кроющего, слоя, который прикрывает мерзлоту. Его называют также слоем летнего оттаивания, зимнего промерзания, а чаще д е я т е л ь н ы м слоем. Он определяется по глубине наибольшего оттаивания грунта, которое можно в зависимости от местности установить в конце лета или в начале осени; нижняя поверхность деятельного слоя в то же время по большей части служит и верхней границей вечной мерзлоты. В деятельном слое, хотя и временно, совершенно не бывает льда.

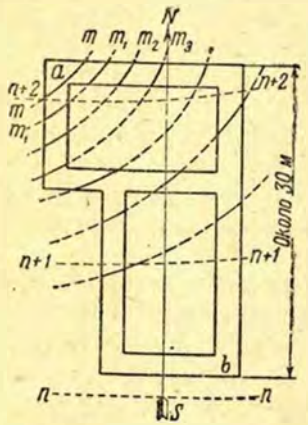
Было бы большим заблуждением считать, что существует определенная верхняя граница вечной мерзлоты даже для одной и той же точки. Можно в сущности говорить о такой верхней границе только для данного года или о средней границе для нескольких лет. Выше мы уже приводили пример наступления положительной температуры на глубине 2,5 *м* на естественной площадке Сковородинской станции после 5 лет (раньше не было измерений) непрерывного господства отрицательных температур. Вопрос осложняется еще тем, что в двух других скважинах на той же площадке и такой же глубине, находящихся всего на 1 *м* к югу и к северу от основной, температура за эти же годы не поднималась выше 0°. Таким образом, на протяжении всего 2 *м* при равных условиях рельефа и покрова мы имеем несогласованное изменение верхней границы вечной мерзлоты.

Насколько можно судить по наблюдениям в течение 8 лет на Сковородинской станции, изменения уровня верхней границы в одном и том же месте в силу одних только метеорологических условий не превышают 0,5 *м*.

Если в период наибольшего оттаивания грунтов мысленно удалить

весь активный слой, то мы и получим верхнюю границу вечной мерзлоты. Эта поверхность только до известной степени повторяет дневную.

Мощность деятельного слоя зависит от многих факторов. В самой общей форме можно сказать, что в местностях с более суровым климатом мощность деятельного слоя меньше, чем в местностях с более умеренным климатом при прочих равных условиях. Очень большое значение имеет растительный покров: в тенистых лесах и под густым кустарником мерзлота находится выше, чем на открытой местности или в редких лесах с незначительным подростом. Моховой покров часто сводит мощность деятельного слоя к ничтожным размерам. Например, на Дальнем Востоке на широте городов Орел или Воронеж обнаружизали мерзлоту в сентябре (время наибольшего оттаивания) под моховым покровом на глубине всего 30 — 40 *см*, а в северных тундрах мерзлота находится под мохом еще выше — на глубине 10 — 20 *см*.



Фиг. 4

m, m_1, m_2... горизонтали верхней поверхности вечной мерзлоты
n, n_1, $n-1$, $n+1$...—горизонтали дневной поверхности

Песчаные почвы вообще оттаивают глубже, чем суглинистые, а особенно болотные и торфяные. Сухие грунты также глубже оттаивают по сравнению с влажными. Имеет влияние также экспозиция: склоны, обращенные на юг, обладают более мощным деятельным слоем, в сравнении обращенными на север. В значительно меньшей степени заметна разница между западными и восточными склонами: на первых грунты оттаивают несколько глубже, чем на вторых.

Присутствие водоемов, ручьев и рек понижает уровень вечной мерзлоты. Понижение уровня вечной мерзлоты у ложа рек и ручьев обычно больше, что, вероятно, зависит от движения воды и ее скорости.

Кроме перечисленных выше факторов, вероятно, существуют и другие, для нас еще не известные, так как в некоторых случаях мы встречаемся с отклонениями в глубине залегания верхней границы вечной мерзлоты, которые пока трудно объяснить. Так, при постройке здания для сберегательной кассы в Игарке котлован под фундамент рыли в сентябре 1932 г., т. е. в период наиболее глубокого оттаивания грунтов. Здание имело приблизительно вид прямоугольника, расположенного длиной (около 30 *м*) с севера на юг (фиг. 4). В северо-западном углу котлована мерзлота была обнаружена на глубине 0,6 *м* в точке *a*, а от этого угла мерзлота довольно круто спускалась к югу и к востоку. Нанесенные на чертеже ориентировочно сплошными линиями горизонтали показывают примерный рельеф мерзлоты. В то же время у противоположного по диагонали угла котлована

в точке *b* мерзлоты не было обнаружено на глубине 7 *м*. Весьма важно отметить, что рельеф местности представляет совершенно однородную покатость к югу (на фигуре это схематически показано пунктирными горизонталями) и что характер грунта и растительный покров на очень большом протяжении вне контура котлована совершенно одинаковы. На том же равномерном склоне, только ниже к югу, на расстоянии около 100 *м*, где выстроены другие здания, глубина оттаивания была равномерной — около 1,2 *м*.

При рытье одной из выгребных ям в Игарке летом 1931 г. оказалось, что в одной части этой ямы мерзлота лежит на глубине около 1,2 *м*, тогда как в другой части ее совсем не было обнаружено. Конечно, это не означает, что в этой части ямы не было вечной мерзлоты; вероятнее всего, она находилась на более глубоком горизонте. Граница, отделяющая мерзлоту от талого грунта, располагалась в плане почти по прямой, причем мерзлота обрывалась на ней почти вертикально. Никаких внешних условий, которыми можно было бы так или иначе объяснить это явление, замечено не было.

Подобные случаи встречаются и в других местах, так что строителю необходимо иметь это в виду и не полагаться на первоначальное, часто поверхностное, определение горизонта вечной мерзлоты, который может быть изменчив и на сравнительно небольших поверхностях. Очень может быть, что такие явления обусловлены движением грунтовых вод, которые обнаружить иногда нелегко, или же особенностями грунта.

После периода наибольшего оттаивания грунтов, который приходится обычно на конец осени, при наступлении морозов начинается промерзание грунтов сверху. Ход этого промерзания будет рассмотрен в главе II. В процессе промерзания возможны следующие три типа взаимоотношений между деятельным слоем и вечной мерзлотой:

1) зимнее промерзание смыкается с вечной мерзлотой, образуя одну сплошную мерзлую массу;

2) зимнее промерзание смыкается только местами с вечной мерзлотой, в других же местах между зимним промерзанием и вечной мерзлотой остаются талые включения и талые ходы и жилы;

3) между зимним промерзанием и вечной мерзлотой остается всегда более или менее значительный слой никогда не замерзающего грунта.

Первый тип, насколько мы знаем, вряд ли может иметь очень большое непрерывное горизонтальное распространение. Смыкание зимнего промерзания и вечной мерзлоты прерывается реками и стоячими водоемами, которые очень часто промерзают до дна, но все же под дном их обычно имеются горизонтальные пласты талого грунта — «талики», хотя ниже снова идет вечная мерзлота. Ключи часто сохраняют свою деятельность в течение всей зимы, что доказывается присутствием незамерзающих наледей. Грунтовые воды также не прекращают движения.

Второй тип имеет наибольшее распространение в южных районах вечной мерзлоты, где слой зимнего промерзания не соединяется с вечной мерзлотой всюду в одно и то же время, а местами и вовсе не соеди-

няется. Зимнее промерзание смыкается с вечной мерзлотой сперва в отдельных местах, между которыми остаются ходы, жилы и целые талые области, иногда со всех сторон замкнутые замерзшим грунтом. В плане замерзшие и незамерзшие участки дали бы картину, похожую на беспорядочное кружево. Часть этих незамерзших ходов и жил, повидимому, тесно связана с движением грунтовых вод, причем движение их, по всей вероятности, не всегда сохраняет определенное русло.

Объем талых включений по мере хода промерзания уменьшается и часть их на некоторое время окончательно замерзает. Однако остаются некоторые объемы талого грунта, которые никогда не замерзают, так называемые постоянные талики. Примером такого постоянного талика может служить обширный талик у дома № 67 в жел.-дор. поселке при ст. Сковородино, поблизости от мерзлотной станции. Он служил предметом специального наблюдения. Талик этот тянется на десятки метров; в половине февраля 1935 г. (т. е. при почти наибольшем промерзании) он имел мощность в пределах 1,50 — 1,75 *м*, местами уменьшавшуюся до 0,35 *м*. Интересно то, что этот всегда талый прослоек грунта отнюдь не влажнее окружающих его мерзлых слоев; наоборот, его влажность несколько понижена. Поэтому трудно говорить, что происхождение этого талика связано с движением грунтовых вод.

Подобные талики, хотя и меньших размеров, встречались неоднократно зимой в мерзлой толще в таких местах, где трудно было предвидеть их присутствие; причина такого постоянного состояния их остается еще невыясненной.

Кроме п о с т о я н н ы х горизонтальных таликов, существующих, возможно, много лет, приходится считаться с такими в р е м е н н ы м и таликами, которые в результате более теплой зимы или рано выпавшего мощного снегового покрова образуются там, где в другие годы их не было, но затем снова исчезают. Это не раз наблюдалось в том же Сковородине, например в зимы 1934/35 г. и 1935/36 г., когда поверхность земли рано покрылась довольно толстым для этой местности слоем снега. В тех местах, где раньше была сплошная мерзлота, в эти годы оставались довольно обширные талые пространства и жилы. Опытный прудик мерзлотной станции, в котором раньше промерзала не только вся вода, но и дно вплоть до вечной мерзлоты, за эти две зимы не промерз полностью, и под дном его сохранился талик мощностью более 1 *м*. Все эти явления относятся ко второй группе случаев взаимоотношений между зимним промерзанием и вечной мерзлотой.

К третьей группе относятся такие случаи, когда горизонт вечной мерзлоты залегает глубоко и зимнее промерзание не может опуститься до него, так что между ними остается сплошной всегда талый слой, занимающий притом обширное пространство.

В этом отношении интересна ст. Зилово Забайкальской ж. д., где мы имеем как бы переход от обыкновенных таликов, обычно небольших по площади и мощности, к мощным и обширным незамерзаю-

щим слоям. Ст. Зилово находится на 53° 01′ северной широты и 117° 30′ восточной долготы на высоте около 700 *м* над уровнем моря. Там с декабря 1927 г. по апрель 1931 г. велись мерзлотные наблюдения, которые дали следующие данные.

Долина р. Белый Урюм, где находится ст. Зилово, повидимому, сбросового происхождения и в ней имеются дислокационные трещины. Верхний слой мощностью 0,4 — 0,5 *м* составляет торф, глубже — до 2,0 — 2,5 *м* — идет тяжелый суглинок с дресвой и валунами, а с глубины 2,5 — 3 *м* — серая сланцевая глина. Верхние горизонты на ст. Зилово изобилуют также грунтовыми водами, и суглинок легко приходит в плывунное состояние. При бурении зимой на глубине 4 — 5 *м* в районе метеорологической станции и депо всегда отмечался плывун. Поблизости от станции зимой бывают наледи.

Вечная мерзлота залегает на различной глубине. На площадке метеорологической станции, в самом поселке, где растительный покров не сохранился и были сняты верхние слои почвы, вечная мерзлота обнаружена бурением на глубине 7 — 8 *м*, а на площадке депо — на глубине 10 *м*. Если же двигаться от восточного семафора на запад, то уровень вечной мерзлоты поднимается и в 300 *м* от метеорологической станции, около бывшей церкви, ее верхний горизонт находится на глубине 2,5 *м*, а местами на глубине 2 *м*. Зимой 1927/28 г. глубина зимнего промерзания на метеорологической станции составляла 4,6 *м*; глубже отмечены талики, богатые водой. На глубине 5 *м* там же в течение всего 1928 г. не было отрицательных температур при минимуме +0,1° и максимуме +3,6°; на глубине 8,6 *м* температура колебалась от —0,1° до 0°. То же наблюдалось и в 1929 г. В 1930 г. на этой последней глубине весь год температура не отклонялась от 0°. Интересно, что наблюдения, частично возобновленные в 1934 г., показали в этой скважине начиная с февраля по май 1935 г. температуру +0,2°, тогда как в 1934 г. температура колебалась от —0,2° до 0°.

Таким образом, в западной части поселка Зилово вечная мерзлота залегает неглубоко, а в средней и восточной частях она уходит вглубь и не смыкается с зимним промерзанием, причем постоянный талик достигает местами мощности 5 *м* и занимает большую площадь. Судя по имеющимся данным, этот талик обязан своим существованием изобилию грунтовых вод.

Совершенно иная картина наблюдается поблизости от ст. Зилово — на пологом северном склоне, где с сентября 1929 г. по апрель 1931 г. функционировала мерзлотная станция. Местность там была совершенно нетронутая, покрытая густой порослью лиственницы и мелкой березы, богульником и голубикой, местами с кочками, осокой и мхом. По всей площади от дневной поверхности до глубины 0,5 *м* залегал торф, затем — до глубины 2,5 — 3,5 *м* — серая и черная илистая глина с крупными камнями и дресвой, далее — до глубины 8 *м* — серая илистая глина. По некоторым скважинам на глубине около 3 *м* отмечены прослойки чистого льда. Вечная мерзлота залегает неглубоко; наибольшая глубина оттаивания 2 *м*. Уже в скважине на глубине 2,5 *м* отмечается всегда отрицательная температура с максимумом

—0,3° и минимумом —6,1°. На глубине 8 *м* температура колебалась от —1,4° до —1,6°. Разумеется, ни о каких таликах здесь говорить не приходится. Так разнообразны условия залегания верхней границы мерзлоты и вообще мерзлотного режима в одной и той же местности.

Третий тип взаимоотношений между вечной мерзлотой и зимним промерзанием часто встречается, например, в Восточной Сибири и в Забайкалье. Там во многих местах вечная мерзлота залегает на значительной глубине и потому над ней существует мощный слой вечно талых грунтов, которые занимают такие обширные площади, что к ним уже не подходит название «простой талик».

А. В. Львов приводит такие примеры глубокого залегания верхней границы вечной мерзлоты:

Таблица 1

Верхний горизонт вечной мерзлоты в *м*	Нижний горизонт (глубина) в *м*	Мощность вечно мерзлого слоя в *м*	Место
23,47	34,14	10,67	Галининский участок Восточно-Сибирского края
16,43	—	—	Писаревский » » »
12,15	24,54	12,39	Аннинский » » »
28,2	36,7	8,50	Пушаковский » » »
16,36	—	—	Соколовский » » »
22,19	36,9	14,71	Покровский » » »
25,60	28,4	2,80	То же » » »
20,27	28,72	8,45	Читинские мастерские Забайкальской обл.
13,18	30,53	17,35	То же
28,16	29,23	1,17	Ст. Хушенга
29,44	49,23	19,57	» Петровский Завод
24,96	25,60	0,64	То же
9,39	13,22	3,83	Ст. Уруша Амурской ж. д.
18,02	21,12	5,10	То же
28,42	49,15	20,73	»

При таком глубоком залегании верхней границы вечной мерзлоты зимнее промерзание, как бы оно ни было глубоко, не может сомкнуться с вечной мерзлотой и поэтому в период наибольшего промерзания грунтов всегда остается более или менее мощный и сплошной талый слой. Весной и в начале лета в таких местах сверху находится оттаявший слой, ниже его — остатки зимнего промерзания, еще не успевшие оттаять, еще глубже — вечно талый слой, затем — слой вечной мерзлоты и, наконец, основные талые грунты.

До сих пор, говоря о вечной мерзлоте, мы принимали во внимание только два компонента: грунт и воду в различных фазах. Необходимо добавить сюда газы и пары воды. Разумеется, в мерзлоте и в деятельном слое содержатся различные газы (главным образом воздух), но обычно занимаемый ими объем незначителен. Однако иногда встре-

чаются и значительные газовые включения как в мерзлоте, так и в деятельном слое. Например, на дне ямы глубиной 1,5 *м*, вырытой на естественной площадке Сковородинской научно-исследовательской мерзлотной станции в конце сентября 1935 г., несколько дней выделялись сквозь тонкий слой воды обильные пузыри газа. За две декады до этого в траншеях, вырытых до глубины 2,1 *м* под фундамент опытного дома на территории той же станции, стал энергично выделяться в нескольких местах газ, образуя в натекшей в траншею воде пузыри. После удаления воды газ выделялся с заметным шумом. Прощупывание дна траншеи показало, что мерзлота находится на 20 *см* глубже поверхности дна траншей, поэтому возможно, что газ выделялся из мерзлоты. Напор газа был невелик, и затаптывание ногами отверстий прерывало выход газа на несколько часов, после чего он начинал выходить в другом месте. Выделение газа продолжалось 7 дней с переменной интенсивностью. Анализа газа не было произведено, но он гасил спичку и мутил раствор барита, что указывает на наличие CO_2. Оба эти случая происходили в период наибольшего оттаивания грунтов.

Иногда выделение газов происходит очень интенсивно и даже бурно. Например, при бурении в русле ручейка у мостика жел.-дор. ветки близ ст. Сковородино Амурской ж. д. 1 февраля 1936 г. с глубины 1,5 *м* началось такое бурное выделение газов, что сбрасывало шапку, положенную на скважину. При бурении наледного бугра близ дороги на Верхний поселок от той же станции в апреле 1931 г., по имеющимся сведениям, вырвался газ с такой силой, что выбросил буровой инструмент из скважины.

Описанные случаи произошли во время наибольшего промерзания, когда, повидимому, газы были зажаты со всех сторон мерзлыми грунтами. Вопрос об этих газовых включениях еще совершенно не исследован. Наконец, в мерзлых грунтах может находиться вода и в парообразном состоянии, но нам почти не приходилось этого наблюдать, так как мы имели дело с переувлажненными пылеватыми грунтами, где свободных пор или нет или очень мало.

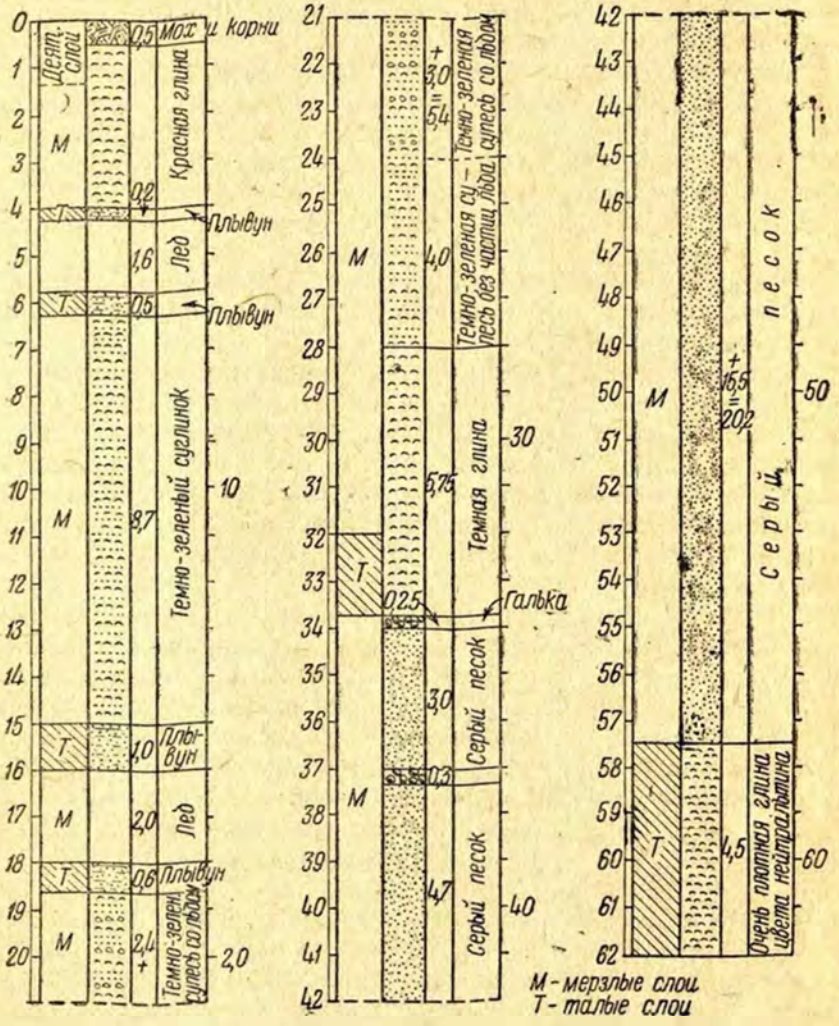
§ 3. Виды вечной мерзлоты

Выше мы рассматривали виды взаимоотношений между вечной мерзлотой и деятельным слоем. Но при разрезе вечно мерзлой толщины в вертикальном направлении (например при бурении или шурфовании) мы можем встретиться с различными видами вечной мерзлоты. Первое и основное различие приходится устанавливать в связи с физической фазой воды.

На огромном протяжении территории СССР мы встречаем с п л о ш н у ю мерзлоту. Это значит, что, углубляясь в вечно мерзлые грунты, мы имеем дело с постоянно твердыми мерзлыми грунтами, которые образуют монолитную толщу мощностью обычно в несколько десятков метров. Температура этой мерзлой толщи всегда ниже нуля. Сплошную мерзлоту такого типа можно наблюдать на Дальнем Во-

стоке (например, в Сковородино), в Якутии (Шергинская шахта в Якутске) и т. д.

Встречается мерзлота и совсем иного типа, а именно с л о и с т а я. В ней мы имеем чередование слоев мерзлого и талого грунтов. Температура толщи такой мерзлоты обычно около 0°. Наглядный



Фиг. 5. Буровая скважина Игарки

пример такой слоистой мерзлоты представляет глубокая Игарская скважина, пробитая в 1931 — 1932 гг. и описанная Н. И. Быковым (фиг. 5). После почвенного слоя с включением корневых частей мощностью в 0,5 *м* идет красноватая глина до глубины 4 *м*. Летнее оттаивание доходит только до глубины 1,4 *м* от дневной поверхности;

дальше идет мерзлота. Однако на глубине 4 *м* она прерывается 20-*см* слоем талого плывуна, ниже которого до глубины 5,8 *м* залегает слой сплошного льда мощностью 1,6 *м*. Под этим льдом находится опять слой талого плывуна в 0,5 *м*. Далее до глубины 15 *м* находится мощный пласт мерзлого темнозеленого суглинка.

Однако на глубине 15 *м* снова встречается слой талого плывуна мощностью 1 *м*, а под ним опять пласт чистого льда мощностью 2 *м*. Как и в первом случае, лед подстилается талым плывуном в 0,6 *м*. Далее до глубины 24 *м* идет мерзлая темнозеленая супесь с мелкими включениями льда, а затем до глубины 28 *м* такая же мерзлая супесь, но без ледяных включений. Глубже идет мерзлая темная глина, но на глубине 32 — 33,75 *м* она имеет талое состояние. Еще глубже идет мерзлый серый песок до глубины 57,5 *м*, где он сменяется талой плотной глиной. Далее до глубины 62 *м* мерзлоты уже не оказалось.

На ст. Уруша Амурской ж. д. (54°22′ северной широты, 122°54′ восточной долготы) скважина, пробитая 3 июля 1913 г., имела следующее строение:

Талик	от	0,00	до	9,39 *м*
Мерзлота	»	9,39	»	13,12 »
Талик	»	13,12	»	16,07
Мерзлота	»	16,07	»	16,45 »
Талик	»	16,45	»	20,48 »
Мерзлота	»	20,48	»	21,12 »
Талик	»	21,12	»	28,42 »
Мерзлота	»	28,42	»	31,17 »
Талик	»	31,17	»	33,08 »
Мерзлота	»	33,08	»	50,24 »

Таких примеров слоистой мерзлоты из различных мест можно было бы привести немало. Причины образования слоистой мерзлоты еще не выяснены. Возможно, например, что талые прослойки отличаются более значительным содержанием солей, нежели прослойки мерзлоты, но и этот вопрос еще не подвергался исследованию.

Кроме сплошной и слоистой вечной мерзлоты встречаются и другие ее виды. Так, среди вечной мерзлоты встречаются талики не в виде горизонтальных слоев или линз, а в виде вертикальных «труб» или даже больших «островов» талого грунта, проходящих сквозь всю толщу мерзлоты и прикрываемых сверху зимою только слоем зимнего промерзания (деятельный слой). Обыкновенно эти «острова таликов» связаны с выходами глубинных вод, причем талые «трубы», по которым поднимается вода, иногда очень узки (порядка 10 *м*) и заключены со всех сторон в вечно мерзлую толщу. Если выход воды достаточен и непрерывен, а тем более, если вода источника имеет достаточную температуру, то на месте выхода источника грунт остается талым круглый год и тогда зимой около источника образуется наледь.

В других случаях, подобных уже описанным нами, талик залегает под слоем зимнего промерзания, но не проникает сквозь всю толщу мерзлоты. М. И. Сумгин предложил называть их п с е в д о о с т р о в а м и т а л и к о в.

Может быть и обратное явление: грунт кругом талый, но в нем под слоем зимнего промерзания залегает о с т р о в в е ч н о й м е р з л о т ы.

Наконец, встречаются включения вечно мерзлых грунтов, окруженные со всех сторон талым грунтом. Это — г н е з д о в а я, или л и н з о в а я, мерзлота. Встречаются также включения талого грунта, окруженные со всех сторон вечной мерзлотой; по аналогии их следовало бы назвать г н е з д о в ы м и, или л и н з о в ы м и, таликами.

Необходимо отметить, что природа и термический режим таликов мало изучены, так как наличие таликов определялось почти исключительно путем бурения или шурфования.

§ 4. Структура мерзлых слоев

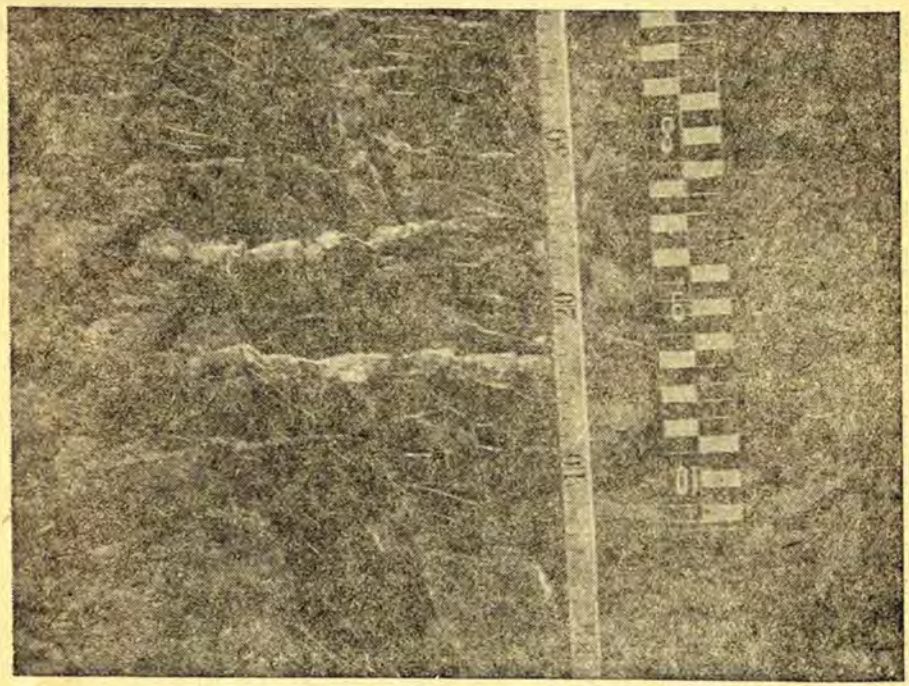
Структура самих вечно мерзлых слоев бывает также различна в зависимости от механического состава грунта, от формы зерен, от текстуры грунта, обусловленной характером укладки зерен и степенью их ориентированности, от содержания воды и ее химического состава, от содержания коллоидов, от теплового режима всей толщи промерзшего грунта, от длительности существования мерзлоты и всей прошлой ее истории (например, в связи с последовательными замерзаниями и оттаиваниями). Взаимная связь всех этих факторов еще далеко не ясна; возможно участие и других факторов, нам еще недостаточно известных.

Простейшим видом мерзлого грунта будет тот, в котором значительная часть воды находится в твердой фазе, а сам грунт представляет однородную бесструктурную массу. В таком грунте кристаллы льда настолько малы, что обычно не видимы простым глазом. Такой сцементированный льдом грунт чрезвычайно прочен и притом настолько эластичен, что разработка его представляет значительные трудности, в особенности если это пылеватый грунт. Даже значительные количества взрывчатых веществ дают лишь узкие воронки, но не отрывают крупных глыб. При оттаивании такой грунт теряет свою прочность и часто превращается в полужидкую массу. Такой тип структуры мерзлых слоев можно назвать м а с с и в н ы м.

Другой тип структуры мерзлой толщи состоит из того или иного грунта, прорезанного ясно видными прослойками льда. Эти прослойки обычно не толсты; мощность их измеряется от долей миллиметра и до нескольких сантиметров. Расположение ледяных прослоек может быть весьма различным. Очень часто они расположены параллельными слоями, но между ними имеются более тонкие жилки льда, идущие беспорядочно. Эти параллельные ледяные прослойки могут быть расположены горизонтально или наклонно, реже в изогнутом положении или вертикально. На фиг. 6 дан фотоснимок стенки шурфа, на котором хорошо видны эти прослойки. Число их может быть значительно — до 10, а иногда и более прослоек мощностью от 0,5 до 2 *см* на 1 *м* глубины. Такой тип мерзлоты очень распространен

и свидетельствует о сильной увлажненности и даже переувлажненности исходных грунтов.

Встречается и такая мерзлота, в которой ледяные включения не ориентированы и образуют беспорядочное сплетение ледяных пластин и даже отдельных кристаллов льда. Грунты подобного типа легче поддаются разработке, нежели массивная мерзлота, потому что откалывание значительных масс грунта легче происходит по плоскостям ледяных прослоек. Это тип мерзлоты с явными ледяными прослойками.



Фиг. 6. Вечная мерзлота на глубине 3 *м* (стенка шурфа)

Третьим типом мерзлоты следует считать ноздреватую, находящуюся в сильно пористых грунтах грубого строения; здесь кристаллы льда обычно находятся на стенках полостей, а между частицами грунта содержание льда незначительно. Такой тип мерзлоты наблюдается обычно в грунтах, влажность которых не очень велика. Это тип мерзлоты, переходящей к сухой мерзлоте, при которой частицы грунта благодаря недостаточной влажности почти не сцементированы льдом.

§ 5. Почвенные и погребенные льды

Помимо тех обычных ледяных прослоек незначительной мощности, о которых мы говорили, в вечной мерзлоте встречаются ледяные включения значительно больших размеров. Это почвенные и погре-

бенные льды, которые различны как по условиям своего происхождения, так и залегания, а именно:

1) трещинные и клиновидные льды;
2) массы снега, засыпанные осыпями и оползнями;
3) погребенные фирновые льды;
4) погребенные замерзшие озера или болота;
5) погребенные наледи;
6) льды в пещерах.

Льды, образующие незначительные прослойки в мерзлых грунтах, вероятно, обязаны своим происхождением выделению льда при замерзании переувлажненных грунтов. Они образуются за счет избытка влаги, имеющейся в грунтах. Так как наиболее характерные грунты с ледяными прослойками относятся к числу суглинков, особенно пылевато-илистых, а их фильтрационная способность ничтожна, то возможность накопления воды путем простой фильтрации сверху мало вероятна. Повидимому, главную роль здесь играют те перемещения влаги, которые связаны с замерзанием грунтов, о чем будет сказано ниже. Необходимо отметить, что часто содержание воды (в твердой фазе) в вечно мерзлых суглинках достигает 45—47% по весу (отношение к сухой навеске). Следовательно, при оттаивании такой грунт является уже суспензией, так как полное заполнение его пор водой достигается уже при 25 — 27% весового содержания воды. В мерзлом состоянии такой грунт является отличным основанием, но стоит ему оттаять, как он теряет свои несущие свойства и превращается в жидель, в которой тонут фундаменты и которая заливает котлованы.

Трещинные, или клиновидные, льды широко распространены на севере Азии и в Аляске. Бунге впервые при исследовании льдов острова Б. Ляховского высказал предположение, что вода, попадающая в морозобойные трещины, замерзает там и образует эти своеобразные льды. Американские исследователи, в особенности Leffingwell, приписывают образование этих льдов не воде, а снегу, попадающему в трещины. Повидимому, клинообразные льды могут быть двоякого происхождения: водного и снегового. М. М. Ермолаев видел на Новосибирских островах две генерации льда в таких образованиях: крупнозернистый (с зернами до 7 *мм*) первичный лед и пересекающие его мелкие (до 2 *мм*) жилки вторичного льда призматической структуры. Так как почва при повторном замерзании дает трещины обычно по старым трещинам, то находящиеся в этих трещинах клинообразные льды нарастают из года в год и достигают толщины в несколько десятков сантиметров; в дельте реки Лены эти трещины доходят до 0,5 *м*. Ледяной клин при этом нарастании оказывает боковое давление на окружающую его почву, отчасти пласты ее изгибаются наподобие складчатых гор.

Трещины, заполненные льдом, идут обычно более или менее вертикально, реже наклонно. Ледяные жилы могут оказаться прикрытыми сверху слоем грунта и почвы и обнаруживаются в стенках или в дне котлованов, траншей, выемок и в других совершенно нео-

жиданных местах. Поэтому фундамент может оказаться стоящим частично на мерзлом грунте, а частично на чистом льде.

В качестве примера приведем описание трещинного льда из южной области распространения вечной мерзлоты — котлован под погреб, вырытый на участке Сковородинской НИМС в июле 1934 г. (58°58′ северной широты, 123°57′ восточной долготы). До глубины 2,1 *м* сначала был пройден талый грунт, потом шел мерзлый с многочисленными тонкими ледяными прослойками в нижней части котлована. Затем была встречена почти вертикально падающая ледяная жила мощностью в разных местах от 10 до 20 *см*. Начало жилы было обнаружено на глубине 2,1 *м*, а конец ее—на глубине 3,85 *м*, так что полная высота жилы равнялась 1,75 *м*. В горизонтальном направлении ее протяжение не было выяснено, но она занимала в длину, судя по обнаруженной ее части, не менее 4 *м*.

Грунт, в котором залегала жила, представлял легкий пылеватый суглинок следующего состава (с глубины 3,50 — 3,85 *м*):

Глинистых частиц	10,2%
Пыли	50 %
Песка	30 %
Прочих скелетных частиц	9,8 %

Влажность грунта оказалась переменной, а именно для проб между ледяными прослойками, где ледяных включений невооруженным глазом не было видно, она равнялась 40,8; 27.7; 32,4% по отношению к сухой навеске, тогда как для трех образцов с тонкими ледяными прослойками она была равна 42,6; 47,7; 46,3%. Температура грунта на глубине 3,85 *м* от дневной поверхности равнялась —0,2°, тогда как на оголенной площадке НИМС на глубине 3,2 *м* в тот же день она равнялась —2,2°. Это объясняется тем, что котлован был открыт и тепло проникало сверху.

Лед вертикальной жилы содержал газовые пузырьки, частью округлые, частью вытянутые неправильной формы, а также многочисленные тонкие прослойки пылеватых частиц грунта, расположенные почти вертикально, т. е. параллельно широким боковым стенкам ледяной жилы. При разломе лед обнаруживал зернистое строение. Здесь мы имели дело с п о г р е б е н н ы м трещинным льдом, так как его верхний горизонт находился на глубине 2,1 *м*. Лед этот, вероятно, с н е г о в о г о происхождения, судя по его зернистости и пылеватым вертикальным прослойкам.

Чаще всего встречаются погребенные льды снегового происхождения, занимающие местами большие площади и достигающие огромной мощности. Они встречаются не только на крайнем севере Азии, но и в центральных частях Якутии и даже в Дальневосточном крае на широте, например, 54°. Часто они бывают расположены у подножия сопок, на переходе их в долину. Крупнозернистое строение льда с обильными воздушными пузырьками неправильной формы, неправильная и обычно негоризонтальная слоистость, наличие тонких грязевых прослоек дают основание предполагать их снеговое происхо-

ждение. Правда, если мы имеем перед собой современный лед, то легко можем отличить лед водный от снегового, а также лед наледи от льда озерного или речного. Но так как в случае погребенных льдов мы имеем дело с продолжительным временем их существования, с возможными сменами частичного таяния и замерзания, с давлением и т. д., то возможно, что они подвергаются метаморфизму, перекристаллизации, которая нарушает их первоначальную структуру. Возможно, что лед даже водного происхождения в результате всех этих процессов может получить структуру, близкую к фирну; поэтому рискованно говорить о происхождении погребенного льда на основании только его погребенной структуры. К сожалению, вопрос о метаморфизме различных видов льда до сих пор еще совершенно не изучен.

Погребенные льды, занимающие не очень большую площадь, часто называют «линзами». Это название совершенно неудачно. Форма этих ледяных включений обычно совсем не похожа на линзу, не говоря уже о том, что очертания этих включений в плане и в разрезе обычно имеют причудливую форму и по мощности обычно резко варьируют на небольшом протяжении. В горизонтальном направлении эти ледяные включения могут занимать небольшую площадь, по крайней мере близ южной границы вечной мерзлоты. Например, на территории Сковородинской мерзлотной станции в 1935 г. буре-нием был обнаружен под цветущим лугом на глубине от 3,75 и до 4,50 *м* погребенный лед мощностью до 2,5 *м*. Если бы на этом месте предстояло строительство и наличие этого погребенного льда в свое время не было обнаружено, то, несмотря на небольшую площадь, занимаемую ледяными включениями, все строительство могло бы потерпеть серьезнейшую аварию. Поэтому тщательное предварительное исследование места при помощи бурения или шурфования перед началом строительства в районах вечной мерзлоты совершенно необходимо.

В качестве примера погребенных льдов, занимающих более обширные пространства и ориентированных в горизонтальном направлении, можно привести ледяное включение у берега р. М. Ольдой, находящееся в 30 *км* к северо-западу от ст. Сковородино. Лед залегает у основания крутого косогора в темносерых глинистых плывунах, подстилаемых супесями и песками, а местами галечником и хрящеватым щебнем. В этих грунтах, равно как и во льде, встречаются растительные остатки — оторфенелая дерновина и древесина.

Лед залегает в виде неправильного пласта, имеющего в плане форму бисквита, расширяющегося у одного конца. Длина залегания около 140 *м*; ширина варьирует от 30 до 50 *м*. Наибольшая мощность линзы достигает 9,94 *м*, но в некоторых местах значительно меньше и доходит до нескольких дециметров. По краям лед содержит прослойки грунта и затем переходит в мерзлые грунты с прослойками льда. Наружный покров — пылевато-песчанистый грунт с включением щебня (около 1 *м*), прикрытый сверху слоем торфа.

Лед сероватый, без зеленоватого или голубоватого оттенка, несколько замутненный. Содержащиеся в нем пузырьки весьма непра-

вильной, по большей части удлиненной формы; ориентировка их неправильная. Величина пузырьков довольно однообразна, причем большая ось равна 3—4 *мм*, а малая — 1—2 *мм*. По произведенным измерениям удельный вес льда в одном участке оказался равным 0,895, а в другом 0,826; содержание пузырьков в тех же образцах льда соответственно 2,3% и 9,93% (по объему). При изломе лед обнаруживает зернистое строение, причем зерна имеют в поперечнике несколько миллиметров; они неправильной формы и плотно прилегают друг к другу, за исключением тех мест, где между ними перемещаются газовые пузырьки. В массе льда находятся местами тонкие неправильные прослойки пылеватых частиц в виде линз неправильной формы. По всем признакам этот лед снегового происхождения. Следует при этом указать, что старое представление о том, что погребенные льды сколько-нибудь значительной мощности встречаются только местами в Якутии, а главным образом на крайнем севере Азии, у побережья Ледовитого океана, совершенно несостоятельно.

Грандиозные ископаемые льды мощностью в 12 *м* и более встречаются даже в Приамурье, причем они залегают не «линзами», а иногда огромными пластами, тянущимися по долинам с некоторыми перерывами на 10—12 *км* в длину (например, долина в верховьях реки Тынды), причем лед залегает в первую очередь у подножья сопок, но также спускается и в долины рек, доходя до самых их берегов. Однако в Приамурье самые берега рек, галечник и речные наносы, выходящие непосредственно к реке, обычно не содержат льда.

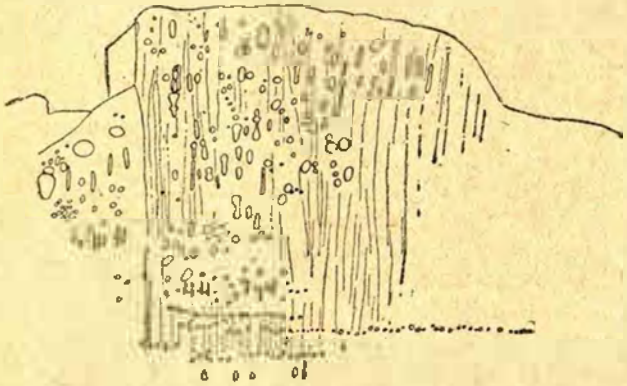
Наличие погребенных льдов большой мощности, которые встречаются иногда на широте южнее Москвы, строителям необходимо иметь в виду. Достаточно было иногда провести канаву глубиной 0,5 *м* над этими льдами, как они начинали таять и тогда образовывались огромные непроходимые грязевые корыта. При строительстве следует всячески избегать таких мест. Особенно опасны в таких местах выемки и даже просто снятие мохового и торфяного покрова. Этим нарушается тепловое равновесие в грунтах и погребенных льдах, для чего достаточно, чтобы температура поднялась на несколько десятых долей градуса. Даже ничтожное потепление может вызвать бурное таяние льдов; появление же воды действует на лед всего разрушительнее, в особенности если эта вода находится в движении.

Севернее (в Якутии) погребенные льды достигают еще большего распространения и большей мощности, но они еще недостаточно изучены. Там они обнаруживаются в качестве горной породы, обнажающейся, например, по берегам рек. Обнажение пласта льда мощностью до 2 *м* на берегу р. Витима (между Шипишкой и Каренгой) дано в книгах А. В. Львова и у М. И. Сумгина (1, стр. 60). Подобные же обнажения льда имеются и на Аляске. Тут мы имеем дело уже с мощными пластами погребенного льда, выходящими к самому берегу реки и размываемыми ею. Еще дальше к северу мы встречаем грандиозные ископаемые или «каменные» льды, образующие целые ледяные скалы на берегу Ледовитого океана, главным образом у Северной Азии, восточнее устья р. Оленек, и гораздо реже в Аляске. Более

того, некоторые острова арктических архипелагов — Ново-Сибирского и Ляховского — стоят как бы на ледяном постаменте, достигающем местами мощности в десятки метров.

По вопросу о происхождении этих мощных льдов еще ведутся дискуссии, но всего вероятнее, что они не являются продуктом современного климата. В настоящее время они разрушаются, уменьшаются и, повидимому, деградируют. Всего вероятнее, что эти огромные толщи льдов сохранились от ледникового периода, а так как окончание последнего оледенения (по крайней мере для Европы) было геологически вовсе не так давно, а для Северной Азии и совсем еще неизвестно время окончания последнего оледенения, то можно думать, что мы присутствуем в настоящее время при постепенной ликвидации последствий этого последнего оледенения.

Таким образом, насколько можно судить по современному состоянию научных данных, огромное большинство погребенных льдов по своему происхождению должно быть отнесено к льдам снеговым фирнового характера. Однако есть указания и на льды другого типа: иногда встречаются погребенные ледяные образования с более или менее горизонтальной верхней поверхностью, но зато нижняя поверхность этих ледяных образований по большей части неровная. Такие образования в значительном количестве встречаются в Аляске и кое-где у нас в Якутии. Предполагается, что это погребенные замерзшие озера. Это предположение подтверждается тем обстоятельством, что в толще таких погребенных льдов часто содержатся хорошо сохранившиеся остатки водной растительности.



Фиг. 7.

Как пример опишем погребенный лед водного происхождения, хотя и небольшой мощности. Он залегал в долине ручья Поемного (близ ст. Сковородино Амурской ж. д.) под слоем торфа и мха на глубине всего 30 — 40 *см* (взяты пробы 3 июня 1934 г.), причем мощность ледяного слоя была около 60 *см*. Лед содержит обильные пузырьки, разнообразные как по величине, так и по форме (фиг. 7). Приблизительно половина всех пузырьков обладает сферической, но не вполне правильной формой. Поперечник этих пузырьков колеблется от 0,05 до 0,3 *см*, но в отдельных случаях достигает 0,7 *см*.

Другая группа пузырьков представляет более или менее длинные, широкие, цилиндрические вертикальные трубки с закругленными

концами. Трубки этого рода располагаются сериями, лежащими каждая приблизительно в одной вертикали.

Третья группа пузырьков, тоже вытянутая по вертикали, имеет бисквитообразный вид. В некоторых случаях пузырьки этой группы представляют цилиндры, концы которых присоединяются к круглым или грушевидным пузырькам, причем иногда подобное завершение имеется только на одном конце.

Четвертая группа пузырьков обладает веретенообразной и шаровой формой. Наконец, встречаются пузырьки, относящиеся к пятой группе, тоже веретенообразной формы, но с вздутиями на некотором расстоянии от нижнего конца, утончающегося и завершающегося закруглением.

Все описанные пузырьки различных видов, вообще говоря, перемешаны между собой в беспорядке. Лед бесцветен и в промежутках между пузырьками обладает хорошей прозрачностью. При раскалывании он обнаруживает склонность к образованию базальтовидных поверхностей излома, однако даже при нагревании не распадается на карандашные или игольчатые отдельности. Почвенных частиц или других включений кроме газовых пузырьков во льде не содержится. Удельный вес описываемого льда 0,881, а содержание пузырьков 3,97% (по объему).

Учитывая все эти признаки и сравнивая этот лед с многочисленными образцами льдов различного происхождения, изученных на Сковородинской НИМС, следует признать, что он водного происхождения и возник из стоячей воды.

Фиг. 8. Строение льда грунтовой наледи у «ледяного ключа» в Дальневосточном крае

Иногда наледи могут быть погребены под оползнем, обвалом, силевым потоком или какими-нибудь другими наносами. Лед всякой наледи, грунтовой или речной, характеризуется прежде всего мелкослоистой структурой, зависящей от многократного повторного выступления воды на поверхность наледи.

На фиг. 8 показано строение льда грунтовой наледи. В природе встречаются льды и совсем другого происхождения, а именно конденсационного. Они образуются не из воды, а непосредственно из водяных паров. Эти льды характеризуются своеобразными полускелетными формами их кристаллов, имеющих вид либо шестигранных усеченных пирамид, либо плоских шестиугольных табличек. Лед подобного типа образуется в пещерах, в погребах, в различных пустотах

в мерзлом грунте, но не только в районе вечной мерзлоты, а и в других местах, например в «ледяных» пещерах Приуралья и даже Западной Европы. Для строительства этот вид льда не имеет существенного значения.

Таким образом, почвенные и погребенные льды могут быть различного происхождения: водного, снегового и конденсационного. Важно выяснить, не образуются ли подобные льды и в настоящее время. Относительно конденсационных льдов это можно утверждать с несомненностью, так как приходилось видеть их образование, например, в пустотах льда промерзшего до дна опытного прудика в Сковородине, в водосборных галлереях вскоре после их постройки и т. д. Но возможно и современное образование погребенных льдов, например при покрытии выброшенных на берег реки ледяных масс наносами (Евдокимов-Рокотовский), а также при «перелетовывании» снегового наноса у откоса (Писарев, Датский). Мощность снега или льда в обоих случаях не превышала 1,5 *м*.

Однако описанные случаи совершенно не могут дать нам объяснения происхождения мощных толщ льда, занимающих большие пространства. Можно сказать даже больше: при современных климатических условиях, в особенности при современном небольшом количестве зимних осадков, в большинстве районов вечной мерзлоты такое накопление льда представляется весьма сомнительным. Поэтому с почвенными и погребенными льдами приходится считаться как с определенными горными породами и при всяком строительстве прежде всего выяснять, нет ли их в наличии на небольшой глубине. Пренебрежение подобным предварительным исследованием ведет в строительстве к авариям.

Нам пришлось видеть в Дальневосточном крае в 1934 г. обыкновенную дорогу, которая превратилась в грязное корыто на протяжении сотен метров, потому что она была проведена по погребенным льдам, прикрытым слоем торфа мощностью всего в 1 *м*. Проведение канавы для стока дождевых вод глубиной в 0,5 *м* уже явилось катастрофическим фактором для дороги. К концу лета канава углубилась на 2 *м*, погребенные льды оттаяли, вся дорога (гать) превратилась в хаос бревен, тонущих в болоте.

Погребенные льды, повидимому, заходят даже под дно океана. Об этом имеются указания относительно островов Ляховского, Фадеевского и Новой Сибири. К сожалению, этих данных очень мало и они недостаточно проверены.

§ 6. Географическое распространение и мощность вечной мерзлоты

Уже в половине XIX столетия стало общепризнанным, что крайний север Азии занят вечной мерзлотой. Встал вопрос о том, как далеко идет вечная мерзлота на юг, т. е. вопрос об определении ю ж н о й г р а н и ц ы вечной мерзлоты. Первым сделал попытку наметить эту границу А. Ф. Миддендорф сперва в 1848 г., потом в 1860 г. Он считал, что в Скандинавии и Лапландии нет вечной мерз-

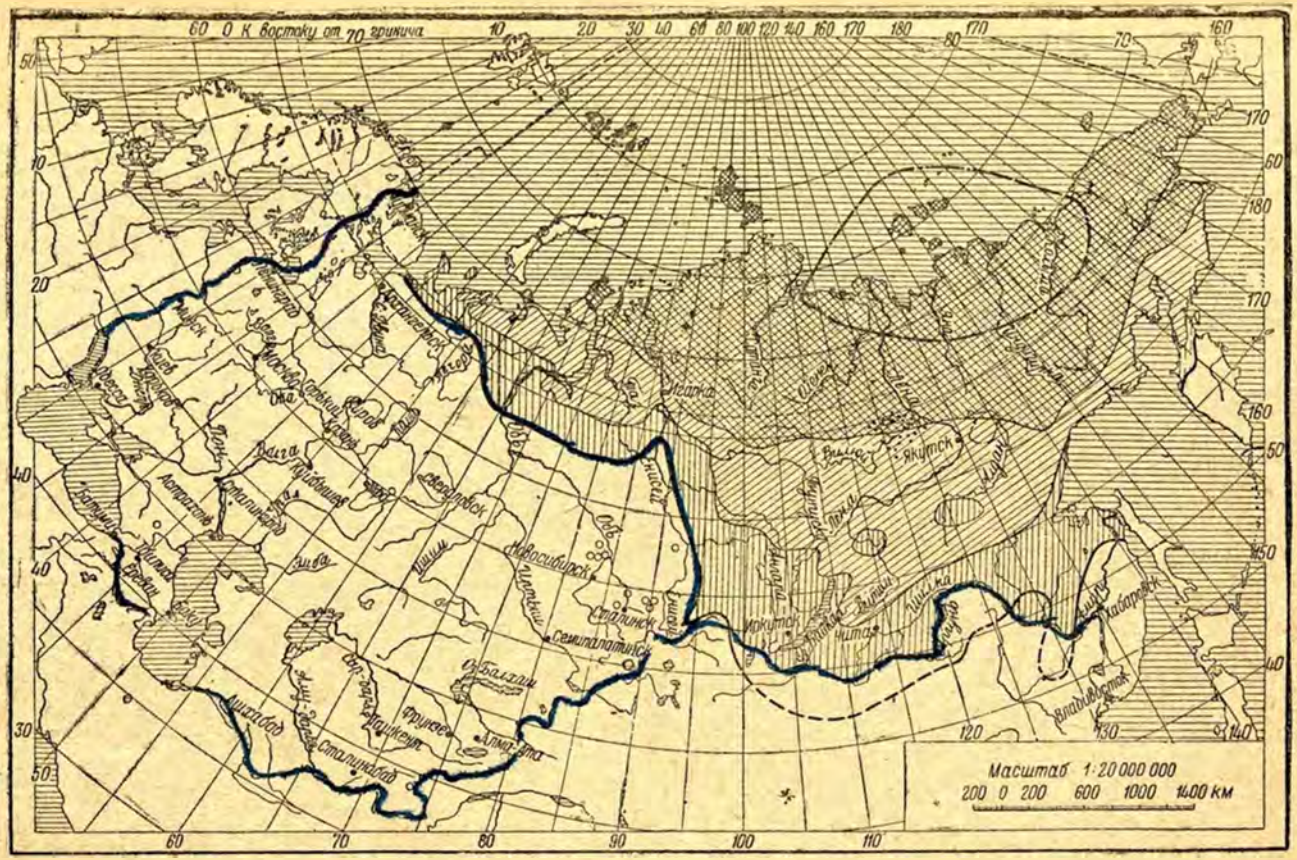
лоты, что она начинается только на восточном берегу Белого моря у Мезени и усиливается к низовьям Печоры. Двигаясь по той же широте к востоку, он отмечает, что мерзлота за Уралом опускается несколько к югу и захватывает не только Обдорск, но и Березов, хотя здесь она, повидимому, уже кончается и слой ее не превышает 1,5 *м*. Далее по широте не было наблюдений до самого Енисея близ Туруханска, где, повидимому, как раз проходит южная граница вечной мерзлоты. Дальше, к востоку, вечная мерзлота идет до океана, но она имеется в Забайкалье на широте 52 и даже 50°. Миддендорф считал, что за исключением юго-восточной Камчатки, затем пространства между Тунгусками и Енисеем и страны, примыкающей к Амуру, вся северо-восточная часть материка Азии охвачена вечной мерзлотой.

Дальнейшее уточнение южной границы мерзлоты было сделано академиком К. Э. Бэром. Значительно позже — в 1887 г. — академик Вильд сделал попытку провести южную границу вечной мерзлоты на основании средних годовых изотерм. Эта попытка оказалась неудачной, так как основывалась на одном слишком элементарном факторе — средней годовой температуре, на что и было указано проф. Воейковым, выдвинувшим теплоизолирующую роль снегового покрова. Еще позже — в 1889 г. — южную границу мерзлоты провел Ячевский уже значительно ближе к действительности.

Ряд последующих работ позволил Шостаковичу в 1916 г. еще уточнить эту границу, а в 1927, 1931, 1934 и 1937 гг. М. И. Сумгин дал карты распространения вечной мерзлоты, которые являются наиболее общепринятыми. Площадь, очерченная этой границей, несколько превышает 9,5 млн. *км*², составляя около 45% всей территории Союза, т. е. почти в 20 раз больше площади Германии. Но, конечно, на этом огромном пространстве вечная мерзлота не везде одинакова.

М. И. Сумгин различает несколько зон вечной мерзлоты по термическому признаку (см. карту № 1). К сожалению, наши сведения о термическом режиме грунтов в районах вечной мерзлоты, особенно на севере, чрезвычайно ограничены; поэтому разделение на подобные зоны может быть принято только как самое первое приближение к действительности.

Мощность слоя вечно мерзлых грунтов в обширном северном районе должна быть в общем велика, но в этом отношении мы располагаем ничтожным материалом. Достоверно известно, что в Якутске так называемая Шергинская шахта на глубине 116,4 *м* от дневной поверхности (в том числе деятельный слой мощностью не более 2 *м*) не прошла сквозь толщу вечно мерзлых грунтов, нижняя граница которых должна находиться, по экстраполяции Миддендорфа, на глубине 185 *м*. В Игарке и на Енисее нижняя граница вечной мерзлоты залегает на глубине 57,5 *м* (Н. И. Быков), но в Амдерме (Пай-Хой на берегу Карского моря) бурение показало на глубине 214 *м* температуру —4,8°. Это заставляет предполагать, что нижняя граница вечной мерзлоты в этом районе находится на огромной глубине, равной, может быть, 400 *м* (В. Пономарев). Есть известия, еще не проверенные, что у мыса Нордвик на глубине 180 *м* температура оказалась



1 2 3 4 5 6 7 8

Карта 1. Распространение вечной мерзлоты (составлена М. И. Сумгиным)

1—район с температурой грунта на глубине 10—15 м преимущественно ниже—5°С; 2—район с температурой грунта на глубине 10—15 м преимущественно в пределах от —5° до —1,5°С; 3—район с температурой грунта на глубине 10—15 м преимущественно выше —1,5° С; 4—отдельные острова вечной мерзлоты вдали от общего ее массива; 5—вечная мерзлота только в буграх торфяных болот; 6—южная граница вечной мерзлоты в пределах СССР; 7—предполагаемая южная граница вечной мерзлоты вне СССР; 8—граница, замыкающая районы значительных толщ льда в вечно мерзлой почве

равной —3°, что также указывает на большую мощность вечной мерзлоты. На Шпицбергене слой вечно мерзлых грунтов достигает, повидимому, мощности в 250 *м*. С другой стороны, на западе (в Пустозерске) нижняя граница вечной мерзлоты была найдена на глубине всего 19,2 *м* при мощности деятельного слоя в 1,37 *м*.

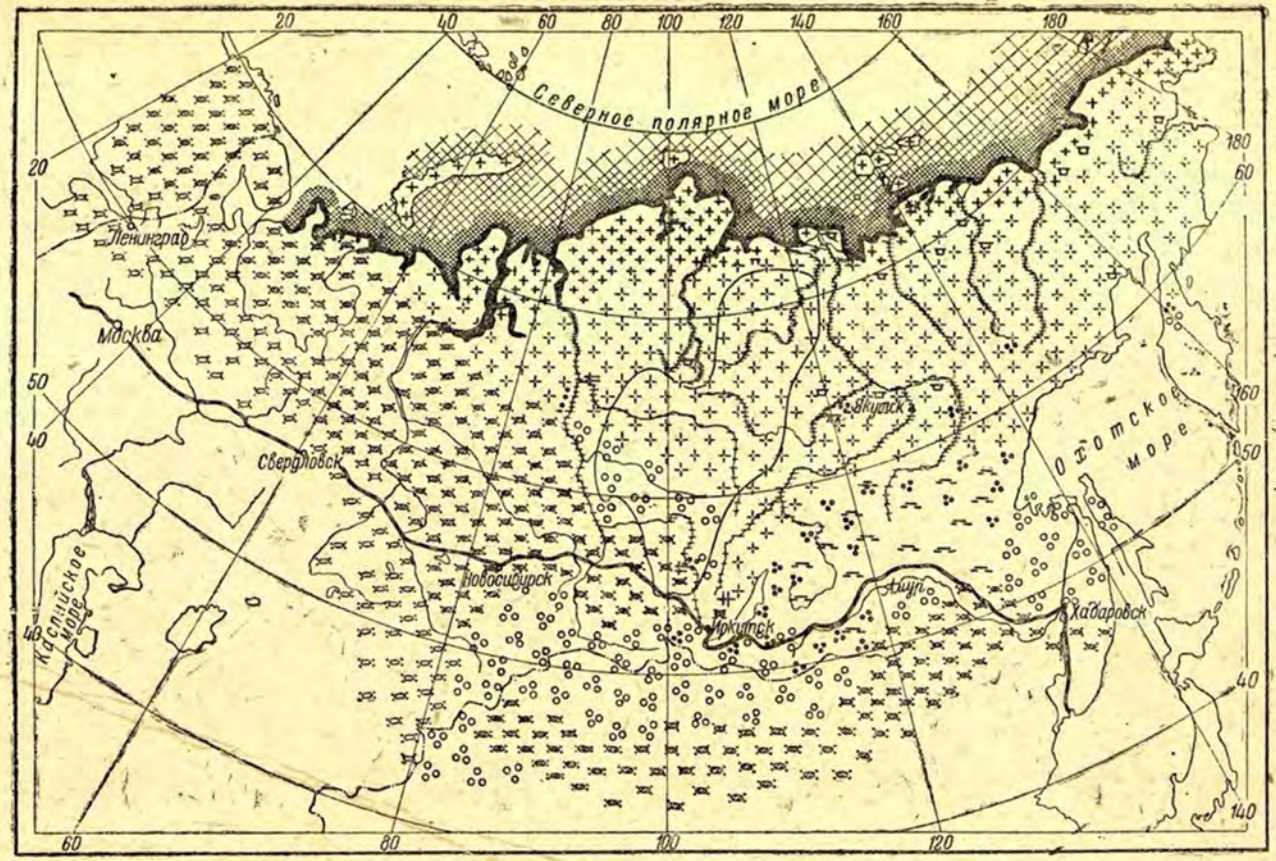
Мощность оттаивающего деятельного слоя на побережье Ледовитого океана, по сведениям М. И. Сумгина, в грунтах песчаных разностей составляет 1,2 — 1,6 *м*, в глинистых грунтах 1,0 — 1,2 *м*, в торфах 0,2 — 0,4 *м*. В Якутском районе в грунтах песчаных разностей мощность деятельного слоя составляет 2,0 — 2,5 *м*, в торфах 0,6 — 0,8 *м*. Эта глубина в значительной мере зависит от внешнего почвенного покрова, в особенности мохового и торфяного, и приводимые цифры являются, конечно, весьма приближенными.

Отмечены два района — по рр. Алдану и Витиму, — где имеются обширные талики среди вечной мерзлоты. Возможно, что сказывается влияние довольно мощного снегового покрова в этих районах. Однако районов с островами таликов существует, возможно, и значительно больше, но мы о них еще не знаем. Указанные выше два района нам известны только потому, что там делались разведки на золото.

Вечная мерзлота вдоль южной границы ее распространения, вероятно, располагается не сплошным массивом, а прерывисто, образуя отдельные острова мерзлоты, вкрапленные в талые грунты, и, наоборот, острова таликов, вкрапленные в область вечной мерзлоты. Наши сведения в этом отношении очень незначительны, и над выяснением южной границы вечной мерзлоты придется еще очень много поработать. Мощность слоя вечной мерзлоты в южной ее части чрезвычайно разнообразна. Повидимому, она меньше в западных районах и возрастает к востоку, доходя у Бушулея (Забайкалье) до 66 — 67 *м*, а в Рухлове (Дальневосточный край) до 50 — 60 *м*. Еще дальше к востоку ее мощность, повидимому, снова уменьшается. К сожалению, вопрос о мощности вечной мерзлоты и о нижней границе ее залегания настолько мало и плохо выяснен, что о нем трудно говорить с достоверностью.

На основе других принципов основана карта С. Г. Пархоменко. Он не разделяет сезонной мерзлоты от перелетков и от вечной мерзлоты и пользуется только термином «мерзлота» без эпитета «вечная», диференцируя ее на целый ряд видов (см. карту № 2). Эта интересная попытка, к сожалению, основывается на ничтожном количестве существующего фактического материала.

Вечная мерзлота встречается в СССР, повидимому, далеко и от основного ее массива. Так, например, есть указания на нахождение «пятен» ее близ Железноводска на Северном Кавказе, у озера Севан (Гокча) в Закавказье, кое-где на Урале, в горах Алатау, на Памире. Вероятно, придется выделить особый вид «горной мерзлоты», еще очень мало изученный. Интересны наблюдения Н. Л. Корженевского над мерзлотой и почвенными льдами у озера Кара-Куль на Памире. Там наблюдались не только мерзлота мощностью около 3,5 *м*, но и



Карта 2. Распространение вечной мерзлоты (составлена С. Г. Пархоменко)

1—область возможных перелетков; *2*—область островной мерзлоты и устройчивых перелетков; *3*—островная мерзлота горных областей (кружевная мерзлота); *4*—сплошная мерзлота низменностей и плоскогорья (субарктическая провинция); *5*—граница распространения траппов; *6*—сплошная мерзлота горных долин; *7*—спорадическая подрусловая мерзлота; *8*—сплошная подрусловая мерзлота; *9*—таликовые районы сплошной мерзлоты; *10*—ископаемые льды; *11*—область максимального развития мерзлоты (арктическая провинция); поддонная мерзлота арктических морей; *12*—районы деградации мерзлоты; *13*—районы усиления мерзлотного процесса; *14*—места находки трупов животных четвертичного периода

пласты погребенных льдов мощностью в 1,5 *м* и более, а также наледи с наледными буграми.

Кроме СССР вечная мерзлота встречается и в других странах. Она имеется в Северной Монголии и Манчжурии, ею занято более половины Канады и Аляски в Северной Америке, острова Северного полярного моря и, вероятно, вся Антарктида. По очень приблизительному подсчету М. И. Сумгина вечная мерзлота занимает 0,1 всей суши. Повторяем, что кроме СССР вечная мерзлота в других странах мало изучается, и мы имеем о ней вне пределов СССР только случайные и отрывочные сведения.

ГЛАВА II

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ

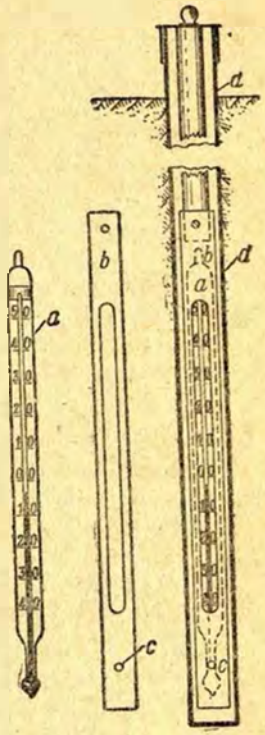
§ 7. Недостаточная изученность температур грунтов. Измерение этих температур заленивленными термометрами

Вопрос о температурном режиме грунтов в районе вечной мерзлоты является одним из самых важных. Однако наши сведения в этой области совершенно ничтожны. Необходимо иметь ряд станций, где должны производиться стационарные измерения почвенных температур достоверными приборами. Это еще надлежащим образом не организовано. Совершенно отсутствуют актинометрические измерения. Огромные районы, величиной в несколько европейских государств, совершенно не изучены в отношении термического режима их грунтов. Это изучение должно производиться на одном и том же месте в течение нескольких лет, потому что помимо прослеживания целого годичного цикла необходимо сравнивать температурные циклы различных годов, так как они могут отличаться один от другого. Сопоставление почвенных температур различных точек позволило бы выяснить ряд теоретических и практических вопросов. Попытку составить изотермическую карту грунтов района вечной мерзлоты сделал М. И. Сумгин, но материала в его распоряжении было еще слишком мало. Температурные измерения, производимые во время экспедиций, обычно кратковременны и потому имеют лишь относительную ценность.

Очевидно, наблюдения над термическим режимом грунта должны производиться или на особых мерзлотных станциях или на метеорологических станциях. Так сейчас и делается, но мерзлотных станций у нас чрезвычайно мало и постановка термометрических измерений на них часто весьма несовершенна, а на метеорологических станциях это дело поставлено по большей части еще хуже. Эти наблюдения на метеорологических станциях считаются чем-то второстепенным по сравнению с основными метеорологическими наблюдениями, и потому к ним часто относятся небрежно: сроки наблюдения пропускаются, иногда по месяцам вовсе не делается наблюдений, термометры не выверяются, термометрические трубки затопляются водой. Запасных почвенных термометров часто не оказывается, и в случае их порчи некоторые скважины выбывают из строя. Бывает и так, что метеорологическая станция переносится на другой участок — где-нибудь поблизости, где термический режим грунтов может быть совсем иным; этим самым нарушается преемственность наблюдений. Мате-

риал, получаемый от мерзлотных станций, также далеко не всегда надежен.

Прежде всего самый инструмент, которым производят измерения, — вытяжной заленивленный почвенный термометр — приходится признать грубым и несовершенным. Он дает точность до 0,1°, что было бы достаточно при температурах, более или менее далеких от 0° в ту или другую сторону, но эта точность оказывается недостаточной для весьма важного участка около самого 0°. Фактически, например, температура +0,05° очень часто обозначается просто как 0°. Заленивливание термометра заключается в том, что обыкновенный хорошо проверенный термометр *a* (фиг. 9), например психрометрический, заключается в тщательно пригнанную цилиндрическую, обыкновенно металлическую, оправу *b* с прорезом вдоль шкалы. Пространство возле шарика с ртутью заполняется через отверстие *c* каким-нибудь теплоизолирующим материалом (например, сажей, опилками), после чего отверстие *c* заделывается парафином или смолой.



Фиг. 9

Такое устройство имеет следствием то, что при быстром изменении температуры воздуха, окружающего термометр (например, при вытаскивании термометра из трубки *d*, погруженной в землю и предназначенной для измерения в ней температуры грунта), термометр *a* не сразу изменяет свои показания и некоторое время сохраняет прежние, почему и называется ленивым, или заленивленным.

Однако установленной меры заленивливания пока нет. Если термометр недостаточно заленивлен, то при вынимании его с более значительных глубин и отсчитывании при сильном морозе или при жаре он в руках наблюдателя настолько быстро меняет свои показания, что не дает возможности сделать надлежащего отсчета. При спуске и подъеме термометров из более глубоких скважин они часто ударяются о стенки и дно скважины, что опять-таки может отозваться на их показаниях, так как часто разрывается ртуть. Большие размеры термометра, заключенного притом в цилиндрическую металлическую оправу (40—45 *см* длины), ставят под сомнение измерение при помощи него температур на небольших глубинах, например на общепринятой глубине 0,4 *м*, которая как раз равняется длине вертикально поставленного термометра. Передача температурных колебаний воздуха через металлическую оправу здесь несомненна, что установлено прямыми опытами Н. И. Быкова.

Опыт заключался в следующем. В регулярно отапливаемой комнате Сковородинской станции зимой измерялась температура воздуха

на различной высоте заленивленными почвенными термометрами в металлической оправе. Термометры были укреплены на внутренней стене здания. На высоте 1 *м* над полом было установлено под прямым углом два термометра (один в горизонтальном, другой в вертикальном положении), так что их части, заключающие ртутные шарики, почти соприкасались и находились в одной горизонтальной плоскости. Такая установка была сделана для того, чтобы выяснить, насколько влияет теплопроводность металлической оправы термометров на их показания. Разница температур у пола и у потолка комнаты достигала 13—15°. Таким образом, горизонтальный термометр находился целиком (со всей своей оправой) в плоскости равных температур, вертикальный термометр верхней частью своей оправы находился в области более высокой температуры, а ртутные шарики обоих термометров были в более или менее одинаковых температурных условиях.

Как и следовало ожидать, горизонтальный термометр показывал всегда более низкую температуру, чем вертикальный. Например, 8 марта 1934 г. при температуре у пола 6,6°, а у потолка 19,5° на высоте 1 *м* горизонтальный термометр показывал 15,2°, а вертикальный 17,1°. После топки печи эта разница уменьшалась, но все же никогда не исчезала.

Хотя термометры выпускаются на рынок выверенными и с паспортами, но обычно им приходится совершать долгий путь до места установки, к тому же в неблагоприятных условиях (особенно в экспедициях), и они часто поступают в эксплуатацию уже неисправными. Что же касается степени заленивливания, то она никогда не фиксируется; весьма часто термометры заленивливаются на месте и, конечно, в разных местах по-разному. Выверить термометры в экспедиционных условиях чрезвычайно трудно. Кроме того, почвенные термометры, уже работающие в установках, через некоторое время (это время очень трудно учесть, так как оно различно для каждого термометра) начинают давать искаженные показания и требуют внесения новых поправок. Без соблюдения постоянного контроля над термометрами, а особенно над их нулевой точкой, могут быть большие недоразумения; например, могут быть отмечены отрицательные температуры там, где их нет, и, наоборот, положительные температуры там, где в действительности имеется мерзлота.

Например, измерения температуры под дном опытного прудика в Сковородине на глубинах 1,6 и 2,25 *м* в январе — марте 1935 г. давали температуры +0,1° и 0°, сообразно с чем был отмечен талик под прудиком. Однако контрольное бурение показало, что на этих глубинах грунт мерзлый. Проверка термометра 4 марта 1935 г. обнаружила, что при 0° он показывает почти +0,2°. Неизвестно, с какого времени появилась эта разница, образовалась ли она сразу или накапливалась постепенно. Такие случаи очень часты и, к сожалению, нередко проходят незамеченными. Бывает, что наблюдения производятся полуисправными термометрами, например такими, у которых были разрывы ртутного столбика. Приведение их в порядок зачастую

производится кустарными способами и все же они обычно без проверки снова пускаются в дело.

Термометрические скважины обделываются обсадными трубками; эти трубки не всегда эбонитовые, чаще просто железные. Как показывают наблюдения, теплопроводность железа оказывает влияние на глубинах 0,4 — 0,8 *м*, а с глубины 1,6 *м* это влияние почти незаметно. Трубки часто портятся и начинают пропускать воду, что в корне нарушает показания термометров. Вода в термометрических скважинах — главное бедствие грунтовых термометрических установок. Ее появление (не всегда во-время учитываемое) обусловливает иногда резкие скачки температуры, а также перерывы в наблюдениях и даже выбытие скважин из строя. Иногда в журналах наблюдений указывается, что в скважине появилась вода, но все же измерения температуры и результаты их входят в официальные сводки.

Во многих районах, занятых вечной мерзлотой, где происходит пучение грунтов, пучению подвергаются также и термометрические трубки, особенно погруженные только в деятельный слой. Если не учесть этого, то измерения температуры в одной и той же скважине в разные годы фактически будет производиться на различной глубине. Например, нивелировка термометрических трубок на Сковородинской станции перед их осадкой дала следующие результаты:

Характеристика площадки	Первоначальная глубина в *м*	0,4	0,8	1,6	1,6	2,0	2,25	2,5	3,2	4,0	5,0
Площадка с естественным покровом (трава, снег)	Фактич. глубина в 1932 г.	—	0,79	1,50	1,52	1,82	2,09	2,37	3,12	4	4,98
Оголенная площадка (трава и снег удаляются)	Фактич. глубина в 1933 г.	0,37	0,73	1,47	—	—	—	2,41	3,19	—	5

Термометрическую трубку, погруженную в 1932 г. на 2,25 *м* в дно опытного водомера, уже в 1933 г. выпучило на 23 *см*. Как видим, пучение достигает значительных размеров (кроме глубин 4 — 5 *м*), и если не производить периодической осадки труб, то результаты измерений могут получиться ненадежные, что в действительности часто и бывает. Осадка же труб, в особенности эбонитовых, даже не всегда возможна.

Помимо указанных недостатков методики измерения грунтовых температур мы встречаемся с неприятностями другого рода. Наблюдатели, производящие температурные наблюдения, по большей части мало квалифицированы и плохо отдают себе отчет в важности и ответственности производимой ими работы; поэтому отсчеты берутся и записываются зачастую небрежно. Перерывы в наблюдениях лишают возможности выведения средних величин, а частая смена наблюдателей ведет к разнобою. Для верного и поневоле быстрого (так как иначе термометр может изменить свое показание) отсчета требуется определенный навык, приобретаемый со временем.

Кроме ошибок наблюдения очень вредят и ошибки подсчета. В журналах, куда вносятся записи и производятся первые подсчеты, обычно обнаруживается множество ошибок. Первая группа их, правда немногочисленная, происходит от неправильного списывания цифр из книжек наблюдателей. Зато очень многочисленны ошибки в арифметических подсчетах при вычислении средних декадных и месячных температур, а также при неправильном округлении цифр. Особенно вредные последствия имеют ошибки в знаках, а именно: часто забывают поставить минус [1], и отрицательная температура принимается за положительную, так как суммирование часто производится механически. Принятое в метеорологии опускание знака плюс при положительных температурах хотя и дает значительную экономию, однако значительно увеличивает шансы подобных ошибок при подсчетах.

Из всего сказанного следует, что к имеющимся данным о грунтовых температурах, в особенности к получаемым от метеорологических станций, приходится относиться с большой осторожностью. Некоторый корректив, хотя и не очень надежный, вносится при многолетних наблюдениях тем, что последствия мелких ошибок значительно сглаживаются. Но все же, если термометры регулярно не выверяются, материал в значительной мере теряет свою цену. Желательно было бы организовать измерения грунтовых температур при помощи электротермометров с надлежаще квалифицированными наблюдателями.

Все сказанное выше о недостатках заленивленных термометров и о возможных ошибках при измерении температур этими термометрами, а также при недостаточной опытности наблюдателей должно быть учтено при организации мерзлотных изысканий на трассе и особенно на отдельных строительных площадках, где температурные исследования играют весьма существенную роль, влияя и на выбор площадки и на выбор принципов проектирования на ней различных сооружений.

Ясно, что для правильной постановки дела термометрических наблюдений при изысканиях должны быть созданы кадры наблюдателей, организована регулярная проверка термометров и преподана инструкция по наблюдению температур и по уходу за термометрами.

В дальнейшем изложении мы опираемся на богатые материалы Сковородинской научно-исследовательской мерзлотной станции (г. Рухлово). В 1935 г. эти материалы были подвергнуты обстоятельной проверке, состоявшей в сличении записей с первичными документами, выверке средних арифметических и т. д., и потому представляются более достоверными, чем большинство материалов из других мест, имеющихся в нашем распоряжении.

---

[1] Это встречается и в печатных работах. Например, в статье И. Д. Белокрылова «О термическом режиме вечно мерзлых почв» (Сборник «Вечная мерзлота и жел.-дор. строительство», № 8, 1931 г.) в таблице сковородинских температур на глубине 0,8 *м* за 1929 *г.* отсутствует знак минус при среднемесячных температурах за ноябрь и декабрь, а также перед средней годовой температурой.

Проведенная проверка материалов, многочисленность наблюдений, чуть не ежедневный с 1933 г. контроль записей наблюдателей, регулярная проверка термометров дают возможность использовать сковородинские данные для целого ряда бесспорных выводов. Те же выводы, в которых вследствие несовершенства измерения температур при помощи заленивленных термометров все же возможно появление ошибок, будут каждый раз тщательно проанализированы.

§ 8. Опытные термометрические площади Сковородинской мерзлотной станции

Сковородинская станция (фиг. 10) была основана в 1912 г. при постройке Амурской ж. д. в качестве только метеорологической; наблюдения же над температурой грунтов были начаты с 25 октября 1927 г. и с тех пор ведутся непрерывно до настоящего времени. Термометрические установки расположены на высоте 401 *м* над уровнем моря в долине р. Б. Невр на расстоянии около 2 *км* от ее левого берега, на почти ровном открытом месте с очень слабым наклоном к северу (к реке). Площадка станции не сохранилась в первоначальном виде. Вначале здесь была марь со значительным количеством кочек и типичной маревой растительностью. Но при устройстве мерзлотной станции значительная часть площадки, где находится метеорологическая станция и стоят почвенные термометры, была спланирована и затем покрыта дерном, взятым на расстоянии 100 *м* от площадки. Местность вокруг станции стала застраиваться, поблизости была проложена магистраль водопровода, появились новые грунтовые дороги; в результате всего этого исчезла марь, местность стала значительно суше и растительность приобрела характер луговой.

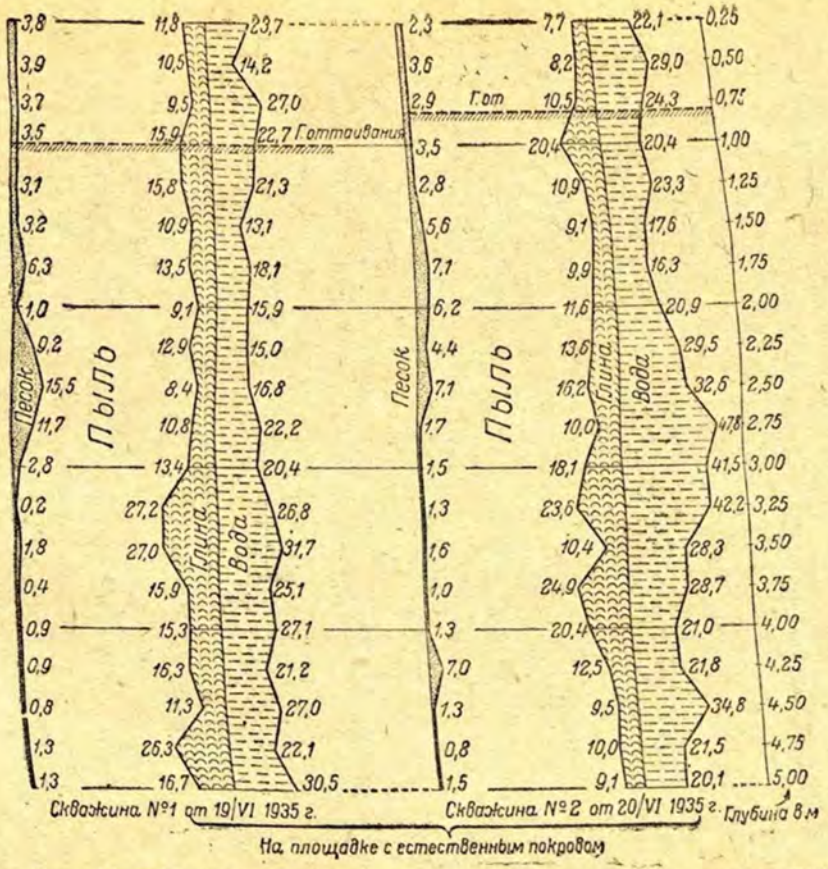
Фиг. 10

Основные термометрические наблюдения производились и производятся на двух площадках — так называемых естественной и оголенной—в местах *Т* и *О* по плану. На первой сохраняется естественный травяной покров и снег остается в неприкосновенности; с оголенной же площадки удаляются как трава, так и снег. На естественной площадке имеются расположенные рядом термометрические скважины глубиной 0,4; 0,8; 1,6; 2; 2,25; 3,2; 4 и 5 *м*. На расстоянии 10 *м* от этой группы находятся скважины глубиной 10 и 14 *м*, а на расстоянии 30 *м* имеется скважина глубиной 28 *м*. Рядом с этими скважинами имеются и дополнительные (например, две скважины глубиной по 2,5 *м*), а на расстоянии 2,6 *м* от крайней скважины основной группы находится скважина глубиной 1,6 *м* в небольшом углублении. Здесь почва более сырая, весной и после сильных дождей бывает вода, имеется более высокая осоковая растительность, а зимой наблюдается мощный снеговой покров. Скважины (за исключением скважин глубиной 4, 5, 10, 14 *м*) обделаны эбонитовыми трубками. Скважины глубиной 28 *м* имеют железную обсадную трубу только до глубины в 6 *м*, а глубже она проходит в мерзлых грунтах без обсадных труб. Диаметр обсадной трубы 12 *см*.

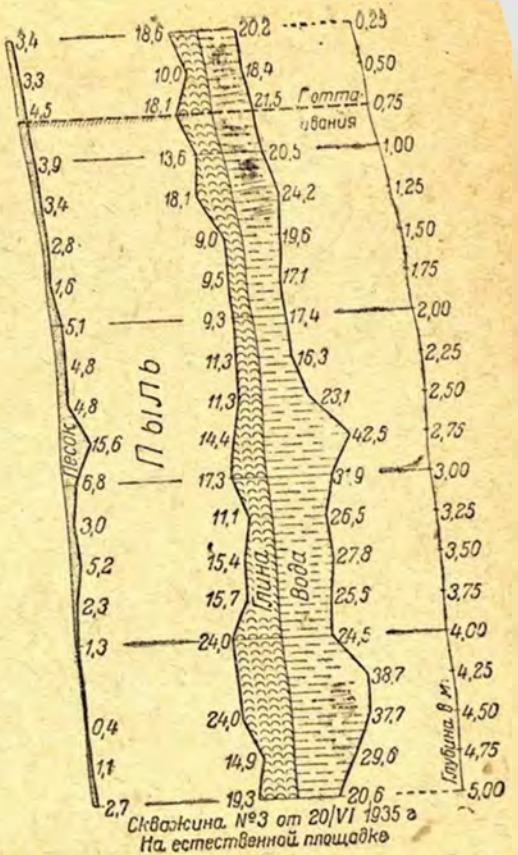
Оголенная площадка была устроена летом 1930 г. На ней были установлены столбы для выяснения явлений пучения. Внутри столбов были сделаны каналы, в которые опускались термометры до самого грунта под основанием столбов. Рядом с этими столбами были устроены контрольные термометрические скважины. Измерения температуры под столбами производились с сентября 1930 г. по июнь 1932 г. включительно, а в контрольных скважинах — с сентября 1930 г. по апрель 1931 г. включительно. С 1 января 1932 г. были установлены отдельно от столбов термометры на оголенной площадке на глубину 0,4; 0,8; 1,6 и 2,5 *м*, а с 1 июля 1932 г. — также на глубину 3,2 и 5,0 *м*. Первые три скважины обделаны эбонитовыми, а три последние — железными трубками. В этих шести скважинах производятся измерения по настоящее время.

Механический состав и влажность грунтов на этих двух площадках показаны на графиках фиг. 11 — 17 по пробам из трех скважин, заложенных 19 — 20 июня 1935 г. на естественной площадке, и по пробам из четырех скважин, пробитых на оголенной площадке 12 — 14 ноября 1934 г. Эти графики построены на основе анализов грунта, произведенных по методу Рутковского. Песок, пыль и глина даны в весовых процентах по отношению к сухой навеске, принятой за 100%. Проценты песка и глины написаны на чертежах. Проценты пыли можно высчитать как дополнение до 100. К пыли отнесены фракции с размерами частиц меньше 0,25 и больше 0,005 *мм*.

Процент влажности на этих графиках дан по отношению к весу не сухого грунта (как обыкновенно это делают), а влажного. Это сделано потому, что часто встречающиеся в вечной мерзлоте ледяные включения дают цифры влажности, равные бесконечности, если их вычислять по отношению к весу сухого грунта. На глубине 2,5 — 4 *м* на естественной площадке наблюдались значительные прослойки



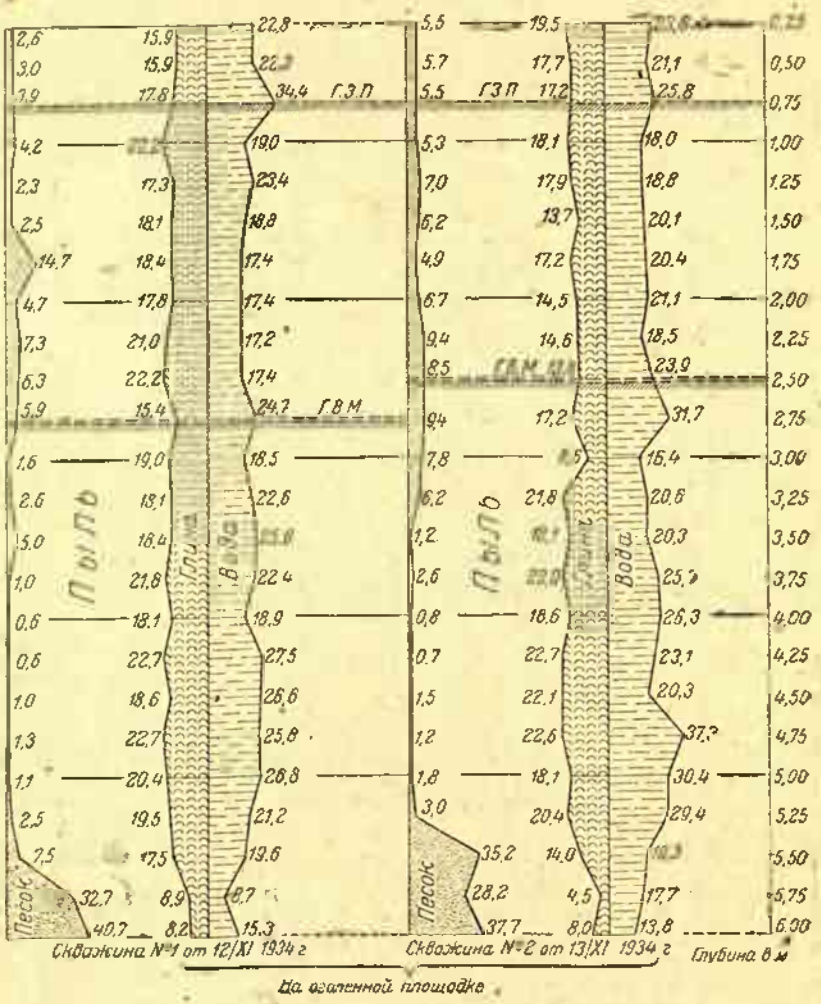
Фиг. 11 и 12. Скважины на площадке с естественным покровом



Фиг. 13. Скважина на естественной площадке

льда, которые не всегда совпадали с точками, где брались пробы. На оголенной площадке на глубине 5,5 — 5,7 *м* находятся камни.

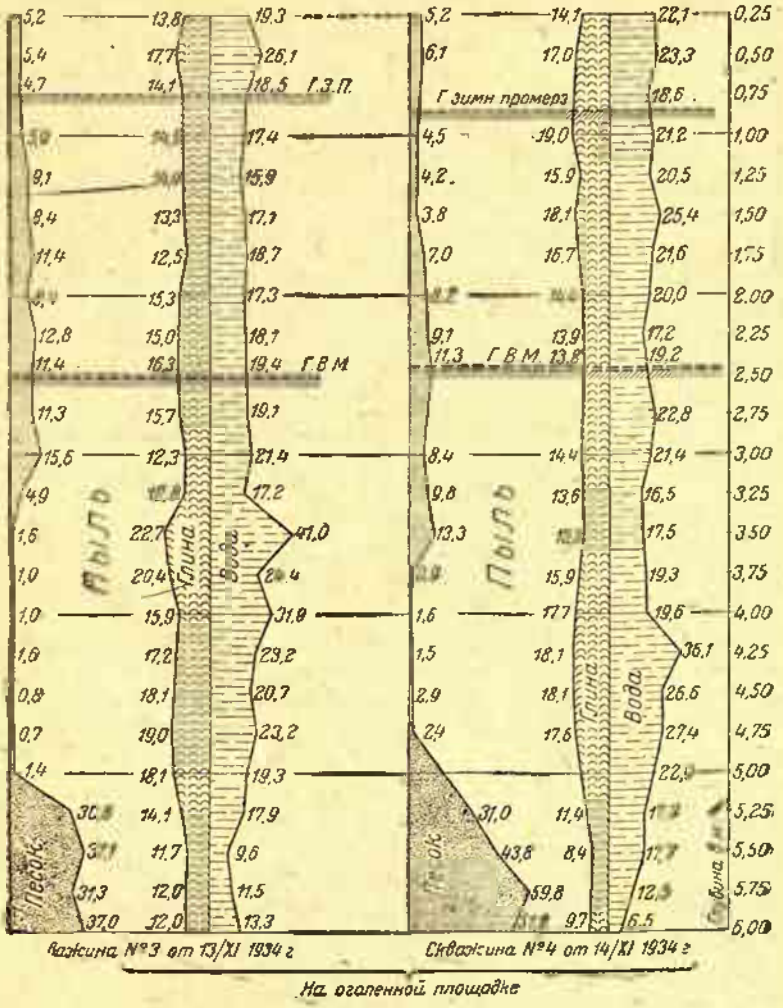
Из приведенных данных видно, что преобладающими грунтами на обеих площадках (а равно и в большинстве долин Дальневосточного края, подобных Сковородинской) являются пылевато-илова-



Фиг. 14 и 15. Скважины на оголенной площадке

тые суглинки с незначительной приместью частиц крупнее 1 *мм* и песка. Полная капиллярная влагоемкость таких грунтов колеблется около 25% по отношению к весу сухого грунта, так что в естественных условиях эти грунты насыщены водой, а часто и сильно переувлажнены, особенно глубже 2,5 *м*, т. е. в вечно мерзлых пластах. Вечно мерзлые суглинки, по крайней мере в Сковородине,

почти вдвое влажнее, чем грунты деятельного слоя, причем вода в них находится в твердой фазе. Например, подсчет влажности грунтов (пробы брались через 25 *см*) по тридцати шести скважинам (сделан-



Фиг. 16 и 17. Скважины на оголенной площадке

ным с 7 по 19 октября 1934 г.), заложенным на электротермометрической площадке Сковородинской станции (фиг. 10), дал такие средние цифры:

Глубина 0 — 2,5 *м* . . . влажность (к сухой навеске) 27,5%
» 2,5 — 5 » . . . » » » » 53,8%

Верхняя граница вечной мерзлоты проходит здесь как раз на глубине 2,5 *м*. В нескольких скважинах на глубине 3,75 — 4 *м* был встречен сплошной лед мощностью местами до 2,25 *м*.

Подобная же картина обнаруживается и по пробам из пятнадцати скважин, заложенных с 26/XI по 4/XII 1934 г. в непосредственной близости с оголенной (и естественной) площадкой, между опытными установками $Б_1$ и $Б_2$:

Глубина 0 — 2,5 *м* . . . влажность (к сухой навеске) 26,2%
» 2,5 — 5 » . . . » » » » 48,2%

Здесь в вечной мерзлоте сплошного льда не было, были лишь обычные его прослойки не толще 2 *см*. Подсчеты эти сделаны на основании почти тысячи проб. Эта переувлажненность вечно мерзлых суглинков, однако, отнюдь не объясняется отжатием воды к границе вечной мерзлоты волной холода, идущей при зимнем замерзании сверху, так как такого отжатия, как показывают многочисленные лабораторные опыты и исследования нескольких сотен скважин, в действительности не существует. Даже из приведенных выше данных по оголенной площадке, где талые грунты находятся между опускающимся сверху зимним промерзанием и вечной мерзлотой снизу, видно, что эти талые грунты менее влажны, чем окружающие их мерзлые грунты.

Переходя теперь непосредственно к рассмотрению температур грунта в Сковородине, необходимо оговориться, что температуры на поверхности почвы исключены по следующим соображениям: обыкновенно их измеряют положенным горизонтально на поверхность земли термометром, шарик которого до половины прикрыт землей, а другая половина его остается снаружи; поэтому трудно сказать, какая собственно здесь измеряется температура, так как влияние солнечной радиации непосредственно на шарик термометра, особенно летом, должно искажать действительные значения температуры поверхности земли.

В 1935 г. Н. И. Быковым был сделан в Сковородине такой опыт: рядом с наземными лежачими термометрами было поставлено на обеих площадках по термометру, укрепленному вертикально в особой стойке, причем ртутный шарик был погружен в землю не до половины, а целиком. Разница, конечно, получилась значительная, особенно летом на естественной площадке и при прямой инсоляции; зимой разница сглаживалась, особенно на оголенной площадке.

В табл. 2 приведены средние декадные температуры по естественной площадке.

Таблица 2

Месяцы	Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
Декады	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Горизонтальный термометр . . .	16,8	19,3	20,8	24,7	24,3	20,6	23,6	19,1	1,60	—15,7	—16,4	—17,4
Вертикальный термометр . . .	13,0	15,6	16,3	19,6	19,6	17,9	19,6	16,7	13,5	—14,9	—14,9	—15,8

Средние декадные температуры по оголенной площадке приведены в табл. 3.

Таблица 3

Месяцы	Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
Декады	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Горизонтальный термометр . . .	14,1	12,3	21,2	26,7	24,3	19,4	22,6	18,7	14,1	—25,4	—24,4	—25,8
Вертикальный термометр . . .	13,6	17,1	18,5	23,8	22,5	20,1	21,5	18,1	13,8	—25,2	—23,9	—25,6

Необходимо помнить, что данные по температуре грунтов в Сковородине относятся полностью только к Сковородину и даже более — только к тем точкам, в которых они наблюдались. Такое ограничение приходится ввести потому, что, как показывает опыт, в двух соседних скважинах, находящихся, повидимому, в одинаковых условиях, температуры все же могут значительно различаться между собой. Приведем некоторые примеры.

В марте 1928 г. на естественной площадке Сковородинской станции были заложены рядом три скважины на глубину 0,8 *м* для изучения влияния материала обсадной трубки на показания термометров на одной и той же глубине. В одну скважину (№ 22) была вделана эбонитовая трубка, в другую (№ 21) — стальная, в третью (№ 20) — железная, заключенная снаружи еще в деревянную трубку. Кроме того, поблизости находились еще две скважины той же глубины, а именно основная (№ 2) с эбонитовой трубкой и добавочная (№ 11) с железной трубкой.

В табл. 4 сличим средние декадные температуры во всех пяти скважинах за 1929 г.

Таблица 4

Месяцы	Декады	Скважина № 2 (эбонитовая трубка)	Скважина № 22 (эбонитовая трубка)	Скважина № 21 (стальная трубка)	Скважина № 11 (железная трубка)	Скважина № 20 (железная трубка с деревянной оправой)
Январь	I	— 8,4	— 5,4	— 6,4	— 9,5	— 7,8
	II	— 9,5	— 6,5	— 7,5	—10,6	— 8,8
	III	—10,5	— 7,5	— 8,5	—11,7	— 9,7
Февраль	I	— 9,8	— 7,2	— 7,9	—10,8	— 8,9
	II	—10,1	— 7,7	— 8,5	—11,3	— 9,4
	III	—11,0	— 8,5	— 9,3	—12,2	—10,3
Март	I	—10,4	— 8,2	— 8,8	—11,3	— 9,5
	II	— 8,3	— 6,6	— 7,0	— 8,9	— 7,5
	III	— 6,5	— 5,1	— 5,4	— 6,7	— 5,7
Апрель	I	— 5,6	— 4,3	— 4,5	— 5,9	— 4,6
	II	— 3,8	— 2,6	— 2,6	— 4,0	— 2,7
	III	— 2,4	— 1,6	— 1,6	— 2,4	— 1,6

Месяцы	Декады	Скважина № 2 (эбонитовая трубка)	Скважина № 22 (эбонитовая трубка)	Скважина № 21 (стальная трубка)	Скважина № 11 (железная трубка)	Скважина № 20 (железная трубка с деревянной оправой)
Май	I	— 1,6	— 1,1	— 1,1	— 1,7	— 1,1
	II	— 1,0	— 0,7	— 0,7	— 1,2	— 0,7
	III	— 0,5	— 0,2	— 0,0	— 0,6	— 0,1
Июнь	I	— 0,1	+ 0,6	+ 0,5	0,0	+ 0,8
	II	+ 0,8	2,1	2,1	+ 1,0	2,0
	III	2,9	4,0	4,0	3,6	4,0
Июль	I	5,2	5,8	5,9	6,2	6,0
	II	5,8	6,8	6,8	6,5	7,0
	III	6,9	7,4	7,5	7,3	7,6
Август	I	7,1	8,2	8,3	7,9	8,4
	II	8,0	9,0	9,1	8,9	9,2
	III	8,0	8,7	9,0	8,0	9,0
Сентябрь	I	7,2	8,2	8,4	7,4	8,5
	II	6,1	6,9	7,0	6,1	7,1
	III	3,9	4,5	4,6	3,8	4,8
Октябрь	I	2,4	3,0	3,0	—	3,0
	II	1,0	1,3	1,2	Наблюдения прекратились	1,4
	III	0,3	0,4	0,4		0,6
Ноябрь	I	0,0	0,1	0,0	—	0,1
	II	0,0	0,0	0,1	—	0,0
	III	— 0,2	— 0,2	— 0,2	—	— 0,5
Декабрь	I	— 1,1	— 0,3	— 0,6	—	— 1,5
	II	— 2,5	— 1,0	— 1,8	—	— 2,9
	III	— 4,2	— 2,1	— 3,1	—	— 4,4

Из приведенных в табл. 4 цифр видно, что разница средних декадных температур на глубине 0,8 *м* на одной и той же площадке с естественным покровом может достигать 4,1° (январь); если же принять во внимание лишь однородные трубки, то разница достигает 3° (при эбонитовых трубках) и 3,2° (при железных трубках), причем характерно, что летом эта разница уменьшается, а зимой увеличивается.

Необходимо обратить внимание также на то, что несмотря на столь значительное различие декадных температур и их амплитуд минимумы и максимумы наступают во всех скважинах в одно время: минимум — в третьей декаде февраля, а максимум — во второй декаде августа. Абсолютные минимумы и максимумы приходятся в следующие сроки:

	Минимумы	Максимумы
Скважина № 2	27 февраля	12 августа
» № 22	26 »	18 »
» № 21	26 »	16 »
» № 11	26 »	16 »
» № 20	26 »	16 »

Можно ли на основании этого опыта сделать заключение о роли материала, из которого сделаны трубки? Сделать это очень затруднительно, так как в скважинах даже с одинаковыми трубками различие температур все же бывает очень значительно и трудно решить, что можно отнести за счет материала трубки и что — за счет действительно существующей разницы в температурах рядом находящихся скважин. В том, что это последнее обстоятельство наблюдается независимо от материала трубок, нас убеждают многочисленные измерения температуры, сделанные в пятнадцати скважинах, пробитых в декабре 1934 г. на площадке Сковородинской станции у опытных установок $Б_1$ и $Б_2$.

Из указанных пятнадцати скважин возьмем для примера пять скважин, расположенных в одинаковых условиях вдоль западной стороны установки $Б_2$ (скважины № 11 — 15). Скважины вытянуты в одну линию приблизительно с севера на юг; расстояние между соседними скважинами около 1,7 *м*. До мая 1935 г. в этих скважинах не было никаких обсадных труб и все же измерения температуры, делаемые во всех этих скважинах в один день, давали различные цифры. Например, на глубине 1 *м* 7 января 1935 г. температура была от —8,8° до —10,6°, 3 февраля того же года от —8,8 до —9,9°, 6 марта от —7,2 до —7,8°, 5 апреля от —4,3 до —5,6°. Разницу температур можно было отметить и на более значительных глубинах; например, на глубине 2 *м* 12 февраля 1935 г. температура в разных скважинах колебалась от —1,8 до —2,8°, 15 марта от —2,6 до —3,4°, 15 апреля от —2,2 до —2,8° и т. д. Даже на глубине 5 *м* в различных скважинах температура была неодинакова; например, 5 марта 1935 г. она колебалась от —0,5 до —0,8°; эту разницу для такой глубины следует признать весьма значительной.

Из сказанного можно сделать следующие практические выводы, которые должны учитываться изыскателями:

1) наблюденные в каком-нибудь пункте температуры, по крайней мере до глубины 2,5 — 3 *м*, не дают права думать, что такие же температуры существуют на этих глубинах и в других пунктах данной местности, даже если эта местность является по внешнему виду однородной;

2) одно случайное наблюдение температуры в каком-нибудь пункте на указанных выше глубинах весьма мало характеризует температурный режим грунтов в данной местности;

3) измерение температуры лучше делать (если не мешают грунтовые воды) в естественных буровых скважинах, не перекрытых обсадными трубками.

К этому следует добавить, что вносимое бурением нарушение термического режима, как показала практика, на вторые сутки исчезает. Это замечание во всяком случае справедливо для скважин, диаметр которых не превышает 75 *мм*.

§ 9. Суточные и годичные температурные циклы

Насколько и в каком виде отражаются в грунтах суточные колебания температуры воздуха? На естественной площадке Сковородинской

станции в течение полутора лет велись наблюдения над температурой грунта на глубинах 5 и 10 *см* при помощи термометров Савинова. На фиг. 18,19 и 20 нанесены температуры воздуха и грунта на глубине 5, 10 и 40 *см* (в последнем случае температура измерялась обычным почвенным термометром) за три декады 1930 г.: первую декаду января — в период наибольших холодов (фиг. 18), третью декаду апреля, когда начинается оттаивание поверхности земли (фиг. 19) и первую декаду июля — время наступления наиболее жаркого времени года (фиг. 20). Наблюдения производились одновременно три раза в сутки: в 7, 13 и 21 час.

При рассмотрении этих графиков получаются следующие выводы:

1) суточные колебания температуры воздуха отражаются на температурах грунта на глубине 5 и 10 *см*; на глубине 40 *см* они практически уже не улавливаются;

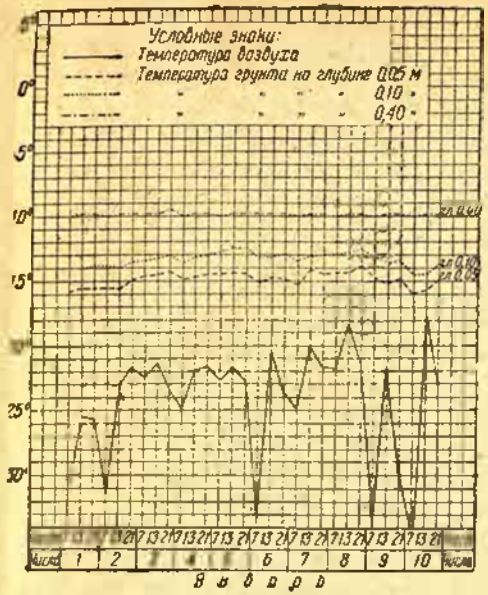
2) амплитуды колебаний температур грунта на глубине 5 и 10 *см*, незначительные в январе и апреле, делаются несравненно большими в июле: здесь сказывается, повидимому, теплоизолирующее действие снежного покрова; кроме того, амплитуды колебания температур воздуха в июле достигают наибольших размеров;

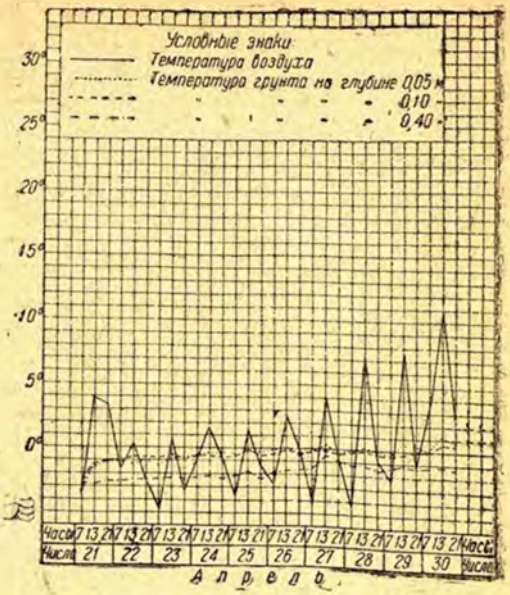
3) влияние снежного покрова значительно превышает влияние растительного травянистого покрова; в январе на глубинах всего 5 и 10 *см* значительно теплее, чем в воздухе; в апреле, когда снежного покрова уже нет, температуры более или менее сравниваются, а в июле температура воздуха значительно выше температуры грунта; тут изолирующее от тепла действие оказывает травянистый покров, но это действие количественно значительно меньше действия снегового покрова;

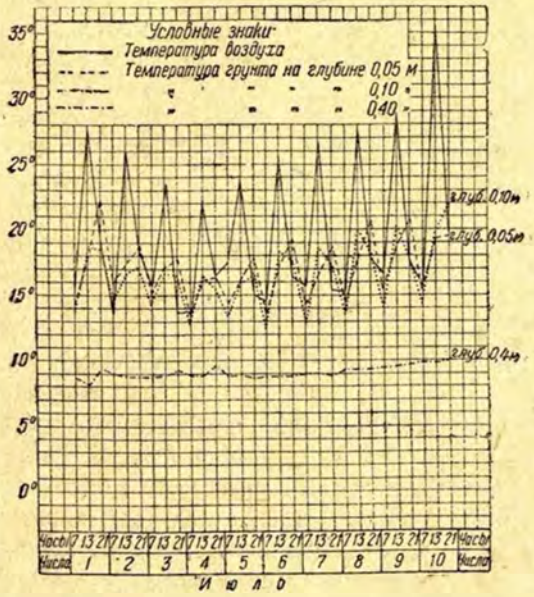
4) характерно отставание наступления максимумов, особенно на глубине 10 *см*, по сравнению с максимумом температуры воздуха в июле; по отношению к минимумам это менее заметно; наконец, следует отметить, что в июле грунт на глубине 5 *см* охлаждается более, а нагревается так же или даже несколько менее, чем на глубине 10 *см*.

Годичные циклы температур грунтов в Сковородине исследовались на площадке с естественным покровом (трава и снег сохраняются), на оголенной площадке (трава и снег удаляются) и на заболоченной площадке. Последняя характеризуется не только большей влажностью, но и более мощным развитием травянистого (осокового) покрова.

На фиг. 21 приведены средние многолетние температуры за четыре года (1931 — 1934 гг.) по всем трем площадкам, а также средние многолетние температуры воздуха за тот же период. Для примера взята глубина 1,6 *м*, наиболее характерная для деятельного слоя. Все три кривые различны. Общим признаком для них является значительный перевес отрицательных зимних температур над положительными летними. Это объясняется тем, что средняя годовая температура воздуха в Сковородине, по многолетним наблюдениям, равна —4°. Зимой температура всего ниже опускается на оголенной площадке; на площадке с естественным покровом она выше, а на



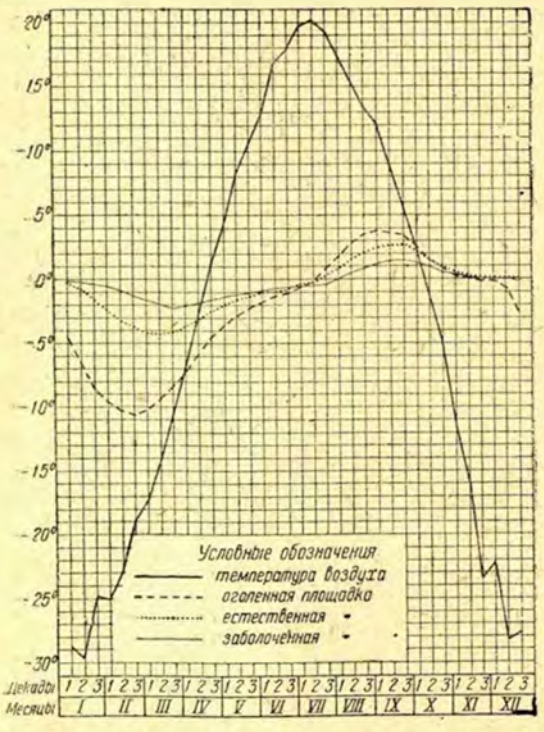




Фиг. 18, 19 и 20. Суточные колебания температуры воздуха и грунта на естественной площадке Сковородинской НИМС, 1930 г.

заболоченной площадке еще выше. Здесь сказывается действие снегового покрова: его вовсе нет на оголенной площадке, на естественной он уже прикрывает землю, а на болотистой, находящейся в небольшой впадине, ложится на высокую осоковую растительность и образует основательный теплоизолирующий слой. Разница амплитуд зимних температур по всем трем площадкам очень значительна.

В течение примерно месяца (третья декада июня и две первые декады июля) температуры на всех трех площадках, оставаясь еще отрицательными, но близкими к нулю, сближаются. Получается как бы узел, который наблюдается и на других глубинах, но только время его появления на различных глубинах также различно. В нашем примере он совпадает с максимальной температурой воздуха. Но не нужно забывать, что здесь мы имеем дело только с одной глубиной, а именно 1,6 *м*, на которую температуры воздуха проникают с большим опозданием.



Фиг. 21. Сравнительный ход температур на глубине 1,6 *м* в различных условиях Сковородинской НИМС

Обратный переход—через нулевую температуру к температурам отрицательным—совершается в разное время. Особенно отстает заболоченная площадка.

Появление положительных температур на глубине 1,6 *м* происходит раньше всего на оголенной площадке, которая скорее прогревается, но, конечно, со значительным запозданием по отношению к максимуму температуры воздуха. Еще более запаздывают естественная и заболоченная площадки; это можно объяснить влиянием растительного покрова и влажностью почвы. Амплитуда колебаний летних температур на всех трех площадках несравненно меньше, чем зимних. Это еще раз указывает на то, что снеговой покров оказывает значительно большее влияние на грунтовые температуры, чем травянистый покров.

Следует отметить еще одно обстоятельство, обнаруживаемое на различных глубинах, а именно: переход от зимних отрицательных температур к положительным летним совершается быстро, без задержек на 0°; обратный же переход к отрицательным температурам

в начале зимы совершается очень медленно, так как на 0° получается длительная задержка, особенно на естественной и заболоченной площадках. На рассмотрении этой задержки придется остановиться ниже.

Указанное нами различие температурного режима площадок с естественным покровом и оголенной очень важно для строителей, так как около сооружения может оказаться или естественная или оголенная площадка. Может случиться, что с одной стороны сооружения площадка будет с естественным покровом, а с другой — оголенная. Все это создает различные температурные режимы и при наличии пучащих грунтов может создать как неравномерное пучение, так и неравномерное оседание сооружения.

Что же касается суточных колебаний температуры, то из изложенного видно, что в вопросах строительства они никакой роли играть не могут.

§ 10. Средние многолетние температуры

Материалы по температурам Сковородинской станции имеют ту ценность, что дают возможность получить не просто средние годовые температуры грунтов на различных глубинах, но также и средние многолетние годовые температуры, что очень важно для выяснения закономерностей термического режима грунтов в районах вечной мерзлоты. В самом деле, по скважинам на естественной площадке глубиной 0,4; 0,8; 1,6; 2,5; 3,2 и 5 *м* мы имеем непрерывные наблюдения за 8 лет (с 1928 по 1935 г. включительно) в одних и тех же скважинах. По скважинам глубиной 2,25 и 4 *м* такие данные имеются лишь за последние 4 года. Температуры на глубине 2 *м* измерялись хотя и в течение всех 8 лет, но, к сожалению, в двух различных скважинах (с 1928 г. по август 1931 г. в скважине № 18, с августа 1931 г. по настоящее время в скважине № 263), что по приведенным выше соображениям о различии термических режимов в различных пунктах весьма нежелательно. Затем имеются скважины глубиной 10 и 14 *м*, наблюдения в которых ведутся с марта 1928 г. и производятся по настоящее время. В подсчетах эти скважины включены только с 1929 г. Наконец, в июне 1931 г. начались наблюдения в скважине глубиной 28 *м*, расположенной на той же естественной площадке в 30 *м* к северу от основной группы термометрических установок. В этой глубокой скважине на пеньковом канате подвешено шесть термометров на глубинах 5; 10; 15; 20; 25 и 28 *м*, причем наблюдения производятся раз в декаду, так как колебания температуры на таких глубинах ничтожны, часто же нарушать термическое и воздушное равновесие скважины нежелательно. В подсчеты эта скважина включена с 1932 г.

Были подозрения, нет ли в скважине конвекционных токов воздуха, которые могут нарушать ее естественный термический режим. Для выяснения этого в марте 1934 г. термометры после тщательной их выверки были разделены войлочными диафрагмами, примыкавшими к стенкам скважины. Однако заметной разницы не получилось,

и через некоторое время диафрагмы были сняты, что опять-таки не отозвалось на показаниях термометров.

К недостаткам методики наблюдений в этой скважине следует отнести частую смену наблюдателей. Колебания температуры в этой скважине ничтожны; все же за 5 лет получился интересный материал, единственный в своем роде.

По оголенной площадке имеются наблюдения за 5 полных лет (с 1931 по 1935 г. включительно), но они нуждаются в оговорках. Измерения делались в трех различных местах: сначала в контрольных скважинах, расположенных у опытных столбов, а также под этими столбами; затем только под столбами; наконец, в вынесенной к юго-западному углу оголенной площадки отдельной серии почвенных термометров.

К этому следует добавить, что в первом и втором местах (в контрольных скважинах и под столбами) измерения производились на глубинах 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5 и 6 *м*, т. е. не совпадающих с принятыми для естественной площадки. Если добавить к этому, что столбы, заглубленные до 2,5 *м*, сильно выпучило и их не осаживали, то становится неясным, на какой глубине в различное время измерялась температура в одном и том же месте.

Кроме того, нужно принять во внимание, что снятие растительного покрова и систематическое удаление снега вызвало резкое изменение термического режима грунтов этой площадки в первое время ее существования, и если на небольших глубинах это нарушение могло скоро выравняться, то на глубинах 3,2 и 5 *м* новое равновесие могло установиться, как показывают аналогичные случаи, лишь через год. Поэтому приходится вовсе исключить четыре первых месяца функционирования площадки (сентябрь — декабрь 1930 г.), а 1931 г. поставить под сильное сомнение, так как в течение этого года температуры измерялись сперва в контрольных скважинах, а потом под столбами. Начиная с 1932 г., можно признать наблюдения более или менее надежными, но не для скважин в 3,2 и 5 *м*, которые были пущены в ход только с июля 1932 г.; следовательно, для этих последних глубин можно признать вполне надежными только наблюдения 1933 — 1935 гг.

На графике (см. ниже) сведены средние многолетние температуры на различных глубинах по естественной площадке, причем глубже 5 *м* идут температуры, полученные по скважине глубиной 25 *м* за 5 лет, а вместе с ними до 14 *м* — температуры по скважинам глубиной в 10 и 14 *м* за 8 лет, причем расхождения не получилось.

Средняя годовая температура воздуха за период 1928 — 1935 гг. равнялась —4°, а за период 1932 — 1935 гг. —3,6°. За 13 полных лет наблюдений, проводившихся на Сковородинской метеорологической станции, а именно 1912, 1914, 1916 гг. и с 1926 по 1935 г. включительно (за остальные годы наблюдения или неполны или отсутствуют) средняя годовая температура воздуха равняется —4,1°, так как последние годы были более теплыми. Особенно уклоняющимся от нормы был 1934 г. со средней годовой температурой —2,9°.

Средние годовые температуры воздуха в Сковородине приведены в табл. 5.

Таблица 5

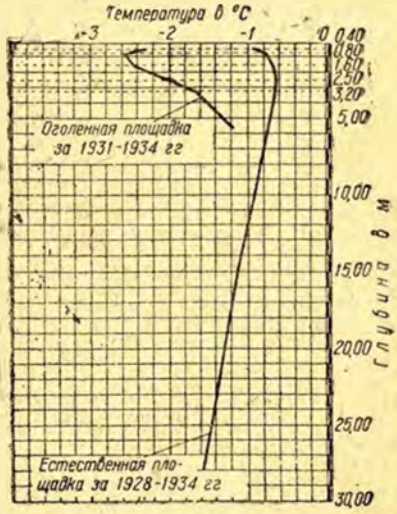
Годы	Температура в °С	Годы	Температура в °С
1912	—4,9	1930	—4,5
1914	—4,0	1931	—4,1
1915	—4,3	1932	—3,7
1926	—4,1	1933	—4,1
1927	—4,2	1934	—2,9
1928	—4,5	1935	—3,9
1929	—4,5		

При рассмотрении кривых средних многолетних температур на различных глубинах выясняется следующее.

1. Средние годовые температуры грунтов на любой глубине как естественной, так и оголенной площадок всегда выше средней годовой температуры воздуха и никогда с ней не уравниваются.

2. Начиная с глубины 0,4 *м* (а тем более с самой поверхности земли) кривая средних многолетних температур (фиг. 22) на естественной площадке плавно идет сперва в сторону повышения, причем самым теплым на естественной площадке оказывается горизонт 2,5 — 3,2 *м*, что в Сковородине соответствует как раз верхнему горизонту вечной мерзлоты.

3. При дальнейшем углублении кривая годовых температур оказывается аномальной, а именно она повертывает в сторону понижения, причем принимает почти прямолинейный вид. По мере углубления годовые температуры делаются ниже, вместо того чтобы повышаться. Повидимому, в глубине грунтов есть еще запас холода, который и производит эту аномалию. Это явление впервые было изучено М. И. Сумгиным именно по Сковородинской скважине глубиной в 28 *м* и послужило для него главным опорным пунктом при создании теории о деградации вечной мерзлоты. Основание этой теории заключается в следующем.

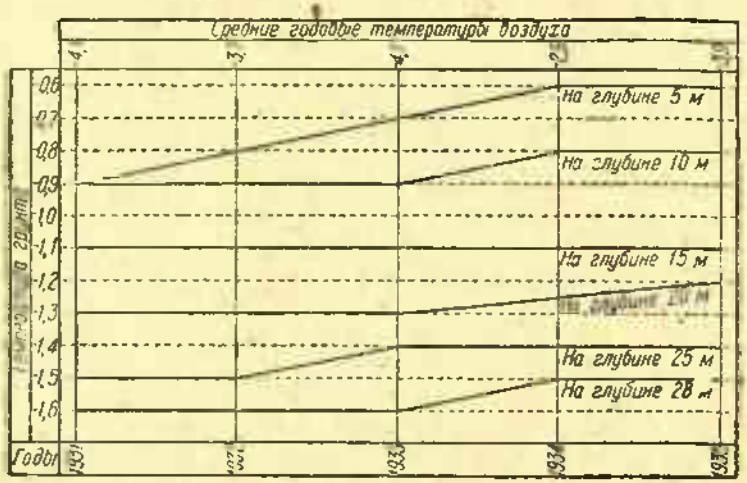


Фиг. 22. Средние многолетние температуры грунта на различных глубинах оголенной и естественной площадках

Кривая средних многолетних, данная на фиг. 22, показывает, что начиная с глубины 3,0 *м* наблюдается постепенное понижение температуры грунта до 28 *м*. Очень возможно, что это понижение будет

продолжаться и дальше до известного предела. Но в конце концов неизбежно будет найдена такая глубина, начиная с которой температуры будут повышаться. На некоторой глубине температура будет равна 0° и грунты не будут сцементированы льдом; это и будет нижняя граница вечной мерзлоты.

Если это так (а это несомненно так), то оказывается, что некоторая толща грунта, имеющая наиболее низкую температуру, подстилается и покрывается более теплыми слоями, которые по отношению к этой толще являются источниками тепла. Это обстоятельство и дало основание М. И. Сумгину говорить, что слой с наиболее низкой температурой должен постепенно теплеть за счет более теплых слоев. Вот этот предполагаемый процесс потепления вечной мерзлоты и назван М. И. Сумгиным деградацией мерзлоты.



Фиг. 23. Средние годовые температуры грунта на различных глубинах скважины в 28 *м* в Сковородине

В своей работе М. И. Сумгин мог воспользоваться только первыми наблюдениями над температурой скважины глубиной в 28 *м* (за 6 месяцев); теперь же мы располагаем материалом за 4,5 года. Очень важно удостовериться, произошли ли за это время какие-либо изменения температур на различных глубинах.

На фиг. 23 даны графики средних годовых температур по скважине глубиной 28 *м* за 1931 — 1935 гг., причем за 1931 г. температура указана условно, так как наблюдения в скважине начались только с июля 1931 г. Прежде чем делать какие-либо выводы из этих графиков, снова необходимо напомнить, что недостатки методики температурных измерений, о которых говорилось в начале главы, и недостаточная точность инструментов в данном случае могут иметь большое значение, так как изменения температур на всех глубинах, за исключением 5 *м*, не превышают 0,1°. Поэтому нельзя твердо ру-

чаться за полную достоверность всех этих цифр, конечно, в пределах указанной точности. Не упуская этого из виду, мы в приводимых графиках замечаем, как будто, указание на очень интересное явление, а именно на намечающуюся тенденцию к потеплению почти на всех глубинах. Но прежде чем обсуждать этот вопрос, приведем в табл. 6 параллельные данные по температурам на тех же глубинах в других скважинах.

Таблица 6

Глубина \ Годы	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935
5 *м* естественной площадки (скважина № 7) . .	—0,6	—0,7	—0,7	—0,7	—0,8	—0,7	—0,7	—0,7
5 *м* оголенной площадки	—	—	—	—0,9	—1,2	—1,7	—1,6	—1,5
10 *м* (скважина № 17) * .	—0,9	—1,0	—0,9	—0,9	—0,9	—0,9	—0,9	—0,9
14 *м* (скважина № 19) ** .	—1,1	—1,0	—1,1	—1,1	—1,1	—1,1	—1,1	—1,0

В скважине глубиной 28 *м* особенно резко проявляется тенденция к потеплению на глубине в 5 *м*. Но именно здесь, ставя вопрос о потеплении грунта, приходится проявить известную осторожность, так как основная скважина (№ 7) глубиной 5 *м* на естественной площадке такой тенденции не обнаруживает.

В скважине глубиной 5 *м* на оголенной площадке сперва обнаруживается обратная тенденция — к значительному понижению температуры, что может быть, объясняется медленным похолоданием грунта на этой глубине в результате снятия растительного покрова и систематического удаления снега.

Сопоставляя данные табл. 6 по двум 5-*м* скважинам с температурными данными на той же глубине в скважине глубиной 28 *м*, приходится признать, что напрашивавшийся первоначально вывод о наличии потепления на глубине 5 *м* был бы преждевременным. Напомним еще, что 1932 г. был теплее нормального, не говоря уже о 1934 г.

Температура на глубине 10 *м* измерялась в двух скважинах: в скважине глубиной 28 *м* и в скважине № 17. В последней она остается стабильной в течение 8 лет, если не считать 1929 г. Наблюдения именно за этот год вызывают значительные сомнения. Цифра —1° давалась одним наблюдателем неизменно в течение всего 1929 г., вплоть до 2 марта 1930 г., когда он был заменен другим, опытным и аккуратным наблюдателем, на другой же день (3 марта 1930 г.) записавшим температуру —0,9°, которая и отмечалась потом всеми другими наблюдателями в течение 6 лет до настоящего времени. Температура на глубине 10 *м* не могла измениться за один день, и это совпадение со сменой наблюдателей, конечно, не случайно. Последний наблюдатель, считавшийся наиболее добросовестным, делал отсчеты всегда очень тщательно и за эту свою цифру ручался. При-

* Нет данных за январь и февраль 1928 г.

** Нет данных за январь, февраль и две первые декады марта 1928 г.

ходится думать, что в этой скважине если и бывают какие-либо колебания температуры в пределах 0,1°, то все же в основном ее температура стабильна и равна около —0,9°. Приведенный случай показывает еще раз, насколько осторожным приходится быть в выводах, если дело идет об одной десятой градуса, что равно пределу точности употребляемых термометров.

В скважине глубиной 28 *м* на глубине 10 *м* наблюдалось повышение температуры на 0,1° в 1934 г., сохранявшееся и в 1935 г. Сопоставление со скважиной № 17 опять-таки удерживает нас от вывода о наличии потепления вообще на этой глубине в Сковородине.

Температура на глубине 15 *м* в скважине глубиной 28 *м* характеризуется полной стабильностью. 4,5 года она держится на — 1,1°. Та же температура держится в основном и в скважине № 19 глубиной 14 *м*, если опять не считать 1929 г., сомнительного по тем же причинам, которые были приведены по отношению к скважине № 19 за тот же год. Однако в 1935 г. в этой скважине по всем декадам отмечена температура —1,0°. Необходимо заметить, что термический режим этой скважины мог быть несколько нарушен тем, что в 1934 г. и в первой половине 1935 г. ее обсадной трубой пользовались как репером, для чего скважину многократно открывали и вставляли в ее верхнее отверстие втулку с рейкой. Это обстоятельство могло сказаться и на глубине 14 *м*.

Температуры на глубинах 20; 25 и 28 *м* обнаруживают согласованную тенденцию к повышению на 0,1° после 1933 г. Мы не можем сравнивать их с температурами в какой-либо другой скважине, потому что параллельных скважин такой же глубины в Сковородине не было. Однако эти данные все же заслуживают внимания, так как они подтверждаются целым рядом наблюдателей и не потребовали исправлений после тщательной проверки термометров.

Если бы удалось подтвердить наличие такого потепления снизу при помощи более точных методов (например, измерениями электротермометрами и притом с точностью не до 0,1°, а, скажем, до 0,01°), то этот факт имел бы огромное научное значение. Представляется такая картина, будто снизу происходит поток тепла, доходящий до уровня 14 — 15 *м*, где господствует равновесие. Чрезвычайно важно было бы проследить, не нарушится ли это равновесие в дальнейшем. Однако не исключается возможность наличия и каких-либо циклов (конечно, не годовых), о которых мы еще ничего не знаем. Ведь и климатические циклы находятся еще в начальной стадии изучения.

4. Средние годовые температуры на оголенной площадке, во всяком случае до глубины 6 *м*, всегда ниже температуры на соответственных глубинах естественной площадки. Сравниваются они, повидимому, где-то на глубине около 10 *м*. Это показывает, что влияние травяного и снегового покровов сказывается несравненно глубже, чем это допускают обычно.

Столь тщательное рассмотрение затронутых выше вопросов и относящихся к ним данных обусловлено тем, что учению о деградации,

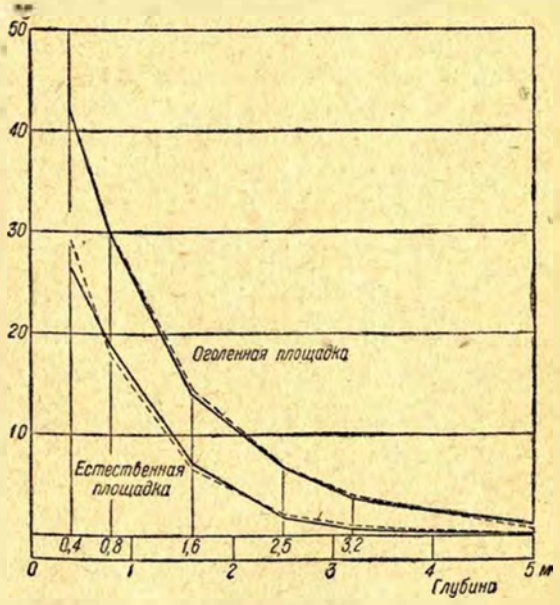
т. е. о потеплении вечно мерзлых толщ, в настоящее время в литературе уделяется очень много внимания и (что особенно важно) постепенно развивается особая рецептура строительства на деградирующей вечной мерзлоте, которая в некоторых случаях рекомендует уничтожение вечной мерзлоты и т. д.

Ясно, что анализ данных Сковородинской станции, которые и послужили основанием для создания учения о деградации вечной мерзлоты, является чрезвычайно важным. Приведенный же выше анализ показал, что на основании имеющегося материала за несколько лет и при той точности наблюдений, которая имела место, говорить уверенно о потеплении не приходится, но нельзя отрицать и его возможности. Для решения вопроса нужно подождать, чтобы иметь наблюдения за более длительный период времени, а также перейти к более точным методам наблюдений. В настоящее же время нужно сказать, что если в Сковородине и протекает процесс деградации вечной мерзлоты, то протекает довольно медленно.

К практическим выводам из всего этого и к вопросу о деградации мы вернемся в последующем при рассмотрении вопросов строительства.

§ 11. Амплитуды колебаний температуры на различных глубинах

При определении величины амплитуд температурных колебаний брались абсолютные амплитуды за каждый год и затем определялась средняя амплитуда для естественной площадки в течение 8 лет, а для оголенной — в течение 4 лет. Полученные данные изображены на графике фиг. 24. Как и следовало ожидать, амплитуды убывают по мере углубления в землю, но неодинаково: на оголенной площадке амплитуды больше и убывают несколько быстрее, чем на естественной. В 1928, 1933 и 1935 гг. на естественной площадке на глубине 5 *м* даже нельзя было отметить колебаний, достигающих 0,1°.



Фиг. 24. Сплошными линиями обозначены фактические, а пунктирными—вычисленные амплитуды

Вообще необходимо сказать, что годичные циклы температур на глубине 5 *м* естественной площадки очень неясны; только в 1929 г. амплитуда достигает 0,4°, а в среднем она равна 0,2°. Совсем иная картина получается на оголенной площадке. Там и на глубине 5 *м*

амплитуды ясно заметны; например, в 1933 г. колебание достигло 1,6°. Для глубин 3,2 и 5 *м* пришлось принять во внимание и 1932 г., хотя первую половину года, на которую приходятся минимумы, температура измерялась под столбами. Сделано это было потому, что (как показывают данные за этот же год для глубин 1,6 и 2,5 *м*) амплитуды за 1932 г. были значительно меньше, нежели за последующие 3 года. Так как вообще 3 года — слишком незначительный срок и амплитуды в течение их были, возможно, выше средних, то для уравновешивания их и введены данные за 1932 г.

Кривая амплитуд по оголенной площадке имеет закономерный вид. Если взять первый закон Фурье, а именно: если глубина увеличивается в арифметической прогрессии, то амплитуды температур уменьшаются в прогрессии геометрической, данная кривая удовлетворяет этому закону с допустимой степенью точности.

В самом деле, при знаменателе арифметической прогрессии 0,4, а геометрической прогрессии 0,7 мы получаем следующее соотношение между фактическими и вычисленными амплитудами:

Глубина в *м*		0,4	0,8	1,6	2,5	3,2	5
Амплитуды	фактическая	42	29,8	14,2	6,4	3,7	1,1
	вычисленная	42	29,8	14,6	6,4	3,5	0,7

Как видим, обе ломаные на фиг. 24 почти совпадают и самое большое расхождение — на 0,4° — наблюдается на глубине 5 *м*.

С амплитудами на естественной площадке дело обстоит не так гладко, в особенности в верхних горизонтах. Но если допустить довольно значительные (в абсолютных величинах, но не в отношении ко всей величине амплитуды) расхождение для глубины 0,4 *м*, доходящее до 3,1°, и принять знаменатель геометрической прогрессии в 0,883 для интервала в 0,1 *м*, то получим следующее соотношение:

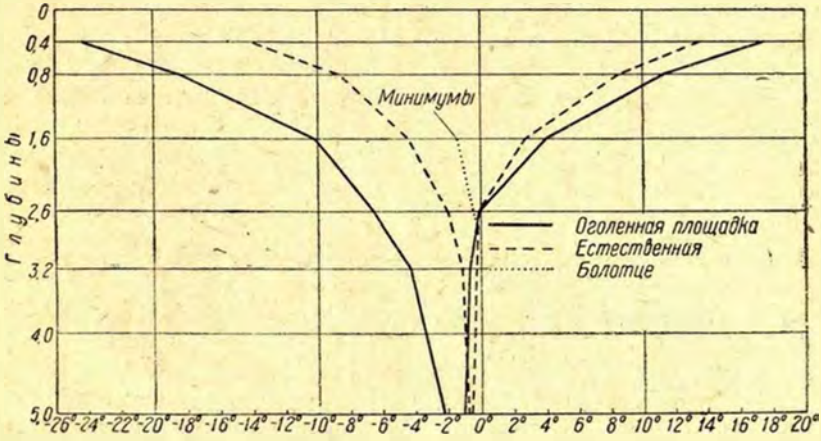
Глубина в *м*		0,4	0,8	1,6	2,0	2,5	3,2	5,0
Амплитуды	фактические	26,6	18,8	7,2	4,8	1,8	0,7	0,2
	вычисленные	29,7	18,1	6,7	4,1	2,2	0,9	0,1

Как видим, и здесь, хотя и с меньшей степенью точности, мы все же имеем картину, аналогичную только что полученной для оголенной площадки.

Конечно, еще рано делать какие-либо окончательные выводы на основании этих предварительных элементарных выводов, а тем более говорить о полной применимости первого закона Фурье к амплитудам температур грунтов в районах вечной мерзлоты; потребуется еще много длительных наблюдений в различных точках с математической их обработкой. Но все же для Сковородина в данный отрезок времени можно сказать, что амплитуды температур на различных глубинах являются показательной функцией этих глубин. Неполнота и часто сомнительность температурных данных по другим станциям на вечной мерзлоте не позволяет воспользоваться ими с такой же степенью достоверности, как сковородинскими, однако можно сказать, что и там намечается та же законность, хотя и с другими параметрами.

§ 12. Минимумы и максимумы температур грунтов на разных глубинах

Абсолютные величины максимумов и минимумов температур на различных глубинах, средние за 8 лет по естественной и за 4 года по оголенной площадкам, изображены на кривых фиг. 25. Видно, что перевес имеют отрицательные температуры и даже максимумы с глубины 2,5 *м* имеют отрицательный знак. Отметим при этом, что в 1933 и 1934 гг. на глубине 2,5 *м* на естественной площадке максимумы были положительные, а именно: в 1933 г. +0,3° (27 сентября), в 1934 г. +0,2° (29 сентября), в 1935 г. 0,0° (14 октября). На оголенной площадке на той же глубине максимумы были: в 1933 и 1934 гг. 0° (21 октября и 21 сентября), в 1935 г. —0,1° (20 сентября).



Фиг. 25. Многолетние абсолютные минимумы и максимумы на естественной и оголенной площадках Сковородинской НИМС и на болотце

На этом же графике нанесены данные по болотцу, находящемуся на той же площадке Сковородинской станции в 50 *м* от основных термометрических установок. Болотце покрыто довольно высокой осокой, между пучками которой летом по большей части бывает вода, а зимой наметает значительно больше снега, чем в других частях естественной площадки. В этом болотце с 1928 г. по июль 1931 г. производились термометрические наблюдения на глубинах 1,6; 2; 2,5; 3,2 и 5 *м*. Температура в этом болотце обычно выше, нежели на тех же глубинах в других установках; в особенности это относится к зимним температурам.

На той же фиг. 25 пунктиром нанесены средние минимумы по болотцу, причем с глубины 3,2 *м* они совпадают с максимумами естественной площадки; максимумы же идут на небольших глубинах, почти совпадая с максимумами той же естественной площадки, и лишь с глубины 2,5 *м* несколько отходят от них, оставаясь в среднем положительными (+0,1°). Глубже кривая максимумов по болотцу

идет так близко к кривой максимумов естественной площадки (проходя все же ближе к нулевой оси), что изобразить ее на графике было затруднительно.

Различие между естественной и оголенной площадками особенно сильно сказывается в отношении минимумов. На естественной площадке они на всех глубинах очень значительно сдвинуты к 0° по сравнению с оголенной площадкой и по абсолютной величине не так резко отличаются от максимумов. Даже на глубинах 3,2 и 5 *м* минимумы на естественной площадке сдвинуты к 0° и не совпадают с минимумами оголенной площадки. Еще более велик этот сдвиг минимумов в болотце. Очевидно, здесь мы имеем дело с отепляющим действием снегового покрова, а так как он всего мощнее именно в болотце (например, в декабре 1928 г. у скважины № 3 глубиной 1,6 *м* на естественной площадке мощность снегового покрова была 9 *см*, а у скважины № 12 той же глубины на болотце снегу было 41 *см*, в январе 1929 г. мощность снегового покрова была соответственно 16 и 46 *см*, в феврале 13 и 44 *см*, в марте 7 и 39 *см*), то и минимумы там не намного отходят от 0°.

Кривые максимумов, наоборот, значительно сближены между собой по всем площадкам, несмотря на различие их внешних покровов.

Температура среднего минимума по естественной площадке и по болотцу на глубине 5 *м* все же несколько выше среднего максимума на оголенной площадке на той же глубине, не говоря уже о минимуме, что еще раз доказывает, что влияние покровов сказывается на термическом режиме грунтов даже глубже 5 *м*.

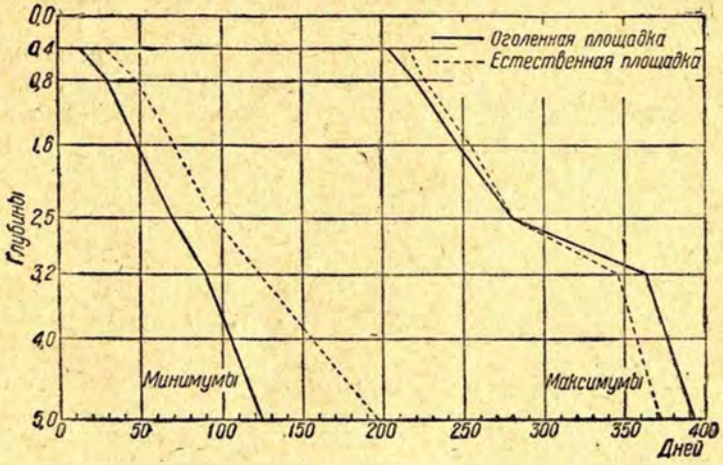
Попутно заметим, что амплитуды колебаний температур на болотце несравненно меньше амплитуд не только на оголенной, но и на естественной площадках, причем это сокращение амплитуд происходит за счет только минимумов.

Теперь обратимся к рассмотрению времени наступления минимумов и максимумов. Давно известно, что наступление и минимумов и максимумов запаздывает тем больше, чем глубже мы берем точку наблюдения. На фиг. 26 даны графики, изображающие дни наступления средних минимумов и максимумов по естественной и оголенным площадкам, причем для оголенной площадки они взяты за 4 года (кроме глубины 3,2 *м*, для которой в отношении минимумов исключен 1932 г., так как первую половину этого года измерения делались под столбом на глубине 3,5 *м*), а для естественной — за 8 лет и за 4 года (1932 — 1935 гг.) для сравнения с оголенной площадкой за те же годы. Взяты средние дни, а не средние декады, хотя при пользовании средними декадами результат получился тот же. Глубины в метрах отложены на оси ординат; на оси абсцисс отложены по порядку дни года, начиная с 1 января. Минимальная температура воздуха приходится в среднем за 8 лет на первую декаду января, а максимальная — на вторую декаду июля.

Обращает на себя внимание ход минимумов температур, дающий довольно прямую линию, в особенности по оголенной площадке. Минимумы все отрицательны и распространяются в сплошь мерзлой

толще, которая в целом ведет себя по отношению к потоку холода идущему сверху, очевидно, как изотропная среда. Второй закон Фурье гласит, что времена наступления максимума температуры запаздывают прямо пропорционально глубинам. Наши графики дают известное основание говорить тоже о линейной зависимости между временем наступления минимума и глубиной.

По естественной площадке линия минимумов температур идет также довольно прямолинейно, в особенности восьмилетняя. Но необходимо оговориться, что на глубине 5 *м* на естественной площадке как минимумы, так и максимумы трудно определимы, а для некоторых лет (1928, 1933 и 1935 гг.) и совсем не могут быть указаны,



Фиг. 26. Средние сроки наступления абсолютных минимумов и максимумов на площадках Сковородинской НИМС

так как температура грунта на этой глубине в течение указанных лет оставалась без изменений.

Минимумы на естественной площадке наступают, как и следовало ожидать, всегда позже, чем на оголенной, причем по мере углубления это отставание естественной площадки увеличивается.

Ход максимумов грунтовых температур значительно сложнее. До глубины 2 *м* они положительны и идут в талом грунте. С глубины 2,5 *м* они отрицательны и идут уже в мерзлоте. Мы видим, что до глубины 2,5 *м*, т. е. до границы вечной мерзлоты, они идут прямолинейно, причем максимумы температур по естественной площадке несколько запаздывают по сравнению с оголенной площадкой, но это запоздание совсем незначительно по сравнению с запозданием минимумов. Здесь мы опять имеем указание на преобладание теплоизолирующего действия снега над действием травяного покрова. На глубине 2,5 *м* максимумы на обеих площадках наступают почти одновременно. Кстати, необходимо упомянуть, что, несмотря на разницу амплитуд и вообще всего термического режима деятельного слоя обеих площадок, обе они оттаи-

вают на одну и ту же глубину, равную 2,5 *м*. На глубине 3,2 *м* на обеих площадках максимумы иногда заходят в следующий год и приходятся (например, в 1929, 1932 и 1935 гг.) на январь следующего года. Максимумы на глубине 5 *м* на естественной площадке сомнительны на тех же основаниях, что и минимумы, и поэтому нанесены условно. На естественной площадке максимумы распространяются в глубину с той же скоростью, как и минимумы, а на оголенной площадке распространяются несколько медленнее, чем минимумы. С глубины 3,2 *м* максимумы на естественной площадке наступают как будто раньше, чем на оголенной; но если взять максимумы на естественной площадке за те же 4 года, то они очень сблизятся, а если взять средние декадные, то даже совпадут. Расхождение на глубине 5 *м* мало достоверно и строить на этом какие-либо заключения опасно.

Замечательно резкое увеличение запоздания максимумов на глубине 3,2 *м*. Первая мысль была связать этот скачок с переходом от талого грунта к мерзлому, но так как переход происходит на глубине около 2,5 *м*, то этот скачок должен бы произойти именно на глубине 2,5 *м*.

Кроме 1933 и 1934 гг. на глубине 2,5 *м* на естественной площадке максимумы не переходили через 0°, а на оголенной площадке они и в эти годы достигли только 0°. Известно, что теплопроводность при замерзании как воды, так и грунта увеличивается. Вероятно, этим объясняется то обстоятельство, что распространение максимумов происходит до глубины 2,5 *м* медленнее, чем с глубины 3,2 *м*.

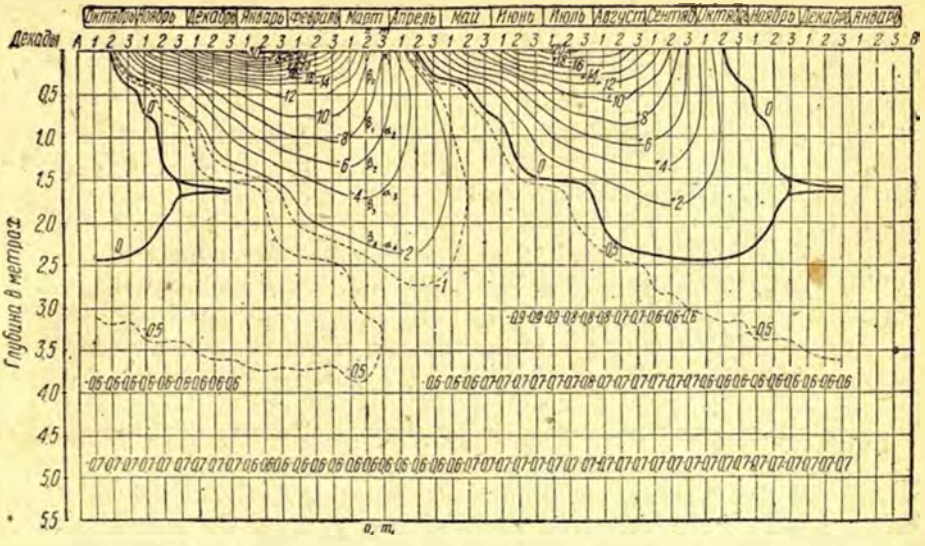
§ 13. Сроки замерзания и оттаивания грунтов на разных глубинах

О сроках замерзания и оттаивания грунтов наиболее ясное представление можно получить из рассмотрения термоизоплет, представленных на фиг. 27 и 28. Представленные на этих фигурах термоизоплеты, которые в последующем для краткости будем называть просто изоплетами, построены следующим образом. На верхней горизонтальной линии отложены месяцы, подразделенные на декады. Через точки, определяющие декады, проведены вертикальные линии. От горизонтальных линий *AB* и *AB*, соответствующих дневной поверхности естественной и оголенной площадок, идет вниз счет глубин.

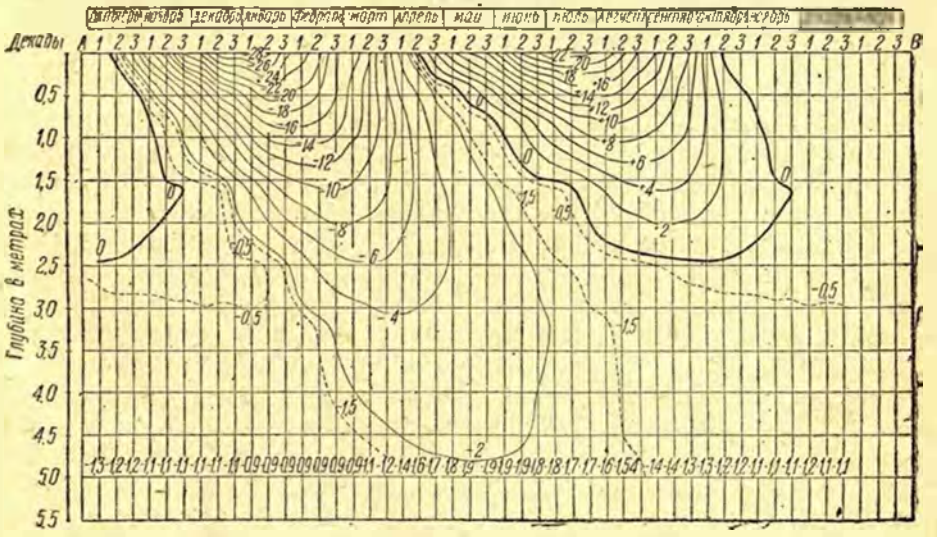
На фиг. 27 и 28 через каждые 0,5 *м* по глубине проведены горизонтальные линии. На вертикальных линиях на тех глубинах, на которых велись наблюдения (0,4; 0,8; 1,6 *м*), отмечают наблюдавшиеся в данную декаду температуры. Затем между двумя последовательными по глубине точками, где наблюдались температуры, путем линейной интерполяции определяют положение точек, в которых температуры равняются целому числу градусов. Если теперь точки с равными температурами соединить плавными кривыми, то и получатся термоизоплеты.

На фиг. 27 на вертикали mm_1, соответствующей третьей декаде марта, мы имеем определенные описанным способом точки a_1, a_2,

α_3 и α_4, в которых средние декадные температуры равнялись соответственно —8°, —6°, —4° и —2°. На соседней вертикали nn_1 имеем аналогичные точки β_0, β_1, β_2, β_3 и β_4 с температурами —10°, —8°,



Ф г. 27. Термоизоплеты на естественной площадке Сковородинской НИМС



Фиг. 28. Термоизоплеты на оголенной площадке Сковородинской НИМС

—6°, —4° и —2°. Таким образом, в данном случае на вертикалях отмечены такие точки, температура в которых (если брать две соседние по глубине) разнится на 2° и изоплеты проведены через 2°.

Линия изоплеты, соответствующей нулевой температуре, дана на чертеже более толстой. Пунктиром проведены вспомогательные изоплеты, соответствующие —1° и —0,5°. Ниже на вертикалях в соответствующих точках отмечены лишь имевшие место температуры, из рассмотрения которых видно, что в нижней области при имеющейся точности измерения температур никаких изоплет провести нельзя.

Здесь же следует отметить, что для построения изоплет, данных на фиг. 27 и 28, взяты не просто средние декадные за какой-нибудь год, а средние из среднедекадных за несколько лет. Для построения изоплет для естественной площадки использованы данные за 8 лет, для оголенной площадки — за 4 года.

Вернемся теперь к срокам замерзания и оттаивания грунтов; имея изоплеты, в этом нетрудно ориентироваться. Рассматривая приведенную на фиг. 27 кривую нулевой изоплеты, мы видим, что с наступлением тепла нулевая температура на дневной поверхности появляется во второй декаде апреля, что, постепенно опускаясь, она достигает максимальной глубины около 2,5 *м* примерно в первой-второй декаде октября и что глубже нулевая температура не распространяется. Нетрудно видеть также, что во второй декаде октября нулевая температура опять появляется на дневной поверхности вследствие наступления холода и постепенно, по мере промерзания деятельного слоя, спускается вглубь, а в это же самое время нулевая температура поднимается с глубины около 2,5 вверх, как бы идя навстречу опускающейся нулевой температуре сверху. Далее мы видим, что в третьей декаде ноября нулевые температуры — одна опускающаяся вниз, а другая поднимающаяся вверх — сливаются, что это слияние происходит примерно на глубине 1,6 *м* и что на этой глубине нулевые температуры удерживаются до третьей декады декабря.

Если сравнить только рассмотренное движение нулевых температур на естественной площадке с движением нулевых температур на оголенной площадке (фиг. 28), то увидим, что большой разницы в ходе этих температур нет. В обоих случаях появление нулевых температур на дневной поверхности грунта, или, что то же, начало оттаивания деятельного слоя, происходит во второй декаде апреля, а при наступлении холодов—во второй декаде октября. В обоих случаях наибольшая глубина, при которой достигают эти температуры, равна приблизительно 2,5 *м*, что является мерой мощности деятельного слоя. Точно так же, когда в середине октября нулевая температура с дневной поверхности оголенной площадки спускается вниз, нулевая температура с глубины 2,5 *м* начинает подниматься вверх и встреча происходит в то же время и на той же глубине, как и на естественной площадке.

Однако в случае оголенной площадки после слияния нулевых температур на глубине 1,6 *м* сразу наступают отрицательные температуры и нулевые температуры на глубине слияния, как это имеет место в случае естественной площадки, не наблюдаются. Объяснить это явление более или менее удовлетворительно пока не удалось. По влажности и гранулометрическому составу, как это видно из графиков

фиг. 11 — 17, естественная и оголенная площадки ничем не отличаются одна от другой. Территориально они расположены очень близко (фиг. 10). Повидимому, дело в травянистом и снежном покрове естественной площадки, вследствие которого отрицательные температуры не столь интенсивно проникают в глубь грунтов естественной площадки. В самом деле, если обратим внимание на изоплеты отрицательных температур, то увидим, что температура —2° на естественной площадке не доходит до глубины 2,5 *м*, тогда как на оголенной площадке эта же температура спускается в мае до глубины 5 *м*.

Насколько значительную роль все эти данные играют в вопросах строительства, будет видно из последующего. Здесь же следует сделать одно общее замечание: все, что здесь говорится о роли травянистого покрова на естественной площадке и даже в болотце, не относится к моховому покрову, роль которого в температурном режиме покрываемых им грунтов несколько иная, на что указывали раньше многие авторы.

Летом и вообще в период существования на дневной поверхности положительных температур моховой покров, содержащий много влаги, препятствует проникновению вглубь положительных температур. Энергия инсоляции идет на испарение пропитывающей мох влаги. В период же наступления и существования отрицательных температур насыщенный водой мох замерзает, а так как лед, как увидим далее, хороший проводник тепла, то и замерзший слой мха способствует проникновению вглубь отрицательных температур. Вот почему подо мхом мы часто встречаем вечную мерзлоту на очень небольших глубинах (30 — 50 *см*) и вот почему при удалении мохового покрова вечная мерзлота быстро уходит вниз, обыкновенно до глубины ее нахождения на незаболоченных и непокрытых мхом участках в той же местности.

Между тем от удаления обыкновенного травянистого покрова верхняя граница вечной мерзлоты, как мы видим, не меняется. И изыскателям и строителям надо всегда иметь это в виду, чтобы не впасть в ряд грубейших ошибок при оценке термического режима в каком-либо месте и при определении глубины заложения фундаментов.

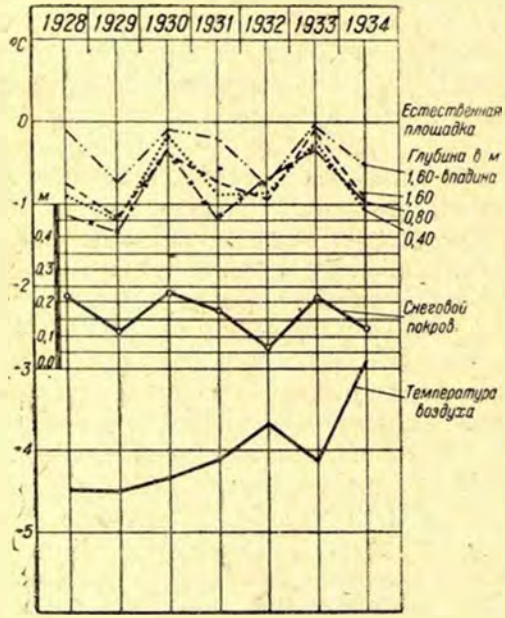
§ 14. Влияние снегового покрова на температуру грунтов

Давно известно, что снеговой покров оказывает огромное влияние на термический режим грунтов. Об этом давно писали Воейков, затем Сумгин и др.

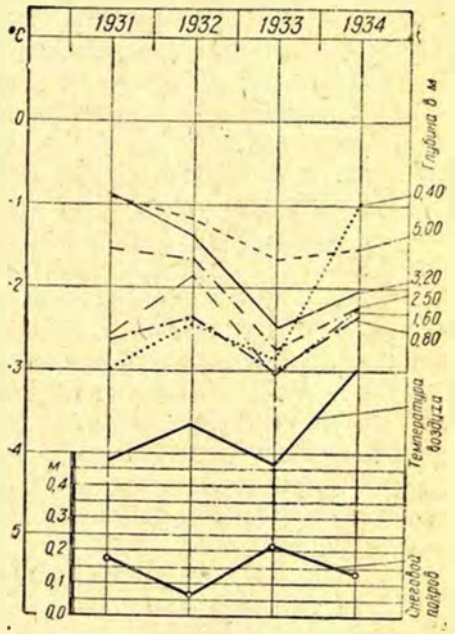
На Сковородинской станции мы имели возможность проверить эту зависимость не только качественно, но и количественно за несколько лет по двум площадкам — с естественным покровом и оголенной. Некоторое затруднение представляло количественное определение средней годовой мощности снегового покрова. Его можно определять по-разному, были испробованы и разные способы. Особенное затруднение представляла хронологическая локализация

Снег выпадает в Сковородине обычно во второй половине октября, иногда же сильно запаздывает. Держится снег до апреля и иногда, не превращаясь в жидкую фазу, испаряется непосредственно под действием солнечных лучей. Появляется пыль, и в апреле начинаются палы: горят сухая трава, пни, кустарники, редко большие деревья. В 1937 г. случилось видеть такие палы, хотя и в значительно меньших размерах, в октябре (очень сухом).

Снеговой покров держится в конце одного года и сохраняется в начале следующего года. Влияние его на температуру грунтов сказывается в различное время на разных глубинах, и эти сроки



Фиг. 29. Средние годовые температуры грунта на различных глубинах сравнительно со средней годовой температурой воздуха и толщиной снегового покрова



Фиг. 30. Средние годовые температуры грунта на оголенной площадке на различных глубинах сравнительно с годовой температурой воздуха

совершенно не совпадают с делением на годы. Поэтому после испытания различных способов и комбинаций пришлось остановиться на следующем: взять среднюю арифметическую величину мощности снегового покрова за все время его наличия (т. е. приблизительно с ноября по март включительно) и полученную величину отнести к году, к которому относятся январь—март. Другие методы дали сходные, но менее ясные результаты.

При рассмотрении графиков, изображенных на фиг. 29 и 30, напрашиваются такие выводы:

1) средние годовые температуры грунтов до глубины 5 *м* по оголенной площадке следуют за средними годовыми температурами воздуха;

2) средние годовые температуры грунтов по площадке с естественным покровом не соответствуют средним годовым температурам воздуха, а зависят от мощности снегового покрова;

3) различная мощность снегового покрова сказывается на средних годовых температурах грунтов на глубине даже 5 *м* не только на оголенной площадке, но и на площадке с естественным покровом.

Плотность снега в некоторые годы определялась, но это не дало ценных результатов. Если бы снег ложился на ровную оголенную поверхность и оставался без изменения, то определение его плотности могло бы дать основание для каких-либо выводов. Но так как он ложился на травяной покров и притом неравномерно, то плотность его приобретает случайный характер.

Снеговой покров в различных участках той же местности, разумеется, достигает различной мощности. Долина р. Б. Невр, в которой расположена мерзлотная станция, с севера и с юга окружена цепью холмов, или сопок, как их там называют, причем северная цепь выше и достигает 160 *м* над уровнем реки, текущей непосредственно под нею. В 1930 и 1931 гг. было сделано несколько измерений мощности снегового покрова на этих сопках. Измерения производились на обеих цепях на вершинах сопок, на середине их и у подошвы. Буквой Ю обозначается вершина южной цепи, буквой С — вершина северной цепи. Буквой S обозначается южный склон северной цепи, имеющий южную экспозицию. Буквой N обозначается северный склон южной цепи, имеющий северную экспозицию. Таким образом, оба склона взаимно противоположны и обращены внутрь долины, имеющей ширину 2 — 3 *км*. Сама долина ориентирована приблизительно на восток — запад.

Таблица 7

Мощность снегового покрова у сопок близ ст. Сковородино

Дата	Местоположение	Мощность в *см*	Дата	Местоположение	Мощность в *см*	Дата	Местоположение	Мощность в *см*
10/III 1930 г.	Склон S .	35	20/III 1930 г.	У подошвы S	20	11/IV 1931 г.	На середине N . .	28
14/III 1930 г.	Вершина Ю	35	То же	» N	28	То же	У подошвы S	10
То же	» С	40	29/III	Вершина Ю	18	»	» N	12
»	Склон S .	17	То же	» С	33	29/IV 1931 г.	Вершина С	20
14/III 1930 г.	» N .	28	29/III	На середине S . .	4	29/IV 1931 г.	» Ю	Нет
То же	У подошвы S	30	То же	На середине N . .	26	То же	На середине N . .	18
»	» N	30	»	У подошвы S	8	»	На середине S . .	Нет
20/III 1930 г.	Вершина Ю	20	»	» N	20	»	У подошвы N .	9
	» С	40	11/IV 1931 г.	Вершина Ю	20	»	У подошвы S . .	Нет
	На середине S . .	10	То же	» С	42	5/V	Снег исчез повсюду	
	На середине N . .	36		На середине S кое-где				

Из данных, приведенных в табл. 7, видно, что на вершинах сопок снеговой покров достигает большей мощности, нежели на склонах и у подошвы в долине. Возможно, что здесь влияют ветры северных румбов, преобладающие зимой в районе Сковородина, несущие снег, который задерживается древесной и кустарниковой растительностью. Кроме того, очень ясно видно влияние экспозиции на мощность снегового покрова, особенно при таянии снега. На склонах с южной экспозицией снеговой покров тоньше и быстрее исчезает. К сожалению, совершенно отсутствуют термометрические наблюдения в скалистых грунтах сопок, и даже нет уверенности, что там имеется сколько-нибудь глубокая вечная мерзлота.

§ 15. Температура грунтов под дном водоемов

Термический режим грунтов сильно изменяется при наличии воды. Интересны результаты измерения температуры грунтов под дном некоторых водоемов, а именно маленького опытного прудика круглой формы на территории Сковородинской станции и под дном больших

Фиг. 31. Последовательное оттаивание грунта под опытным прудиком Сковородинской НИМС с 4 июля по 1 августа 1935 г.

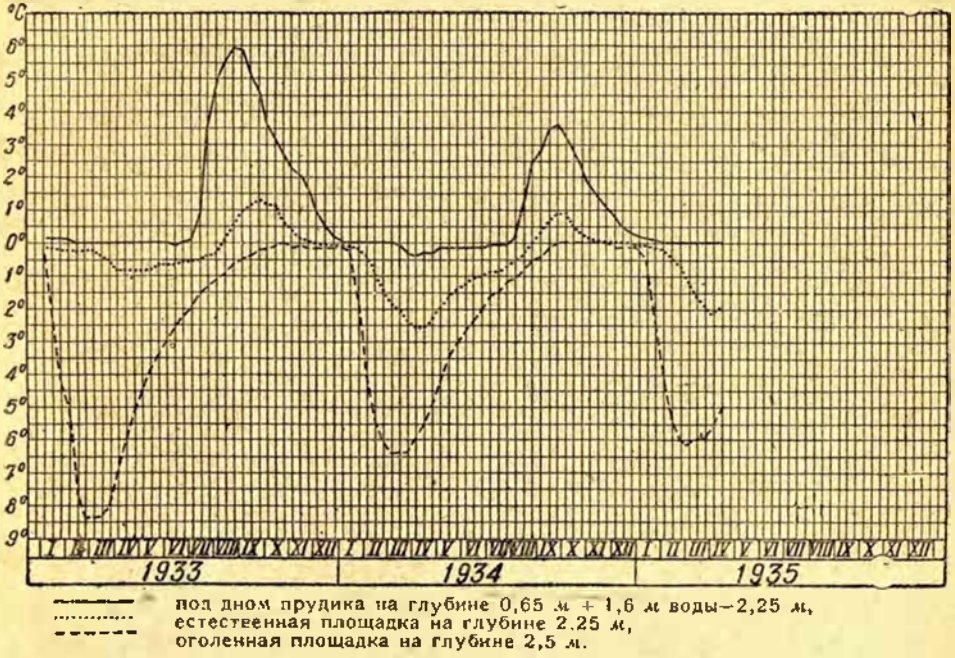
водоемов у плотин близ ст. Сковородино и ст. Магдагачи. В опытном прудике вода стоячая; наибольшая глубина меняется от 1,3 до 1,8 *м* в зависимости от времени года и дождей. Термометры в железных обсадных трубках были заложены на глубину 0,65; 0,90; 1,60 и 2,25 *м*. Необходимо сказать, что эти глубины далеко не всегда соответствовали действительности, так как трубки сильно выпучивало. Все же результаты получились интересные. Обычно прудик промерзает до дна.

На фиг. 31 дан разрез этого прудика. Ломаные линии ab, a_1b_1 и a_2b_2 дают последовательные границы протаивания грунта под дном этого прудика на 9 июня, 4 июля и 1 августа 1935 г., как они были установлены прощупыванием и бурением, произведенными В. С. Григорьевым. Разрез прудика дан в направлении север — юг.

Даже под небольшой лужей замерзание грунтов значительно задерживается, что выяснилось при многочисленных бурениях и прощупываниях хода замерзания грунтов в 1934 и 1935 гг. Под дном

опытного водоема в 1933 г. на глубине 0,65 *м* температура держалась на 0° в течение первых 6 месяцев; в августе она достигла на той же глубине величины +5,2° (в третьей декаде августа +5,9°), как это и видно из фиг. 32. На глубине 1,6 *м* (считая от дна водоема) до последней декады июля она держалась на —0,1°, потом стала повышаться и в последней декаде сентября дошла до +1,2°, что нетрудно видеть на фиг. 33, фиксирующей ход температур в разных условиях.

На глубине 2,25 *м* в первой части 1933 г. температура грунта была отрицательной (не ниже —0,4°), но с сентября по декабрь включи-



Фиг. 32. Сравнительный график температур грунта на одной глубине в различных условиях Сковородинской НИМС

тельно она держалась на 0°. В зимы 1934/35 и 1935/36 гг. прудик не промерз до дна, и в нем сохранилось даже небольшое количество воды у дна. Это объясняется, вероятно, тем, что в эти зимы на поверхность льда прудика намело много снега да и температура воздуха была в эти годы несколько выше нормальной. За 1933 г. мы имеем следующие средние годовые температуры грунтов под дном прудика:

Глубина	Температура
0,65 *м*	+ 1,5°
1,60 »	+ 0,2°
2,25 »	— 0,2°

Ни на оголенной площадке, ни на площадке с естественным покровом средних годовых положительных температур не наблюдалось

кроме одного случая в 1933 г., когда только на глубине 2 *м* на естественной площадке средняя годовая температура оказалась +0,1°.

В двух водоемах, искусственно созданных у плотин, мы имеем несколько другие условия, главным образом потому, что там вода была не вполне стоячая, но и не вполне проточная. Кроме того, глубина этих водоемов была значительно больше глубины прудика. Обе плотины пропускали воду в разные годы и в разные месяцы различно, но все же вода двигалась частью через водослив при переполнении водоема, частью сквозь тело плотины (ст. Сковородино) или под ней (ст. Магдагачи). Сковородинский водоем глубже Магда-

Фиг. 33. Сравнительный график температур грунта на глубине 3,2 *м* в различных условиях Сковородинской НИМС

гачинского, и его глубина достигала (в настоящее время условия его изменились) 6 *м* у плотины; глубина же Магдагачинского водоема не превышала 4 *м*.

28 февраля 1935 г. были сделаны измерения температуры льда на различных уровнях в водоеме Сковородинской плотины. На глубине 8 *см* под снегом и на поверхности льда температура в 14 и 16 час. была —5,5° и —6,2°. Температура льда измерялась в горизонтальных штреках, сделанных из шнура, толстым буравом. Чем глубже, тем более мягким оказывался лед при сверлении и в нижних штреках бур входил в него совершенно легко. Мощность льда была 1,20 *м*; сделать штрек глубже 1 *м* не удалось, так как в него просачивалась вода. Температура во льду оказалась следующей:

На глубине	10 *см*	. . . . .	—7,3°
» »	20 »	. . . . .	—7,3°
» »	35 »	. . . . .	—6,7°
» »	50 »	. . . . .	—5,8°
» »	75 »	. . . . .	—4,8°
» »	95 »	. . . . .	—3,7°

Температура воды у дна на глубине 3 *м* равнялась +1,5°. Измерения температуры воды в этом же водоеме, произведенные 25 января 1935 г., дали следующие цифры:

На глубине 1 *м*	+0,4°
» » 2 »	+0,1°
» » 3 »	+1,8°
» » 4 »	+1,8°
» » 5 »	+1,8°

При наличии значительной фильтрации воды сквозь плотину ядро ее (из привозной глины) не замерзает и остается, можно сказать, в полужидком состоянии. Так было со Сковородинской плотиной, зимнее промерзание которой достигало всего 2 — 2,5 *м* от поверхности, а под дном водоема и внутри тела плотины отрицательных температур не наблюдалось. При этом характерно, что фильтрующиеся сквозь плотину воды водоема несколько нагревались во время этой фильтрации. Измерения температуры воды производились непосредственно подо льдом, у дна водоема и в водосборном колодце у сухого откоса, где собирались фильтрационные воды.

Таблица 8

Дата	Температура воды у поверхности водоема в °С	Температура воды у дна водоема в °С	Температура воды у дна колодца в °С
16/XI 1934 г.	+0,5	+3,0	—
20/XI 1934 г.	+0,2	+2,4	—
20/XII 1934 г.	0,0	+2,4	+2,8
1/I 1935 г.	0,0	+2,2	+2,8
10/I 1935 г.	0,0	+2,2	+2,2
20/I 1935 г.	0,0	+1,8	+2,0
1/II 1935 г.	0,0	+1,6	+2,0
10/II 1935 г.	0,0	+1,6	+1,8
20/II 1935 г.	0,0	+1,5	+1,6
1/III 1935 г.	0,0	+1,5	+1,6
10/III 1935 г.	+0,2	+1,4	—
20/III 1935 г	+0,3	+1,4	+1,5
1/IV 1935 г.	+0,4	+1,4	+1,6

В Магдагачинском водоеме это явление было еще резче. Сковородинская плотина не имела бетонной диафрагмы, делалась летом (в 1932 г.) и поэтому в теле ее консервировалось тепло. В еще большей степени это относится к Магдагачинской плотине, которая сооружалась тоже летом (1932 г.). Там фильтрационные воды проложили себе путь под диафрагмой. В 1933 — 1934 гг. были произведены измерения температуры воды у дна водоема и воды, профильтровавшейся у четырех секций плотины.

При подсчете средних месячных температур получились результаты, приведенные в табл. 9.

Таблица 9

Месяц и год	Температура воды у дна водоема в °С	Температура воды, профильтр. у секции № 13, в °С	Температура воды, профильтр. у секции № 19, в °С	Температура воды, профильтр. у секции № 23, в °С	Температура воды, профильтр. у секции № 24, в °С
Сентябрь 1933 г.	+12,9	+15,3	+16,4	+16,6	+12,1
Октябрь 1933 г.	+ 4,5	+11,6	+ 9,2	+10,4	+10,0
Ноябрь 1933 г.	+ 4,0	+ 4,6	+ 4,1	—	+ 4,2
Декабрь 1933 г.	+ 3,2	+ 3,6	+ 3,7	—	+ 3,6
Январь 1934 г.	+ 1,1	—	—	+ 3,1	+ 3,1

Следствием такой фильтрации является изменение всего термического режима не только самой плотины, но и долины, расположенной ниже плотины. Вечная мерзлота в ней опускается, образуются постоянные талики больших размеров, которые и были обнаружены бурением как в Сковородине, так и в Магдагачах.

Под дном водоемов за плотиной наблюдались значительное повышение температуры грунтов и отступание границы вечной мерзлоты вглубь. Так как фильтрация в Магдагачинской плотине началась очень скоро после ее постройки, а в следующем году достигла размеров 1 340 $м^3$ в сутки (измерения производились с 10 по 20 октября 1933 г.), то теплую воду из водоема засасывало под диафрагму плотины, что создало своеобразный температурный режим под дном водоема, как это видно из табл. 10. Измерения производились в обсадных трубках, находящихся в водоеме на расстоянии 23 *м* от оси плотины.

Таблица 10

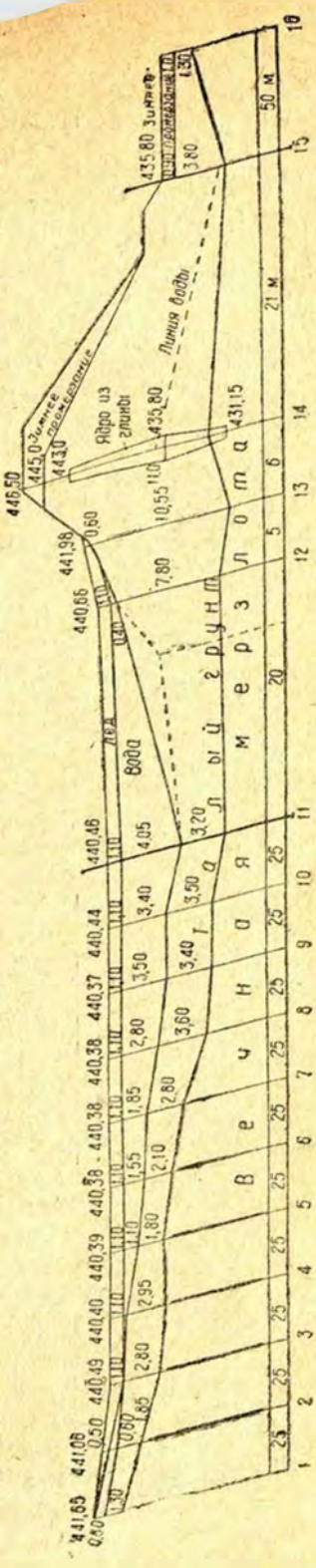
Месяц и год	Глубина водоема в м	Температура воды на поверхности водоема в °С	Температура воды у дна водоема в °С	Температура грунта на глубине 0,8 м под дном водоема в °С	То же, на глубине 1,6 м в °С	То же, на глубине 3,2 м в °С	То же, на глубине 5,0 м в °С
Июль 1933 г.	3,07	+20,9	+19,3	+14,0	+ 7,0	+ 2,0	+ 0,1
Август 1933 г.	3,60	+20,9	+17,3	+13,4	+10,0	+ 6,5	+ 3,5
Сентябрь 1933 г.	3,87	+13,6	+12,9	—	+12,3	+10,9	+10,6

В третью декаду сентября температура грунта на глубине 3,2 *м* достигла +11,8°, а на глубине 5 *м* +12°. Это парадоксальное явление можно объяснить только тем, что благодаря щебенисто-песчаному

грунту теплая вода при фильтрации проникала на значительную глубину и, находясь в непрерывном движении, отогревала грунты и отгоняла вечную мерзлоту далеко вглубь. При позднейшем бурении (в 1936 г.) мерзлота уже совсем не обнаруживалась.

В ложе водоема у Сковородинской плотины подобных явлений не наблюдалось, так как там преобладают пылеватые грунты, обладающие ничтожной фильтрационной способностью, а также и то, что в теле плотины не было бетонной диафрагмы. Но все же под дном всего водоема у Сковородинской плотины всегда сохранялся талик мощностью 2 — 3,5 *м* (фиг. 34).

Под дном крупных и глубоких рек, повидимому, имеются талики, но сведений об этом очень мало. Более мелкие реки промерзают до дна; промерзает и их дно, особенно на мелких местах и на перекатах. Поэтому такие реки к концу зимы распадаются на систему отдельных небольших водоемов (бочагов), где в более глубоких впадинах сохраняется незамерзающая вода, которая при этом обычно портится. Пробные откачки на р. Тында, М. Ольдой и др. показали, что прямого сообщения между этими водоемами нет. Однако бурение поперек тальвега некоторых рек показало, что после промерзания как рек, так и их дна все же сохраняется подземное, хотя и слабое, течение. Русло его может не совпадать с современным руслом реки и отходить в сторону. При бурении поперек тальвега р. Б. Невер в марте — апреле 1935 г., когда не только река, но и дно ее были в мерзлом состоянии, был обнаружен под слоем зимнего промерзания обширный талик шириной до 100 *м* и мощностью до 3 *м*, причем в нем оказалось два водоносных горизонта, переслоенных глинистым грунтом. Талик отходил на 80 *м* к югу от русла реки и находился под левым берегом реки. Подобные же случаи описаны А. В. Львовым. Возможно, что мы имеем здесь дело с древним руслом реки, сохранившим в известной степени подземное течение воды, но это могут ре-



Фиг. 34. Профиль водоема у Сковородинской плотины (положение на 19 — 23 февраля 1935 г.)

шить только серьезные геоморфологические изыскания, которые пока еще не производились.

Из сказанного следует, что текущая вода отогревает вечную мерзлоту, значительно понижая верхний ее горизонт. Однако иногда на берегу большой реки, например у Бодайбо (Витим), у самой воды случалось обнаруживать вечную мерзлоту, из-за которой пришлось бросить пробивку колодца, так как не действовало заземление и т. п.

§ 16. Теплопроводность и теплоемкость грунтов

Теплопроводность и теплоемкость грунтов и материалов в условиях вечной мерзлоты, к сожалению, до сих пор еще мало изучены, и если бы строитель в своем стремлении к предвычислению температур по законам теплотехники на известной глубине обратился к имеющимся в литературе данным о теплопроводности, то был бы в большом затруднении, на какой из приводимых там цифр остановиться, а многих данных вовсе не нашел бы. Уже давно, еще Миддендорфом, было замечено, что песчаные грунты являются более теплопроводными, чем глинистые, и летом наиболее протаивают. Этот же факт констатируют и последующие наблюдатели и авторы. «Повидимому, наиболее теплопроводными и потому наиболее прогреваемыми и протаивающими являются грунты каменистые, потом песчаные и, наконец, глинистые», — говорит Городков (8, стр. 27). Однако такое утверждение без характеристики грунта с точки зрения влажности и гранулометрического состава мало ценно. Из рассмотрения данных (строки 47—70), приведенных ниже в табл. 11, вытекает, что теплопроводность грунтов находится в зависимости от их рода, гранулометрического состава, влажности и колеблется от 0,05 до 2,9. Если же к грунтам отнести и массивные горные породы, например гранит и кварц, то пределы колебаний теплопроводности еще более увеличатся.

Номера строк 42 — 45 приведенной ниже табл. 11 с достаточной убедительностью показывают, как сильно влияет гранулометрический состав на теплопроводность вещества. Неменьшее влияние на теплопроводность оказывает и влага, что видно из таблицы и что неоднократно констатировалось многочисленными авторами (35, стр. 222). Так, песок речной (строка 52 в таблице) влажностью в 3% по весу имеет теплопроводность 0,05, тогда как уже при 6% содержания влаги (строка 51 в таблице) теплопроводность возрастает до 0,97 — 0,99. Кроме того, некоторые данные указывают, что теплопроводность растет не только с увеличением влажности, но и при переходе влаги из жидкого состояния в твердое (в лед).

Чтобы несколько объяснить эту зависимость теплопроводности от влажности, указывают на то, что при увлажнении сухого грунта малотеплопроводный воздух, находящийся в порах грунта, теплопроводность которого приблизительно равна 0,02, заменяется частично и полностью водой, имеющей теплопроводность приблизительно 0,50, т. е. в 25 раз больше, чем воздух.

При замерзании вода превращается в лед, теплопроводность которого оценивается разными авторами в пределах 1,5—2,00 (таблица,

строки 38 — 32), чем объясняется увеличение теплопроводности при замерзании.

При внимательном рассмотрении изоплет, например, оголенной площадки (фиг. 28) видно следующее: для того чтобы нулевая температура при оттаивании ушла от поверхности земли на глубину 1,6 *м*, требуется около 3 месяцев, а для аналогичного опускания нулевой температуры на ту же глубину при зимнем замерзании требуется около 1 месяца.

При весеннем оттаивании тепло должно проходить к мерзлому грунту через вышележащие талые слои, при зимнем же промерзании тепло уходит от талых, более теплых слоев через мерзлые, более теплопроводные слои. На это явление, подтверждающее большую теплопроводность мерзлых грунтов в естественных условиях, впервые обратил внимание, повидимому, Белокрылов.

Приведенные выше факты о влиянии влажности на теплопроводность находятся как бы в противоречии с утверждениями Миддендорфа и академика Прасолова, цитируемыми Сумгиным (1, стр. 17 и 18).

Дальнейший анализ данных таблицы теплопроводностей указывает на то, что теплопроводность смеси не подчиняется правилу смешения, на что по данным Хвольсона указывал еще Lees (1900 г.).

Там же (39, стр. 327) мы находим указание, что Максвелл дал выражение для удельного электрического сопротивления K неоднородной среды, состоящей из вещества с удельным сопротивлением K_2, в котором расположено весьма большое число весьма малых шаров, имеющих удельное сопротивление K_1, а именно:

$$K = \frac{2K_1 + K_2 + p(K_1 - K_2)}{2K_1 + K_2 - 2p(K_1 - K_2)} K_2,$$

где p — отношение объема шаров к общему объему.

Совершенно аналогичная формула, как добавляет Хвольсон, должна существовать также и для теплопроводности, если вместо K, K_1 и K_2 подставить обратные теплопроводностям величины, причем он ссылается на весьма удачные в этом направлении опыты Мейтнера в 1906 г.

Поскольку грунты вечной мерзлоты и деятельного слоя над ней в очень большом числе случаев представляют, по терминологии проф. Герсеванова, грунтовую массу (т. е. такой грунт, где все поры заполнены водой, а в случае мерзлоты — льдом), есть основание думать, что максвелловская формула будет для них применима, и дело лаборатории — проверить это и дать соответствующие таблицы, которые, конечно, должны быть потом проверены в условиях реальных грунтов в районах вечной мерзлоты. До тех пор, пока этого нет, пользование данными приводимой таблицы в практических целях строительства на мерзлоте является весьма затруднительным. Выше мы видели, например, что весьма многие авторы относят песчаные грунты к более теплопроводным, чем глинистые, а в нашей таблице (строка 53) мы находим, что, по данным Фокина, и растительный грунт, и песок, и суглинок, и гравий под открытым небом при объемном весе 1 900 *кг/м*^{3} имеют одинаковую теплопроводность, равную 2, и те же грунты под

зданиями, очевидно более сухие, имеют опять-таки одинаковую теплопроводность, равную 1.

Неудовлетворительность наших знаний о теплопроводности грунтов отмечает и Глинка (36).

Не лучше обстоит дело с теплоемкостью грунтов. В литературе (например, у Фокина) для всех грунтов мы находим одну и ту же теплоемкость (40, стр. 200), равную 0,2 для песка под открытым небом и для сухого песка в засыпке перекрытий, совершенно независимо от влажности. У Кравкова же для весовой теплоемкости различных почв находим лишь пределы между 0,2 и 0,27, без указания на то, от чего зависят такие колебания.

Что же касается теплоемкости и теплопроводности бетона, бута; дерева, кирпичной кладки и пр. в условиях их нахождения в мерзлоте или в деятельном слое, то данных по этому вопросу не имеется.

Если применить формулу Максвелла для песка, насыщенного водой и льдом, то, приняв теплопроводности песка, воды и льда соответственно равными 7,63; 0,5; 2,0, получим при разном содержании пустот следующие данные:

Процентное содержание пустот	Теплопроводность насыщенного водой песка	
	в талом состоянии	в мерзлом состоянии
45	1,77	4,18
50	1,56	3,92
55	1,39	3,37

Насколько эти цифры соответствуют действительности, можно сказать после проверки их в лаборатории.

Опытные данные, которые помещены в прилагаемой таблице, дают повод предполагать, что формула Максвелла не применима, например, для комплекса сухого грунта, где роль вещества, в котором размещены зерна грунта, играет воздух, содержащий к тому же некоторое количество паров воды. В самом деле, рассматривая данные таблицы (строки 43, 44, 45), мы видим, какую огромную роль играет тонкость помола.

Если начать применять приведенную выше формулу, то в ней при применении к этим порошкам графита будет меняться лишь величина p, зависящая от количества воздуха в этих порошках, и вряд ли это количество будет меняться так, чтобы мы могли получить теплоемкости, приведенные в таблице.

Точно так же вряд ли из теплопроводности вещества песка и воздуха и реального количества пустот, наполненных воздухом, мы получим теплопроводность песка, данную по № 50.

Приводимая таблица иллюстрирует в достаточной мере крайнюю ограниченность наших знаний о теплопроводности вообще и почти полное неведение относительно теплопроводности и теплоемкости грунтов и различных веществ в мерзлом состоянии, тем более в условиях вечной мерзлоты.

№ по пор.	Наименование материалов
1	Бетон из портландского цемента, песка и гальки состава 1:2:2 . . . . .
2	Бетон . . . . .
3	Бетон (раствор 1:5) . . . . .
4	Бетон . . . . .
5	Бетон (раствор 1:12) . . . . .
6	Бетон трамбованный (цемент, песок, каменный щебень) . . . . .
7	Бетон литой или с кирпичным щебнем . . . .
8	Бетон шлаковый из 9 объемных частей пористого шлака и 1 части бетона . . . . .
9	Железобетон набивной . . . . .
10	Кирпичная стена из обожженного кирпича, оштукатуренная с двух сторон, общей толщиной 28 *см* (1 кирпич), тотчас после окончания кладки . . . . .
11	То же после 4,5 месяцев воздушной сушки .
12	» » » 6,5 » » » .
13	» » » 9 » » » .
14	» » » 12,5 » » » .
15	Кладка кирпичная свежая . . . . .
16	» » сухая . . . . .
17	Кладка кирпичная очень старая . . . . .
18	Бутовая кладка . . . . .

Таблица 11

Объемный вес материалов в *кг/м*³	Влажность в % от объема	Средняя температура в °С	Коэфициент теплопроводности в *кал/м°*	Авторы, у которых помещены эти данные *
2 180	Сухой (сушился 0,5—2 года)	20—30	0,65—0,66	М, Г, Т
1 600	Сухой	0	0,72	М, Т
1 900	8,6	0	1,17	М, Т
2 270	10,2	0	1,10	М
2 200	Сушился 2 недели	20—40	0,76	Г
2 000	Нормальная	0	1,10	Ф **
1 900	»	0	1,00	Ф **
550	—	20—90	0,19	М, Т, Г***
2 200	Нормальная	0	1,33	Ф
1 961	25	10	1,20	М, Ф, Т
1 763	3,4	10	0,84	М, Ф, Т
1 748	1,9	10	0,71	М, Ф, Т
1 737	1,0	10	0,61	М, Ф, Т
1 715	0,5	10	0,60	М, Ф, Т
1 570—1 630 1 420—1 460	—	20—40	0,82—0,45	Г
1 850	—	20—40	0,35	Г
—	—	20—40	1,3—2,1	Г, Н

№ по пор.	Наименование материалов
19	Бутовая кладка из пород объемным весом 1 600 *кг/м*³ и выше . . . . .
20	То же, из легких пород . . . . .
	Правильная кладка на обычных смешанных растворах
21	Кладка из наиболее плотных пород (гранит, базальт, мрамор и т. д.) . . . . .
22	То же, из пород средней плотности (известняк, песчаник и т. п.) . . . . .
23	Кладка из легких пород . . . . .
24	То же . . . . .
25	Вода . . . . .
26	» . . . . .
27	» . . . . .
28	Лед . . . . .
29	» . . . . .
30	» . . . . .
31	» . . . . .
32	» . . . . .
33	Воздух . . . . .
34	» . . . . .
35	Войлок из темносерой шерсти . . . . .
36	Войлок из обыкновенной шерсти . . . . .
37	Войлок, пропитанный асфальтом . . . . .
38	Войлок асфальтированный . . . . .

(Продолжение)

Объемный вес материалов в *кг/м*³	Влажность в % от объема	Средняя температура в °С	Коэфициент теплопроводности в *кал/м*³	Авторы, у которых помещены эти данные *
1 200	—	0	0,71	Ф
1 000	—	0	0,60	Ф
2 500	—	0	2,5	Ф
2 200	—	0	1,2	Ф
1 600	—	0	0,71	Ф
1 200	—	0	0,60	Ф
1 000	—	78—72,4	0,465—0,580	М, Т
1 000	—	20—40	0,52	Г
1 000	—	0	0,50	Ф, Н
—	—	—	2,05	М
880—920	—	20—40	1,90	Г ****
900	—	0	2,00	Ф
—	—	—	1,50	Н
917	—	—	1,80—1,86	Б, Х, К
—	—	0,20	0,020—0,022	М, Г, Т
—	—	100	0,026	М, Г, Т
150	—	40—70	0,056—0,063	М, Т
300	—	0	0,04	Ф
880	—	30	0,086	М, Т
880	—	0	1,05	Ф

№ по пор.	Наименование материалов
39	Гранит . . . . .
40	» . . . . .
41	Графит твердый . . . . .
42	» » . . . . .
43	Графитовый порошок, пропущенный через сито в 20—40 ячеек на 1″ . . . . .
44	То же, через сито в 40 ячеек на 1″ . . . . .
45	» » » » 100 » » 1″ . . . . .
46	Галька, промытая водой, величина кусков 3—8 *см* . . . . .
47	Грунт естественный поросший, суглинистый, мелкий песок (влажность 14% по весу) . .
48	Мелкий глинистый песок . . . . .
49	Почва из Мюнхена (суглинок с галькой) . .
50	Песок речной мелкий . . . . .
51	» » . . . . .
52	» мелкий кварцевый . . . . .
53	Растительный грунт, песок, суглинок, гравий и др. под открытым небом . . . . .
54	То же, под зданиями . . . . .
55	Засыпка в перекрытиях из сухого песка . . .
56	Земля сухая . . . . .
57	» сырая . . . . .
58	» с грубой галькой . . . . .
59	Песчаник естественный сырой, только что обработанный . . . . .
60	То же, после 6 месяцев воздушной сушки . .

(Продолжение)

Объемный вес материала в *кг/м*³	Влажность в % от объема	Средняя температура в °С	Коэфициент теплопроводности в *кал/м°*	Авторы, у которых помещены эти данные *
—	—	—	3,00	М, Т
2 510—3 050	—	20—40	2,7—3,5	Г
1 580	—	50	38,0	М, Т *****
1 900—2 300	—	20—40	4,2	Г
700	—	20	1,025	М, Т
420	—	40	0,332	М, Т
480	—	40	0,158	М, Т
1 850	0	0—20	0,29—0,32	М, Т
2 020	28,3	0	2,0	М, Т
2 020	14% по весу	20—40	2,0	Г
2 040	—	20—40	0,45	Г
1 520	0	0,20	0,26—0,28	М, Г
1 640	6,3% по весу	20—50	0,97—0,99	М, Г
—	3% по весу	20—40	0,05	Г
1 900	—	0	2,0	Ф
1 800	—	0	1,0	Ф
1 600	—	0	0,75	Ф
—	—	—	0,12	М, Т
—	—	—	0,576	М, Т
2 040	—	0—70	0,43—0,50	М, Т
2 259	Нормальная	10—40	1,33—1,53	М, Т, Г
2 251	—	10—30	1,08—1,14	М, Г, Т

№ по пор.	Наименование материалов
61	Известняк . . . . .
62	» . . . . .
63	Известняк мелкозернистый . . . . .
64	» крупнозернистый . . . . .
65	Кварц ∥ оси ****** . . . . .
66	» ⊥ оси . . . . .
67	» плавленый . . . . .
68	Дубовая пластина ⊥ слоям . . . . .
69	Дубовая пластина ∥ слоям . . . . .
70	Дуб воздушно-сухой . . . . .
71	» свежесрубленный . . . . .
72	Сосновая пластина ⊥ слоям . . . . .
73	» » ∥ слоям . . . . .
74	Сосна воздушно-сухая . . . . .
75	» свежесрубленная . . . . .
76	Сосна и ель в наружных ограждениях . . . .
77	То же, во внутренних конструкциях . . . . .
78	» вдоль волокон . . . . .
79	Опилки древесные . . . . .
80	Зола древесная . . . . .
81	Шлаки котельные и каменноугольные . . . . .
82	Шлаки доменных печей . . . . .
83	Шлаковая засыпка . . . . .
84	» » . . . . .
85	Шлак доменных печей при размере кусков 2—5 мм . . . . .

(Продолжение)

Объемный вес материалов в кг/м³	Влажность в % от объема	Средняя температура в °С	Коэфициент теплопроводности в *кал*/м³	Авторы, у которых помещены эти данные *
2 555	—	100—300	1,08—1,14	М, Т
2 000	—	0	1,00	Ф
1 662	—	20—40	0,58	Г
1 987	—	20—40	0,80	Н
—	—	0	11,52	Д
—	—	0	6,12	Д
—	—	100	0,12	Д
825	Сухая	0—15	0,17—0,18	М, Т
819	»	12—50	0,30—0,37	М, Т
690—1 030	—	20—40	∥ 0,31	Г
930—1 280	—	20—40	⊥ 0,18	Г
546	Сухая	0—50	0,12—0,14	М, Т, Н
551	»	20—25	0,30—0,32	М, Т, Н
310—760	—	20—40	∥ 0,31	Г
380—1 080	—	20—40	⊥ 0,14	Г
600	—	0	± 0,15	Ф
600	—	0	± 0,12	Ф
600	—	0	∥ 0,33	Ф
215—250	—	0—20	0,06—0,08	М, Т, Ф
—	—	—	0,06	М, Т
750—700	0	0—20	0,12—0,14	М, Т
785	—	0	0,14	М, Т
1 000	—	0	0,25	Ф
700	—	0	0,16	Ф
360	—	—	0,11	Ф

(Продолжение)

№ по пор.	Наименование материалов	Объемный вес матерала в *кг/м*³	Влажность в % от объема	Средняя температура в °С	Коэфициент теплопроводности в *кал/м*³	Авторы, у которых помещены эти данные *
86	Шлак доменных печей при размере кусков 30 *мм*	360	—	—	0,15	Ф
87	Торф	130	—	0—50	0,033—0,041	Т
88	Коалин	—	—	от 360	0,76	Д

* Буквы означают:
М—Мачинский, Теплотехнические основы гражданского строительства, изд. 1933 г.
Г—Гребер, Введение в теорию теплопередачи, изд. 2-е, 1933 г.
Т—Тимрот, Определение теплопроводности строительных и изоляционных материалов, изд. 1932 г.
Ф—Фокин, Строительная теплотехника ограждений частей зданий, 1933 г.
Б—Барнес, Ледотехника, изд. 1934 г.
Ф—Хвольсон, Курс физики, т. III, изд. 1915 г.
К—Комаровский, Структура и физические свойства ледяного покрова, изд. 1932 г.
Н—Хютте, изд. 1921 г.
Д—Дорфман, Таблицы физических констант, изд. 1928 г., Госиздат.

** Данные Фокина дают значения для теплопроводности материалов, соответствующие, как говорит автор, нормальной их влажности в ограждениях и температуре в 0°С, а также объемному весу, указанному в таблице.

*** Фокин для этого же шлакобетона дает $\lambda = 0{,}21$ при температуре 0°.

**** У Евдокимова-Рокотовского находим (стр. 49), что для льда при температурах —30 и —40° коэфициенты теплопроводности равны соответственно 1,30 и 1,08.

***** У Мачинского (стр. 269) и у Тимрота (стр. 87), дающих для теплопроводности графита цифру 38, очевидно, вкралась ошибка и нужно читать 3,8, что ближе к данным, приводимым Хвольсоном (стр. 329). О теплопроводности графита есть еще данные у Тимрота (стр. 114), где теплопроводность графита в зависимости от обжига дается в пределах от 2,2 до 9,35.

****** У Хвольсона для теплопроводности кварца находим (стр. 329) следующие данные: теплопроводность $\perp$ оси от 5,69 до 5,76, $\parallel$ оси от 9,46 до 10,76 и под углом 45° с осью 7,63.

ГЛАВА III

ЗАМЕРЗАНИЕ, ПУЧЕНИЕ И ОТТАИВАНИЕ ГРУНТОВ

§ 17. Замерзание воды

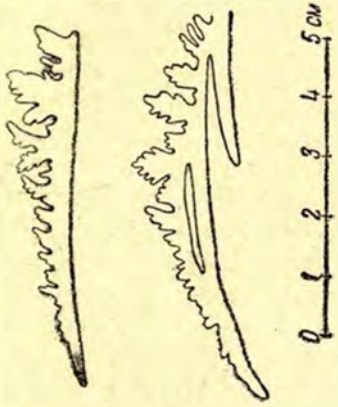
В результате различных исследований можно считать общепризнанным, что именно вода служит причиной пучения грунтов при их замерзании, хотя последние и должны для этого находиться в определенных условиях. Отсюда явствует необходимость внимательно изучить самый переход воды из жидкой фазы в твердую и различные сопутствующие явления.

Вода, как известно в результате многочисленных работ, особенно после опытов Рентгена (1892 г.), представляет собой сложное вещество, в котором одновременно присутствуют молекулы пара (H_2O), жидкой фазы воды $(H_2O)_2$ и льда $(H_2O)_3$. Количественное соотношение этих молекул меняется при разных условиях, прежде всего — при температурных. Кроме того, в научной литературе не раз указывалось, что существуют полимерные молекулы воды в различных фазах и сложного строения. Наконец, открытие «тяжелой воды» вносит еще новое осложнение в первоначальное представление о воде как об элементарном химическом соединении. Теперь природную воду приходится рассматривать как очень сложную смесь хотя и близких между собой, но все же несколько различных веществ. Поэтому такой простой на первый взгляд процесс, как замерзание чистой воды, а тем более воды в грунтах, в действительности оказывается очень сложным и далеко не выясненным до настоящего времени.

Прежде всего следует обратить внимание на неравномерность хода замерзания воды. Многочисленные лабораторные опыты, произведенные нами, показали, что при охлаждении сверху открытая поверхность воды в сосуде очень редко замерзает вся одновременно и целиком. Обычно в ледяной коре остается долго не замерзающее «окно», окруженное снизу гребнями ледяных кристаллов. Иногда через это окно вода выливалась на поверхность ледяной корки и образовывала искусственную наледь. При медленном охлаждении значительных объемов воды наблюдалось образование лентообразных зубчатых кристаллов льда ничтожной толщины, но длиной в 20 — 30 *см*, повидимому, в зависимости от размера сосуда (фиг. 35). Эти образования, названные нами «пилами», действительно похожи на продольную пилу. Одна сторона этих огромных кристаллов совершенно ровная, а другая — зазубренная, причем зубцы фигурные, иногда вроде листьев. Образование таких пил случалось наблюдать

не только в чистой воде, но и в переувлажненных пылеватых грунтах Там они были, конечно, значительно меньших размеров.

При замерзании взвесей (суспензий), а также растворов различных красящих веществ, как общее правило, наблюдается отжатие взвешенных и растворенных частиц в ту область взвеси или раствора, которая замерзает всего позже. Так, зимой у замерзшего окна Сковородинской лаборатории на подоконнике был случайно поставлен стакан с водой, на дне которого осел тонкий слой очень мелких (порядка 0,01 — 0,001 *мм*) грунтовых частиц. За ночь часть воды в стакане, которая была ближе к окну, замерзла, причем вода замерзла



Фиг. 35. Так называемые «пилы» — плоские ледяные образования, получающиеся при замораживании (в лабораторных условиях) спокойной воды и сильно переувлажненных грунтов ($^3/_4$ натуральной величины). Сковородинская НИМС, февраль 1935 г.

Фиг. 36. Взвесь (пылеватый суглинок), отжатая при замерзании в виде конуса (нижний кусок льда)

и у дна стакана, которое почти наполовину покрылось льдом. Никаких признаков бывшего на дне осадка подо льдом не оказалось. Весь осадок в этой части при замерзании был механически удален, очевидно, растущими в направлении от окна кристаллами льда в еще незамерзшую область.

Характерный пример этого дает также фотография, приведенная на фиг. 36 (нижний фрагмент): при замерзании частицы грунта образовался конус. При наблюдении в микроскоп над замерзанием тонких суспензий грунта иногда случалось видеть, как растущий кристалл льда расталкивал микроскопические частицы грунта. Однако при более крупных частицах этого уже не наблюдалось. Из этого, а также из опытов, описанных ниже, следует, что силы давления свободно растущих кристаллов льда очень невелики, даже ничтожны.

§ 18. Замерзание грунтов и пучение дневной поверхности

Процессы оттаивания и в особенности замерзания различных грунтов настолько сложны, что не только нет достаточно удовлетворительных объяснений этих процессов, но даже нет согласующихся между собой описаний. Вследствие этого в последующем изложении мы будем держаться по преимуществу наших собственных наблюдений, приводя в то же время наиболее принятые гипотезы, чтобы остановиться на тех местах этих гипотез, которые противоречат фактам, или чтобы указать те явления, которые этими гипотезами не объясняются. Это необходимо сделать, так как сомнительных утверждений и представлений в этой области очень много и эти представления часто ведут в строительстве к бесполезным, а иногда и вредным мероприятиям.

Прежде всего остановимся на самом процессе замерзания грунтов в природе и со связанными с этим замерзанием явлениями.

С наступлением заморозков (приблизительно в середине октября для Дальнего Востока и несколько раньше для дальнего Севера), когда температура воздуха начинает приобретать в среднем отрицательные значения, начинается и замерзание грунта, т. е. переход значительной части воды, пропитывающей грунт, в твердое состояние. Одновременно с этим начинается и пучение почвы, т. е. увеличение ее в объеме, сопровождающееся поднятием, что легко обнаружить при помощи нивелировки. Поднятие это, достигающее максимума в различных точках в различное время, в период с конца декабря до середины марта обыкновенно лежит в пределах, не превышающих 20 *см*, но в отдельных случаях, если верить Тэберу [1], доходит до 60% от глубины промерзания.

Ход пучения нетрудно проследить на соответствующих графиках (фиг. 95 — 100), где дано во времени пучение десяти колышков, забитых в естественный (не насыпной) грунт вокруг установки $Б_3$ на Сковородинской станции. Эти колышки длиной 50 *см* каждый забиты на глубину 40 *см* в землю в конце ноября 1934 г. На перечисленных выше чертежах пучение колышков дано пунктирными линиями. Сплошными показаны вертикальные перемещения приборов установки $Б_3$, о чем будет сказано ниже. На фиг. 37 и 38 даны графики, иллюстрирующие пучение пучиномеров на двух естественных площадках размерами 14 × 14 *м*, лежащих на расстоянии около 45 *м* одна от другой. Обе площадки расположены на ровной, слегка покатой к северу местности.

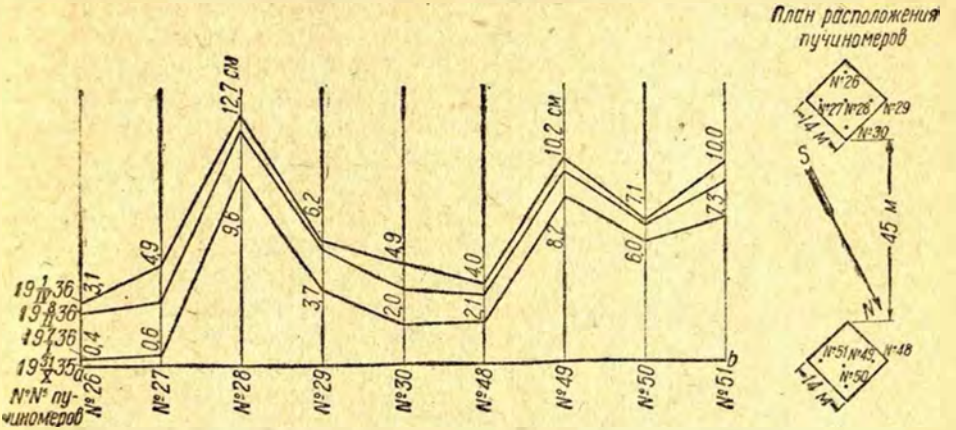
Пучиномер, о котором здесь говорится (или, точнее, простой пучиномер), устроен, как показано на фиг. 39 и 40, и представляет собой рейку длиной 2 *м* и сечением 5 × 2 *см*, врезанную внизу в деревянный крест так, что эта врубка препятствует перемещению рейки относительно креста. Глубина, на которую заглубляется крест, равна

---

[1] Тэбер, Промерзание и оттаивание грунтов как факторы разрушения дорожной одежды.

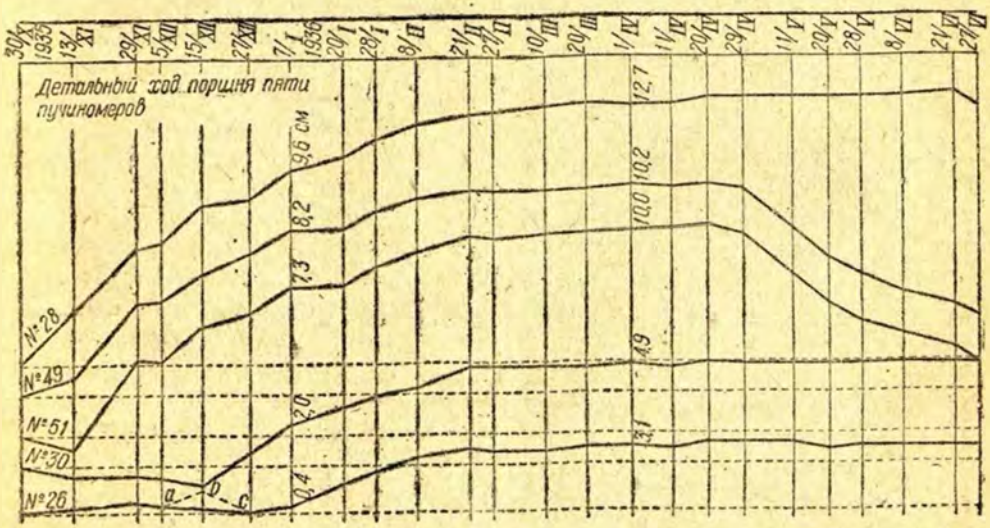
20 *см* от верхней поверхности креста. Эта глубина, как показывает опыт, достаточна для придания рейке надлежащей устойчивости.

Характеристика грунтов и их влажности на площадках, где установлены простые пучиномеры № 26, 27, 28, 29, 30, 48, 49, 50, 51



Фиг. 37. Графики пучения девяти простых пучиномеров

(фиг. 37), дана на графиках фиг. 41. Аналогичная характеристика грунтов, где забито шестнадцать колышков установки $Б_3$, дана на графиках фиг. 42 и 43. На этих чертежах мы имеем данные, характе-

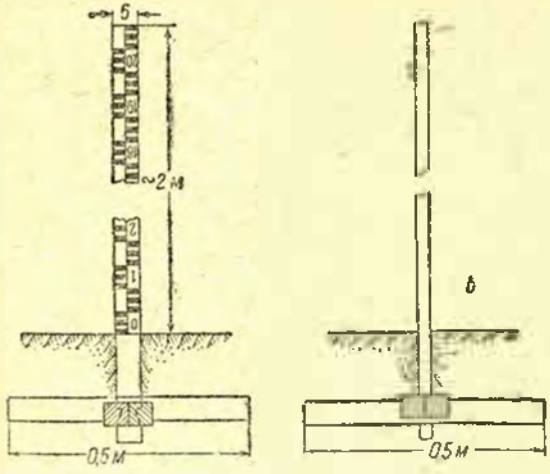


Фиг. 38. Графики (подробные) пучения пяти пучиномеров

ризующие грунты и их влажность по четырем буровым скважинам на площадке установки $Б_3$, о которой подробно будет сказано ниже. На той же площадке имеются еще четыре скважины, по которым анализа грунта мы не приводим, так как они ничего нового и суще-

ственного для характеристики грунтов места, занимаемого установкой $Б_3$, не дают.

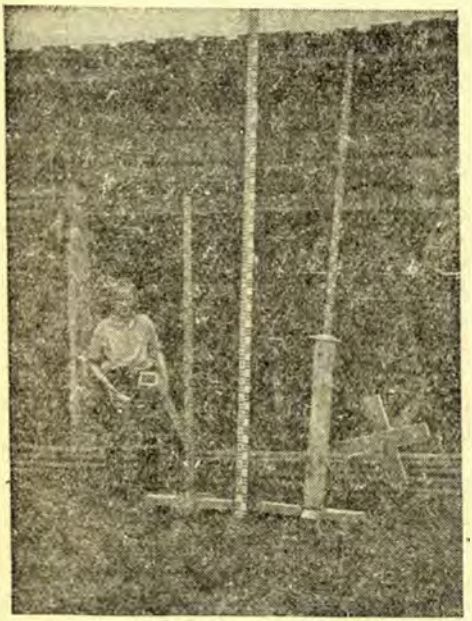
Анализы грунтов, данные на фиг. 42 и 43, как и приведенные выше, сделаны по способу Рутковского.



Фиг. 39. Конструкция простого пучиномера

Вес воды, как уже сказано выше, высчитывается в процентах к весу сырого (естественного) образца грунта.

Таким образом, на фиг. 42 из графика скважины № 1, заложенной 15 апреля 1935 г., мы видим, что на глубине 2,75 *м* сухая, твердая часть грунта, или твердая фаза, состоит по весу из 20,1% песку, 11,3% глины и 68,6% пылеватых частиц. Проценты пыли на чертеже непосредственно не написаны, но их нетрудно вычислить. Так, для рассматриваемой глубины 2,75 *м* процент пыли определится так: 100—(20,1+11,3)=68,6%. Показанная для этой глубины влажность равна 15,9%. Это значит, что в сыром (естественном), только что вынутом из земли образце влага составляет 15,9% по весу, твердая часть образца составляет 84,1%.



Фиг. 40. Пучиномеры Сковородинской НИМС простой и глубинный; последний внизу имеет муфту

Если влажность дана в процентах по отношению к весу влажного грунта, то нетрудно вычислить влажность этого образца по отношению к весу сухого грунта по формуле

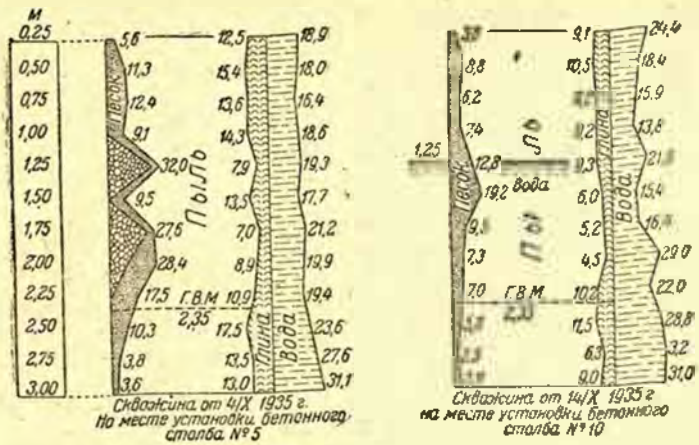
$$x_c = \frac{100\,x_в}{100 - x_в},$$

где x_c — влажность (в процентах) по отношению к весу сухого грунта;

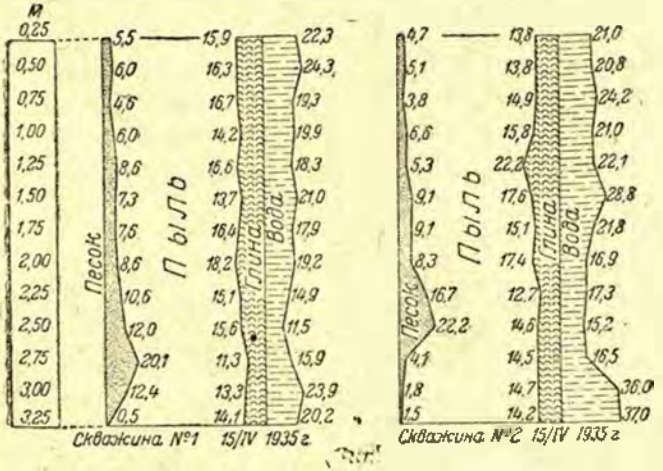
$x_в$ — влажность по отношению к весу сырого образца.

Обратный переход делается по формуле

$$x_в = \frac{100\,x_c}{100 + x_c}.$$



Фиг. 41. Геологический разрез по буровым скважинам у электротермометрической площадки (Г. В. М. — горизонт вечной мерзлоты)



Фиг. 42. Геологический разрез по буровым 8 скважин у установки $Б_3$ Сковородинской НИМС

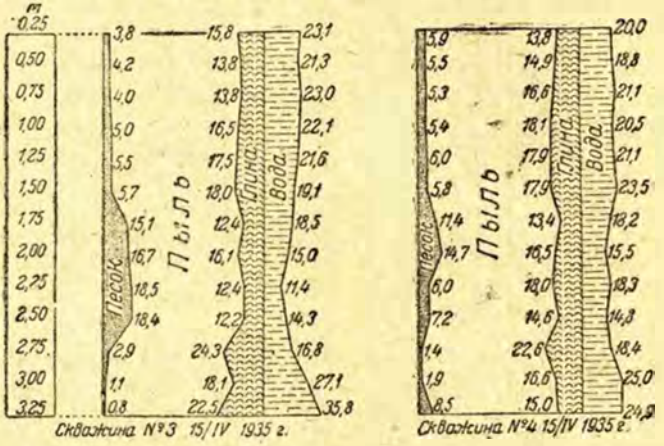
Примечание: грунт оттаял на 0,10—0,15 м, далее—мерзлота. Глубина залегания вечной мерзлоты около 2,5 м.

Относительно приводимых графиков пучения надо отметить, что они составлены по данным нивелировки, при помощи которой определялось пучение. Неизбежные ошибки в отсчетах до 3 *мм* нашли в этих графиках свое отражение, и это следует иметь в виду при их

рассмотрении. Данные с грубыми ошибками также нанесены на график и соединены пунктирной линией (фиг. 38). В графике пучения пучиномера № 26 точка *b* соединена с точками *a* и *c* пунктиром, а точки *b* и *c* — сплошной линией, так как опускания пучиномера по линии *bc* в декабре быть не могло.

Описывая явления промерзания, неизбежно приходится рассматривать явления пучения и влажностный режим, так как все эти факторы находятся во взаимной тесной зависимости.

Из приведенных выше графиков видно, что пучение в Сковородине начинается иногда в сентябре, с началом первых заморозков, что видно из кривых пучения колышков у приборов установки $Б_3$. Величина максимального пучения для различных точек поверхности,



Фиг. 43. Геологический разрез по буровым скважинам у установки $Б_3$

находящихся одна от другой на расстоянии 7 — 10 *м*, различна; максимальное пучение различных точек происходит, вообще говоря, не в одно и то же время. Пучение часто продолжается до марта, а иногда, повидимому, и позже, когда смыкание зимнего промерзания с вечной мерзлотой по температурным данным уже произошло. Из тех же графиков мы видим, что наиболее интенсивный рост пучения происходит с конца октября до середины февраля. Кроме того, следует отметить тот факт, что величина пучения различна в разные годы, как это видно из графиков пучения колышков у установки $Б_3$ в зимы 1934/35 и 1935/36 гг.

Все сказанное выше справедливо для пылеватых суглинистых грунтов, столь распространенных на севере и в Дальневосточном крае в долинах рек, при увлажненности этих грунтов в среднем около 20 — 21% по отношению к естественному образцу. Эта влажность, как увидим далее, соответствует полной или почти полной влагоемкости.

Отметим, кстати, что процентное содержание воды (по весу), еще ничего не говорит о том, в какой мере заполнены водой поры грунта.

Даже для грунтов, по внешнему виду совершенно схожих между собой, количество воды, необходимой для их насыщения до полной влагоемкости, может оказаться различным в зависимости от их пористости, которая обусловливается упаковкой частиц.

В хрящеватых и щебенистых грунтах, сцементированных пылеватыми суглинками примерно такого же гранулометрического состава (о них была речь выше), но с пониженной влажностью, пучения не наблюдается.

Из рассмотрения изоплет естественной и оголенной площадок (фиг. 27 и фиг. 28) видно, что появление отрицательных температур на поверхности почвы соответствует середине октября, как на площадке с естественным покровом, так и на оголенной. Положительные и нулевые температуры в грунте наблюдаются на оголенной площадке в среднем до конца ноября, а на естественной — до конца декабря, причем с конца ноября до конца декабря нулевые температуры наблюдаются на естественной площадке в слое, залегающем примерно на глубине 1,6 *м*.

Ввиду этого казалось бы, что с начала января в грунте, где существуют сплошь только отрицательные температуры, миграция воды и пучение не должны иметь места. Однако непосредственные наблюдения убеждают нас в обратном. Пучение продолжается иногда до марта, и в это время, следовательно, происходят какие-то процессы замерзания. Бурение многочисленных скважин, производившееся в декабре, январе и феврале, свидетельствует о том, что грунт в некотором слое над вечной мерзлотой часто в это время остается не замерзшим, что видно из приводимых табл. 12 и 13.

В табл. 12 даны глубины зимнего промерзания, глубины залегания вечной мерзлоты и величина талого прослойка между ними. Эти данные проводятся по девятнадцати точкам для конца января 1935 г. и для начала марта того же года.

Табл. 13 дает аналогичные данные о промерзании и о глубине залегания вечной мерзлоты для четырех квадратных площадок у домика *E*, построенного для электротермометрических наблюдений. Эти квадратные площадки нанесены на плане Сковородинской мерзлотной станции (фиг. 10) и обозначены римскими цифрами *I*, *II*, *III* и *IV*. На этом же плане нанесены и места двадцати буровых скважин, которые приведены в табл. 12. Данные по квадратным площадкам относятся к пяти точкам на каждой квадратной площадке: у углов квадратов и в их центрах.

Из табл. 12 и 13 видно, что в январе смерзания в физическом смысле этого слова не было. Не было смерзания и по всем двадцати наблюдаемым точкам, перечисленным в табл. 12, и в первых числах марта лишь в восьми из них наблюдалось полное смерзание.

При этих исследованиях талое состояние грунта определялось, вообще говоря, не по температурным измерениям, а по степени трудности, с какой бур проходил эту толщу, и по состоянию вынутого

Таблица 12

Месторасположение скважин (см. фиг. 10, план станции)	№ скважины	Данные бурения 27 января 1935 г.			Данные бурения в марте 1935 г.			
		глубина зимнего промерзания в см	глубина залегания вечной мерзлоты в см	толщина талого слоя в см	числа месяца	глубина зимнего промерзания в см	глубина залегания вечной мерзлоты в см	Толщина талого слоя в см
Северная граница станции, восточный угол	18	187	238	51	2	250	250	0
Середина северной границы станции	22	198	235	37	2	250	250	0
Восточная граница станции	14	173	236	63	2	200	236	50
Северная граница, западный угол	26	205	247	42	3	250	250	0
Западная граница станции	30	168	259	91	4	200	250	50
То же	36	200	246	46	4	235	246	11
Южная граница, западный угол	40	195	238	43	4	240	240	0
Южная граница, восточный угол	48	185	240	55	4	225	240	15
Южная часть площадки	52	190	245	55	4	230	245	15
Северная часть площадки, метеорологическая площадка	65	164	258	94	4	230	258	28
У электротермометрического домика *Е*	75	200	246	46	5	230	250	20
Во дворе станции, северо-восточный угол	81	205	241	36	5	250	250	0
У естественной площадки	92	170	245	75	6	225	240	15
У электротермометрического домика *Е*.	96	197	240	43	6	250	250	0
То же	99	196	260	64	6	240	260	20
У середины западной границы	114	189	258	69	7	215	250	35
У середины восточной границы	109	185	245	60	6	220	230	10
У восточной границы, в южной части	115	215	250	35	7	250	250	0
То же	122	150	225	75	7	225	225	0
У южной границы, близ середины	125	164	261	97	7	200	250	50

образца (мягкость, отсутствие кристаллов льда). Температурные измерения, которые иногда при этом производились, показывали очень часто нуль или небольшую отрицательную температуру. Наиболее низкая температура, которую при этом случалось наблюдать, равнялась —0,2°.

Следует здесь же сказать относительно точности полученных данных. Табл. 12 составлена на основании данных бурения, табл. 13 — на основании прощупываний. Так как резкой границы между мерзлым и талым грунтом иногда и не бывает, то в определениях границы зимнего промерзания возможны ошибки в пределах до 10 *см*.

То, что грунты при отрицательных температурах являются не вполне промерзшими, т. е. то, что далеко не вся вода в них находится в твердой фазе, подтверждается данными наблюдений электропроводности. Опыты над электропроводностью грунтов, произведенные нами на Сковородинской станции в 1934 и 1935 гг., показали, что

Таблица 13

Результаты исследования, производившегося с 11 по 13 января 1935 г.

Квадраты у дома *E* (см. фиг. 10, план станции)	№ скважины	Глубина зимнего промерзания в см	Глубина залегания вечной мерзлоты в см	Толщина талого прослойка в см
I-й квадрат (точки *1*, *2*, *3* и *4* взяты у вершин квадрата, точка *5*—в середине)	1	181	261	80
	2	174	256	82
	3	186	261	75
	4	179	254	75
	5	185	249	64
II-й квадрат	1	179	242	63
	2	183	244	61
	3	177	250	73
	4	169	248	79
	5	181	249	68
III-й квадрат	1	181	243	62
	2	182	260	78
	3	169	254	85
	4	178	246	68
	5	182	261	79
IV-й квадрат	1	180	245	65
	2	176	247	71
	3	173	249	76
	4	178	245	67
	5	170	249	79

электросопротивление этих грунтов далеко не достигало величин, соответствующих обращению в них всей воды в твердое состояние. несмотря на то, что, судя по температуре, мы имели полное соединение зимнего промерзания с вечной мерзлотой.

Тот факт, что грунтовая вода, а следовательно, и пропитываемый ею грунт при отрицательных температурах остаются незамерзшими, может быть объяснено тем, что вода эта находится в особого рода переохлажденном состоянии. При этом надо отметить, что речь идет не о том неустойчивом переохлажденном состоянии, которое легко может быть нарушено целым рядом причин (в особенности введением в переохлажденную воду кристаллов льда), а о том более устойчивом переохлажденном состоянии, в котором вода находится, повидимому, в капиллярах и в порах грунтов. Это последнее состояние отличается от первого, надо полагать, тем, что до определенного понижения температуры потряхивание и даже непосредственное соприкосновение с кристаллами льда не могут перевести воду, пропитывающую грунты известной дисперсности, в твердое состояние. Весьма вероятно, что предел этих отрицательных температур, при которых вода не переходит в твердое состояние, различен

для разных грунтов и зависит от размеров частиц, степени их уплотнения, от вещества и состояния поверхности этих частиц, а также от состава самой воды.

Тэбер в цитированной выше статье по этому вопросу указывает, что «вода, занимающая очень малые пустоты в грунте, плохо замерзает и в непосредственной близости к ледяным кристаллам может переохлаждаться». О переохлаждении воды при ее замерзании в грунтах говорит и Андрианов в специальной работе по этому вопросу (53, стр. 22). По Андрианову, замерзание грунтов в лабораторных условиях происходит всегда после предварительного переохлаждения, лежащего в пределах от —0,23° до —1,58° при температурах от —0,02° до —1,56°. Однако эти данные вряд ли имеют для рассматриваемых нами вопросов практическое значение, так как относятся к вполне определенной влажности замораживаемых проб, равной 20% от веса сухого грунта, тогда как действительная влажность пылевых грунтов, находящихся в деятельном слое, по большей части выше, что видно из анализов грунтов, приведенных на графиках (фиг. 41 — 43 и др.).

Кроме того, в опытах Андрианова переохлаждение происходило совсем в других условиях, чем в природе. Грунт встряхивался, замерзал со всех сторон и находился в изолированном замкнутом пространстве, тогда как в природе встряхиваний мы, вообще говоря, не имеем, грунт находится в окружении грунта, от которого или к которому может переходить влага. Далее (а это очень существенно), в естественных условиях переохлаждающийся грунт должен находиться в непосредственном соприкосновении с замерзшим, и нет ничего невероятного, что кристаллическое состояние воды в последнем может влиять на точку замерзания переохлажденного грунта, находящегося в непосредственном соприкосновении, приближая ее к 0°. У Тэбера, как это мы видели выше, есть указание на возможность соседства переохлажденной воды с кристаллами льда. У М. И. Сумгина (52, стр. 51) есть ссылка на Норденшильда, по исследованию которого внутри снежных кристалликов находятся пустоты, заполненные переохлажденной водой.

В связи с изложенным можно предположить, что в некоторых грунтах благодаря их большой дисперсности вода не переходит в твердое состояние, а если и переходит, то с большим трудом, через весьма длительное время. Иначе говоря, вода в таких грунтах может находиться любое время (может быть и весьма долгое время) в переохлажденном состоянии даже в непосредственном соприкосновении с кристаллами льда, если только отрицательные температуры таких грунтов не переходят известного предела.

О том, что вода в грунтах иногда замерзает при температурах, лежащих ниже точки замерзания, теперь уже, кажется, не спорят. Но нельзя сказать того же о температурах этого замерзания, о том, какая вода и в каком количестве замерзает, как при этом перераспределяется и как протекает процесс пучения. По этим вопросам един-

ство взглядов далеко не достигнуто. Буюкос (Bouyoucos) (41), которого цитируют и Сумгин (52, стр. 80) и Андрианов (53, стр. 33, 34), так говорит о температурах замерзания воды в грунтах: «Под свободной водой понимают воду, замерзающую при температурах незначительно ниже нуля, тогда как связанной водой называется вода, замерзающая окончательно при переохлаждении до —4° С, а также при температуре —78° С». Далее, вступая в дискуссию с Кином по поводу того, зависит ли количество связанной влаги от влажности почвы, и отстаивая положение, что для всякого определенного грунта количество связанной воды от влажности почвы не зависит, Буюкос говорит, что для выяснения этого вопроса при переохлаждении применялись две температуры: —1,5° и —4°.

Выбор таких температур он мотивирует тем, что где-то ранее им или кем-то другим установлено, что вся вода, не замерзающая при охлаждении до —1,5°, представляет связанную воду и состоит из капиллярно адсорбированной и входящей в соединения воды. Капиллярно адсорбированная вода окончательно замерзает при температуре —4°, но вода, входящая в соединения, не замерзает даже при крайне низкой температуре, равной —78°. К сожалению, надлежащего объяснения или какого-либо обоснования этим утверждениям автору этих строк найти не удалось; на этом приходится останавливаться потому, что приведенными Буюкосом цифрами многие оперируют, основывая на них свои выводы. Интереснее в практическом отношении для строительства другие данные того же Буюкоса, приводимые Андриановым (53, стр. 34). Здесь приводим эти данные в табл. 14.

Таблица 14

Название грунта	На 5 см³ воды, прибавленной к 25 г воздушно-сухой почвы, не замерзло см³	Температура замерзания в °С
Кварцевый песок	0,1	—0,009
Песок	0,3	—0,074
Супесь	1,7	—0,138
Суглинок	2,0	—0,200
Верхняя глина	3,5	—0,392
Тяжелый суглинок	3,5	—0,312
» »	3,7	—0,440
Черный ил	3,0	—0,422

К сожалению, и в этой таблице мы имеем опять-таки условную влажность, одинаковую для всех грунтов. Тем не менее температуры замерзания, показанные в ней для суглинков и супеси, очень близки к тем температурам (около —0,2°), при которых естественные пылеватые суглинки в Сковородине наблюдались, как сказано выше,

в незамерзшем состоянии. Данные табл. 14 о количестве незамерзшей воды объясняют, что мерзлые суглинистые и супесчаные пылеватые грунты при температурах, близких к нулю, не являются твердыми, а обладают известной пластичностью, что наблюдалось Н. И. Быковым еще в 1931 г. и отмечено им в статье «Вечная мерзлота и строительство Игарки» (23, стр. 54 и 55).

Это справедливо как для однородых мерзлых грунтов, так и для грунтов с прослойками льда, причем лед при попытке вдавливания какого-либо твердого тела (например, кончика карандаша) ведет себя, как твердое тело, а пылеватый суглинок между прослойками льда, находящийся рядом с ними, обнаруживает пластичность. При дальнейшем понижении температуры эта пластичность пропадает и мерзлые грунты делаются твердыми, как камень.

Параллельно надо отметить и другое весьма существенное обстоятельство. Если при постоянном понижении температуры приходилось наблюдать при —0,2° совершенно незамерзшие пылеватые суглинки, то при этих же температурах приходилось наблюдать грунты такого же состава и такой же влажности и в замерзшем состоянии (иногда с прослойками льда), причем сами грунты иногда сохраняли некоторую пластичность, а иногда оказывались твердыми.

Повидимому, дело происходит так: при постепенном охлаждении какого-нибудь грунта в интервале от 0° до некоторой отрицательной температуры $-t_1°$, вполне определенной для каждого грунта, последний ни при каких условиях (даже в непосредственном соприкосновении с кристаллами льда) не замерзает или замерзает очень нескоро. Температура $-t_1°$ зависит от рода грунта, его влажности, степени дисперсности, а возможно и от других факторов. При дальнейшем понижении температуры начинается замерзание грунта, характеризующееся тем, что часть воды переходит в твердое состояние. Количество замерзшей воды зависит от степени охлаждения. В условиях природных температур вся вода в грунтах никогда не замерзает и некоторая часть ее остается в жидком состоянии.

При нагревании грунта процесс, повидимому, не идет обратным порядком, и когда температура, постепенно повышаясь, достигает интервала, лежащего между 0° и $-t_1°$, грунт не оттаивает и вода не переходит в жидкое состояние, чем и объясняется то явление, что фактически мы в природных условиях часто находим мерзлые грунты, имеющие температуры, лежащие в пределе от 0° до $-t_1°$, включая и нулевую температуру.

Известную необратимость процесса оттаивания и замерзания отмечает уже Барнс для воды, указывая на то, что замерзание и оттаивание практически происходят при разных температурах: замерзание при температуре приблизительно от —0,024 до 0,006°, а оттаивание при температуре +0,006° (33, стр. 9, 10). Возможно также, что значительную роль играет и длительность процессов, так как есть известные основания предполагать, что процессы замерзания и оттаивания воды в капиллярных трубках при прочих условиях протекают медленнее, чем в значительных объемах.

При замерзании деятельного слоя в пылеватых грунтах часто образуются ледяные прослойки, вообще говоря, меньших размеров, чем наблюдающиеся в вечной мерзлоте; но о них речь будет впереди. В чистых песчаных грунтах прослойки, как правило, не наблюдаются, но они, повидимому, возможны в очень мелких песках, а также при содержании в последних пылеватых частиц.

Принимая во внимание изложенное выше, нетрудно понять, что пучение, связанное с замерзанием грунтов, может продолжаться и в январе, и в феврале, и в марте, когда весь деятельный слой уже имеет отрицательную температуру и «температурное соединение» зимнего промерзания и вечной мерзлоты уже произошло.

В свете этих соображений Городков (8, стр. 31), вероятно, совершенно прав, утверждая, по опыту исследований в Северном крае, что никакого поднятия вечной мерзлоты осенью не происходит, но не прав, обвиняя Сковородинскую станцию в недостаточной полноценности методики и наблюдений. Хотя обыкновенные вытяжные заленивленные термометры, несомненно, являются инструментами крайне несовершенными и отживающими свой век, все же данные о поднятии отрицательных температур от вечной мерзлоты навстречу зимнему промерзанию являются неоспоримым фактом, никоим образом не объясняющимся внесением в грунт холода с вынимаемыми для отсчета термометрами или чем-либо подобным. Поэтому мы полагаем, что в песчаных грунтах, где поры крупнее, явление протекает по-иному; в таких грунтах термическое соединение вечной и зимней мерзлоты будет совпадать с физическим соединением, т. е. с переходом воды в твердое состояние. Возможно также, что в песчаных грунтах движение отрицательных температур навстречу зимнему промерзанию будет незначительно, так как в песчаных грунтах это явление должно сопровождаться переходом воды в лед, т. е. выделением скрытой теплоты, тогда как в пылеватых грунтах появление отрицательных температур может происходить в известных пределах и без этого выделения.

Если мы возьмем средние изоплеты за много лет по оголенной площадке Сковородинской станции (см. фиг. 28 в главе II), то увидим, что на глубине наибольшего оттаивания, т. е. 2,5 *м*, температура —0,5° появляется в середине января, а —1,0° — во второй половине января. Что же касается времени появления этих температур на естественной площадке, то на той же глубине они появляются соответственно в конце февраля и в середине марта.

Федосов (46, стр. 12) дает следующую таблицу замерзания воды в капиллярных трубках, составленную по опытам Боровик-Романовой (табл. 15).

Таблица 15

Диаметр трубок в *мм*	1,57	0,24	0,15	0,06
Температура замерзания в них воды в °С	—6,4	—13,3	—14,6	—18,5

К сожалению, ни методики, ни условий опыта Федосовым не приведено, тем не менее эти данные подтверждают возможность существования талых грунтов при значительных отрицательных температурах. Этим, пожалуй, объясняется и парадоксальный с первого взгляда факт существования слоистой мерзлоты, в которой талые и мерзлые слои чередуются. Талые слои не могут перейти в мерзлое состояние из-за того, что соседние мерзлые слои имеют недостаточно низкую температуру, не соответствующую тому пределу, при котором для талого слоя возможен переход в мерзлое состояние; мерзлые же слои не могут оттаять под влиянием талых, ибо у последних температура отрицательная. Это и наблюдалось в Игарке, где температура и талых и мерзлых слоев отрицательная, весьма близкая к 0°.

Возможно, что известное влияние на замерзание грунтов могут иметь еще теллурические токи, которые наблюдались в Сковородине. Сила этих токов не превышает 1 *ма*. Токи эти меняются не только по величине, но и по направлению иногда в течение нескольких минут. Как показали лабораторные опыты, замерзание под током в несколько миллиампер значительно замедляется. Вопрос этот пока совершенно не изучен.

Не может не влиять на замерзание и давление вышележащих слоев грунта. Здесь главную роль играет, конечно, не столько само давление как фактор, понижающий точку замерзания, сколько то, что давление это способствует уплотнению грунта и, следовательно, уменьшению размеров пор. Впрочем, вряд ли это влияние сколько нибудь значительно.

Кроме перечисленных причин, могущих влиять на температуру замерзания воды в грунтах, возможно, что и концентрация солей не только с глубиной, но и у отдельных частиц грунта влияет на температуру замерзания. К сожалению, этот вопрос еще совершенно не изучен.

С таликами, имеющими отрицательную температуру, не надо смешивать других таликов, имеющих положительную или, скорее, нулевую температуру, которые тоже могут образоватся и в действительности образуются при зимнем промерзании. В то время как вода у первых, будучи выжата из грунта, должна неминуемо замерзнуть, вода вторых может существовать в талом состоянии.

Так обстоит дело с замерзанием грунтов. Конечно, многое из сказанного подлежит проверке и дальнейшему уточнению в лабораториях или, что еще лучше, на месте, в природе, при наличии более совершенной аппаратуры и более совершенной методологии.

§ 19. Механизм пучения грунтов и миграция влаги

Процесс пучения дневной поверхности во времени и его размеры описаны выше.

Описанное явление поднятия дневной поверхности при замерзании грунтов является следствием не только расширения находящейся в грунте воды при переходе ее в лед, но и ряда других причин.

Одновременно с пучением грунта в толще его (если грунт, например, состоит из пылеватых суглинков или супесей), появляются прослойки чистого льда, иногда (гораздо реже) пустоты. Кроме того, явление пучения связано с перемещением влаги внутри грунта, с так называемой миграцией влаги. К рассмотрению этих явлений мы и переходим.

По каким законам все это происходит, как мы увидим из последующего, в точности неизвестно, но имеется значительное количество гипотез, которые, по нашему мнению, в большой мере неудовлетворительны для объяснения этих явлений.

Главное затруднение заключается в том, что при замерзании и пучении грунта в естественных условиях размеры пучения иногда значительно превосходят те, которые можно объяснить расширением воды при замерзании. Об этом писал еще Богданов (54, стр. 99 — 102) в 1912 г., разбирая опыты Войслава, относящиеся к изучению пучения. Убедившись в том, что влажный грунт, если он представляет замкнутую систему (т. е. не имеет возможности извне получать дополнительное количество воды), при замерзании дает лишь незначительное пучение, Войслав проделал серию других опытов. Он брал замороженные образчики грунта и клал их на блюдечко с водой; через короткое время вода оказывалась впитанной в образчик. При повторных замораживаниях и подливании воды в блюдечко образчик продолжал поглощать ее. После нескольких таких замораживаний объем породы увеличивался до 40%, причем вся масса породы представлялась прорезанной по всем направлениям довольно толстыми пластинками льда.

Хотя условия этого опыта и весьма далеки от тех, которые имеются в природных условиях, тем не менее сам опыт казался настолько любопытным, что мы пробовали его повторять, но безуспешно. В наших опытах вода у поверхности мерзлого куска замерзала, покрывая его мерзлой ледяной коркой, но внутрь не впитывалась. Однако эту неудачу нельзя считать опровержением описанного опыта. Возможно, что причиной неудачи были просто неподходящие, например слишком низкие, температуры взятых образцов или какое-нибудь другое не учтенное при опыте обстоятельство.

У Богданова имеется описание исследований Войслава в естественных условиях на шести участках Октябрьской (тогда Николаевской) ж. д. Войслав установил, что в тех местах, где появлялись пучины, под балластом имелся слой плывуна с высоким уровнем грунтовых вод. В расположенных рядом непучащих местах грунт был обыкновенно другого строения, а если имелся плывун, то уровень грунтовых вод стоял ниже глубины замерзания. Обобщая результаты наблюдений Войслава, Богданов приходит к такому заключению, что «как опытами Войслава, так и всеми наблюдениями вообще установлено, что к п у ч и н и с т ы м г р у н т а м относятся плывун и его разновидности». Плывун характеризуется Богдановым как супесь или суглинок, т. е. «некоторая смесь из глины и песка с очень мелкими зернами песчинок». Богданов отмечает, что чистый песок, как и чистая глина, пучинам не подвержен.

О механизме пучения Богданов высказывает такие соображения: «При замерзании плывуна или ила вода, не имеющая свободной циркуляции в его толще, увеличившись в объеме, вспучит незначительно грунт, дав в нем сеть мелких трещин; число этих трещин и внутренних пустот должно увеличиваться при понижении температуры вследствие неодинаковых коэфициентов сжатия породы грунта и лежащих в его толще ледяных жилок и прослоек. По волосным трещинам поступает вверх грунтовая вода, уровень которой высок и которая, следовательно, лежит непосредственно под замерзшим слоем почвы (иначе грунт не был бы пучинистым) и, заполняя все пустоты в грунте, дает вторую пучину и ряд трещин в грунте, по которым поступает вверх новая вода и повторяет такт процесса».

Такой механизм пучения кажется Богданову настолько естественным, что далее он прибавляет: «единственно, в чем можно было бы сомневаться в описанном процессе, так это то, что грунтовая вода способна, не замерзая, протекать по трещинам в мерзлом грунте. Но это сомнение не может иметь места после опытов Жамена, доказавшего, что вода в волосных трубках $d = 0{,}6$ *мм* не замерзает при значительных степенях охлаждения, даже при легких встряхиваниях».

Далее Богданов останавливается на математической обработке этого процесса, сделанного Штукенбергом. Штукенберг рассуждает следующим образом. Пусть в массе какого-либо грунта заключается вода в объеме a. При замерзании грунта вода тоже замерзнет и займет объем, равный $a\ (1 + 0{,}07)$ [1]. Вследствие замерзания объема воды a в грунте получаются трещины и пустоты, которые заполнит вода в объеме a_1. При замерзании этой второй порции воды получится объем льда, равный $a_1\ (1 + 0{,}07)$. Таким образом, вместо первоначального объема воды a мы имеем $a\ (1 + 0{,}07) + a_1\ (1 + 0{,}07)$. Далее в грунт поступит объем воды a_2, потом a_3 и т. д. Тогда получится: $V = 1{,}07\ (a + a_1 + a_2 + \ldots) = 1{,}07\ \Sigma\ a_n$. «Надо заметить», — отмечает Богданов,—«что с возрастанием объема льда в грунте количество трещин должно увеличиваться, поэтому можно предположить, что $a < a_1 < a_2$» и т. д.

Такова одна из первоначальных гипотез, объясняющих образование и рост пучин, который простым расширением при замерзании воды, пропитывающей грунт, объяснить никак не удавалось, и такова одна из псевдонаучных формул, весьма часто приводимая в литературе, по которой ничего вычислить нельзя.

Эти рассуждения Штукенберга приводятся нами, по Богданову, почти дословно и изложены подробно, потому что они имели и имеют до сих пор большое распространение, являясь прототипом и для некоторых других гипотез.

Для появления пучин по этой гипотезе нужны пучинистые грунты, высокие грунтовые воды и мороз. Что же касается процесса пучения, то он связан с постепенным образованием все новых и новых капил-

[1] Штукенберг, вероятно, ошибочно принимает приращение объема при замерзании равным 7% вместо 9%.

лярных трещин и поднятием по ним воды с последующим замерзанием последней, вследствие чего замерзший и охлаждающийся слой грунта все время обогащается водой за счет нижележащих грунтовых вод.

В 1931 г. появляются книга М. И. Сумгина «Краткий курс дорожной геофизики» и книга Евдокимова-Рокотовского «Постройка и эксплуатация инженерных сооружений в вечной мерзлоте». Обе эти книги касаются также вопросов пучения и перемещения влаги при замерзании.

Касаясь пучения, Евдокимов-Рокотовский (34, стр. 57) в своем труде излагает ту же теорию Войслава—Штукенберга, дополняя ее лишь тем, что в число причин пучинообразования вводится конденсация паров из воздуха, что вряд ли имеет какое-либо отношение к образованию и росту пучин. Что же касается фактического материала, приводимого Евдокимовым-Рокотовским о нивелировке квадратного километра на ст. Сковородино и о результатах такого нивелирования, то, повидимому, Евдокимов-Рокотовский был введен кем-то в заблуждение, так как следов такой большой работы в делах Сковородинской мерзлотной станции обнаружить не удалось и, повидимому, такой работы не производилось. Что же касается результатов, якобы полученных в итоге этой работы, — будто весь этот квадратный километр пучит равномерно или почти равномерно, — то результаты эти, как мы уже видим и как увидим в дальнейшем, не соответствуют действительности. Не соответствует действительности, как видно из приведенных нами выше графиков анализа грунтов, и утверждение Евдокимова-Рокотовского об особой переувлажненности талого слоя между вечной мерзлотой и зимним промерзанием, превращающей, по его словам, этот слой в плывунную жидкую массу, где развивается гидростатическое давление, возрастающее с увеличением промерзания верхнего слоя почвы (34, стр. 63, 64).

При рассмотрении работ Сумгина, относящихся к пучению, наиболее целесообразным, мы полагаем, будет привести его классификацию пучин и то, что он высказывает по каждому из видов пучения (60, стр. 67 — 104). Изложению этой классификации Сумгин предпосылает «Основы теории пучения грунта от расширения содержащейся в нем воды при переходе ее в лед». Эти основы следующие:

1) вода, принимая твердое состояние, расширяется скачком;

2) если все поры грунта заполнены водой, то при замерзании и увеличении объема воды возникают в замерзающем грунте напряжения;

3) при замерзании грунта, насыщенного водой до полной влагоемкости, увеличение объема слагается из увеличения объема воды при замерзании и из объема появляющихся при этом мелких пустот, которые называются «порами замерзания»; введение этих пор необходимо, так как увеличением объема воды при замерзании объяснить наблюдающуюся в природе величину пучения нельзя;

4) при неполном заполнении пор водой последняя при замерзании грунта входит в эти поры, чем величина пучения уменьшается; уменьшение пучения может при этом дойти до нуля, если объем

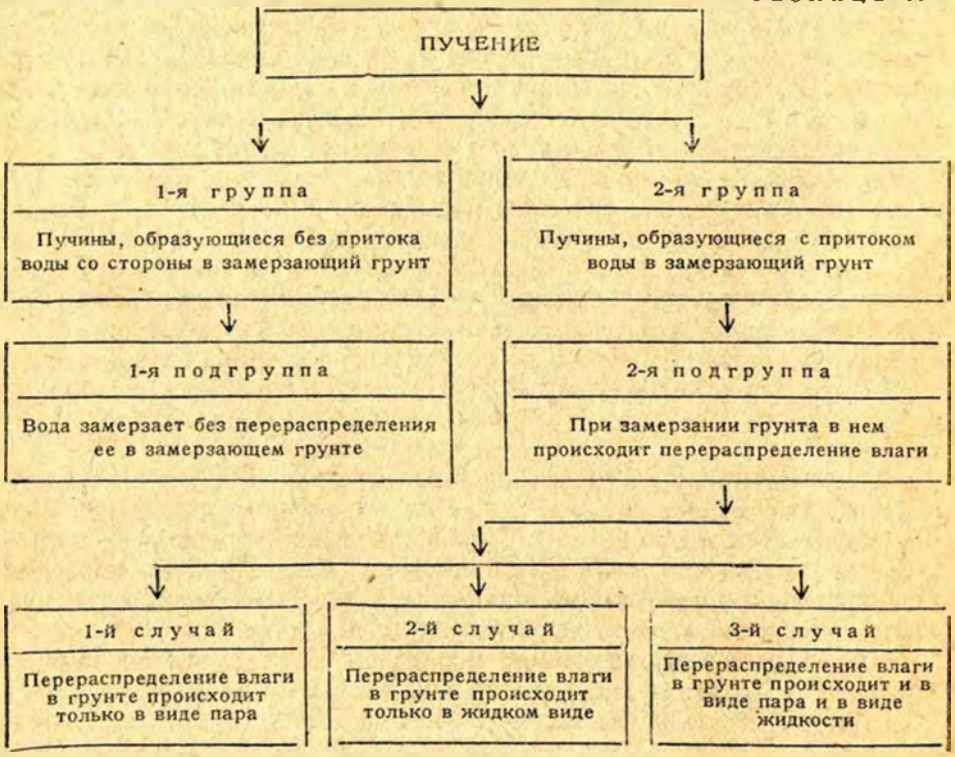
пустот, не заполненных водой, равен или больше приращения объема воды в грунте при ее замерзании.

К сожалению, в этих основах теории пучения не все достаточно ясно. Неизвестно — на каких лабораторных данных или исследованиях в натуре основано утверждение, что вода при замерзании расширяется скачком; далее — какого рода напряжения возникают при замерзании воды, насыщающей грунт; чем кроме необходимости объяснить величину пучения доказано появление «пор замерзания» и именно в процессе замерзания, так как возможное появление трещин при дальнейшем охлаждении есть явление другого порядка, никоим образом не увеличивающее объем грунта; почему при замерзании вода может входить в поры, имеющиеся в грунте, и почему она не может входить в «поры замерзания» и т. д.

Не совсем ясно и не вполне правильно также воззрение на теплоту как на внешнюю силу, воздействующую на грунт, которую Сумгин ставит во главу цепи явлений, заканчивающихся деформацией в грунтах.

Перейдем к рассмотрению классификации пучин, предложенной Сумгиным, и его высказываний о различных видах пучения, которое он определяет как «деформацию дневной поверхности почвы, заключающейся в поднятии, а затем опускании этой поверхности» (60, стр. 76). Классификация пучин по Сумгину дается нами в табл. 16.

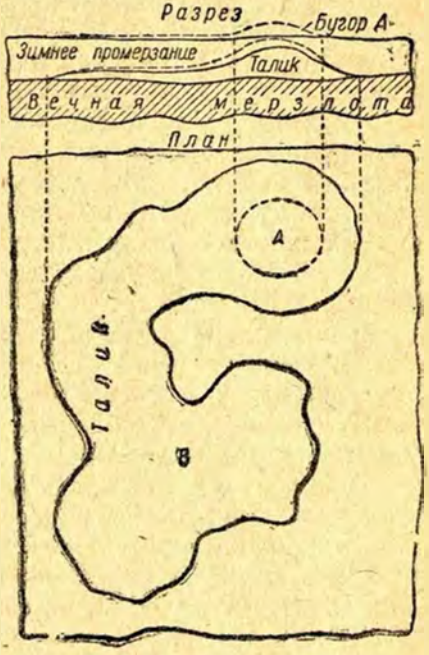
Таблица 16



Описывая первую подгруппу, Сумгин считает, что в природе в чистом виде таких случаев не бывает, но что сравнительно тонкий слой грунта, замерзающий при очень сильном морозе, можно практически отнести к первой подгруппе.

Разбирая пучение второй подгруппы, Сумгин полагает, что рассматривать ее рано, так как вопрос о перераспределении влаги при замерзании еще недостаточно разработан, но что в этой группе возможны случаи, когда при замерзании появляются ледяные прослойки.

При рассмотрении второй группы Сумгин приводит теорию Штукенберга и теорию Тэбера. Не высказывая своего мнения относительно этих теорий, Сумгин говорит, что к буграм пучения, достигающим иногда высоты нескольких метров, эти теории не применимы, и переходит к рассмотрению причин возникновения этих бугров, указывая, что процесс бугрообразования был выяснен еще в начале нынешнего столетия Сукачевым, Никифоровым и Драницыным. Переходя к описанию образования бугров, Сумгин, исходя из неправильных представлений, например Сукачева (2, стр. 12), объясняет образование этих бугров промерзанием талых включений в замкнутых со всех сторон пространствах, которые иногда могут образоваться в случае соединения вечной мерзлоты и слоя зимнего промерзания по некоторому замкнутому контуру, как это изображено на фиг. 44. Не оспаривая возможности подобного явления, мы отметим лишь, что решение «уравнения бугра», составленного М. И. Сумгиным (60, стр. 84), вряд ли может быть источником ценных теоретических или практических результатов или выводов из-за несоответствия предпосылок реальным условиям.



Фиг. 44

В самом деле, формула Сумгина выведена в предположении смыкания мерзлоты по кругу, тогда как в природе смыкание если и происходит, то, несомненно, по более сложным контурам вроде изображенного на фиг. 44. Далее, при промерзании грунта в области *B* вовсе не обязательно, чтобы вода, пропитывающая грунт в этой области, отжималась при замерзании к бугру *A*. Грунт в области *B* может замерзать, создавая в этой же области известное пучение, и только.

Сумгин (60, стр. 85) отождествляет бугры пучения с диференциальными пучинами в понимании Тэбера и далее, развивая свою мысль,

говорит: «Вода, которая сосредоточивается под бугром, может притти в него со значительного расстояния со стороны, а не из-под бугра, как рисовали себе картину образования бугра Тэбер и Штукенберг, не знавшие процессов при замерзании грунтов в условиях наличия вечной мерзлоты».

Не вдаваясь в то, насколько верны гипотезы Штукенберга и Тэбера, все же нужно отметить, что они созданы для объяснения совершенно другого явления, чем то, о котором говорит Сумгин, и потому сопоставлять и тем более противопоставлять эти теории совершенно не приходится.

И Тэбер и Штукенберг, говоря о пучении, величину которого нельзя объяснить расширением грунтовой воды при замерзании, указывают на подсасывание воды и превращение ее в ледяные прослойки, тогда как в буграх пучения мы имеем обыкновенно большие полости, наполненные водой, которая сверху обычно замерзает, образуя нечто вроде купола, под которым находится вода.

При пучении, если бы таковое происходило согласно теориям Тэбера, Войслава, Штукенберга, никаких напряжений в грунте гидростатического или иного порядка не появится, тогда как вода в буграх пучения всегда находится под гидростатическим давлением.

Величину таких пучин, для объяснения которых составляли свои гипотезы и Штукенберг и Тэбер, конечно, нельзя получить и из «уравнения бугра», которое здесь по существу не применимо.

Из сказанного выше о соединении зимнего промерзания с вечной мерзлотой мы уже можем заключить, что вряд ли в природе часто создаются замкнутые полости, а впоследствии увидим, к чему приводят попытки создать такие полости искусственно.

Подводя итоги сказанному, видим, что о механизме пучения достоверного мы знаем мало.

На всех этих положениях и мыслях о пучинообразовании и миграции влаги приходится останавливаться столь подробно, потому что вопросы эти чрезвычайно важны для строительства.

Только зная, как происходит пучение и как при этом происходит перемещение влаги, можно правильно намечать рациональную борьбу с пучением, которое часто является причиной разрушительных деформаций. От пучения, как известно, страдают земляное полотно, искусственные сооружения и в еще большей мере промышленные сооружения, жилые здания и пр.

Неверные представления о пучении ведут к рекомендации нерациональных и дорогих мероприятий. В самом деле, если специфически пучинистыми грунтами признать пылеватые суглинки (52, стр. 89), то во избежание пучения, например, телеграфных столбов достаточно было бы их засыпать непучинистым грунтом — песком. Однако, как известно, это средство далеко не всегда помогает и опять-таки не потому, что Федосов (46, стр. 43) считает песок типично пучинистым грунтом, а вследствие совершенно других обстоятельств.

Те же неверные представления заставляют авторов «Временных технических условий на изыскания, проектирование и сооружение

железных дорог в условиях вечной мерзлоты» (изд. 1939 г., стр. 35, 36, 64) рекомендовать, несомненно, дорогие, но весьма сомнительной пользы галечные засыпки, о чем более подробно будет сказано ниже.

Нельзя не упомянуть о соображениях по этому вопросу Цытовича, изложенных в книге «Основы механики мерзлых грунтов» (57, стр. 254): «Основной причиной пучения грунта следует признать образование в грунте прослойков и линз льда». «Если грунт в момент замерзания находится в условиях свободного доступа воды, при некоторых условиях могут возникнуть обстоятельства, благоприятные для образования ледяных прослойков и линз».

Цытович ссылается на Тэбера, с которым, повидимому, солидаризируется в вопросах пучения грунтов, но не забывает и взглядов Буюкоса, так что целесообразнее, пожалуй, просто перейти к изложению взглядов этих ученых, отметив лишь попутно чрезвычайно парадоксальный факт, установленный экспериментально под руководством Цытовича сотрудником Вологдиной (57, стр. 254).

Опыты были поставлены по изучению увеличения объема грунта: при увлажнении, при промерзании со всех сторон, при промерзании только сверху и при подтоке воды» (Цытович). Результаты этих опытов сведены в табл. 17.

Таблица 17

Наименование грунтов	Увеличение в % объема грунтов при замораживании	
	со всех сторон	сверху
Песчаный	1,8	1,45
Пылевато-илистый	1,0	0,98
Илисто-глинистый	3,22	1,5—2,0
Глинистый	5,27	2,39

Невероятный на первый взгляд факт различного увеличения объема грунта в зависимости от способа замораживания нуждается в более детальном изучении и проверке. Но, к сожалению, о методике исследования, гранулометрическом составе грунтов, их пористости и влажности не имеется данных.

Тэбер представляет процесс пучения так (45): «когда при замерзании почвы, насыщенной водой, происходит слабое пучение или его совсем не бывает, то это значит, что часть воды выжимается через почвенные поры ниже растущего слоя зимнего промерзания, сжимая или выгоняя воздух; чрезмерное же выпучивание мы наблюдаем в том случае, когда вода проникает между почвенными слоями и отлагается в виде слоев льда. Эти ледяные прослойки постепенно утолщаются следующим образом: утолщающаяся прослойка льда представляет собой ледяной кристалл, находящийся в соприкосновении с тонкой пленкой воды, подобной адсорбированному слою, могущему

вообще образоваться на всех телах при соприкосновении с водой, если только эти тела ею смачиваются. Когда одна из молекул этой пленки под влиянием охлаждения ориентируется и притягивается к кристаллу, обусловливая его рост, на ее место становится другая из прилежащего участка жидкости, пропитывающей грунт. Так поддерживаются и целость пленки и рост кристалла.

После того как вода будет исчерпана, пленка может замерзнуть, но до этого момента она не замерзает. Ориентирование молекулы и ее присоединение к кристаллу (о чем сказано выше) сопровождаются легким отталкиванием, но это явление не может считаться существенным фактором в процессе замерзания воды, пропитывающей грунт.

Во время роста в почве ледяной прослойки вода идет к ней через междучастичные капиллярные промежутки в грунте. Однако этот поток вверх не следует приписывать капиллярным силам, так как для развития их нет свободной поверхности, нет менисков. Постепенное образование льда в порах почвы ниже растущего ледяного слоя, вероятно, объясняет ритмическую полосатость, которую мы наблюдаем в процессе постепенного промерзания грунтов, и ограничивает рост отдельных прослоек.

В открытой системе, когда вода имеет свободный доступ к промерзающим слоям, или, как иногда говорят теперь, при замерзании со свободным подтоком или подсасыванием воды, определения влажности показывают, что слои мерзлой глины, находящиеся между слоями льда, содержат такое же количество влаги, как и глина ниже границы промерзания. Это обстоятельство подтверждает предположение, что пучение в образцах происходит благодаря образованию слоев льда и что замерзание междучастичной воды не вызывает заметного поднятия замерзших слоев». Вот как представляет себе Тэбер процесс пучения грунта.

Таким образом, как по представлениям Тэбера, так и по представлениям Войслава вода во время промерзания грунта всасывается тем или иным способом в грунт для образования прослоек льда, которые и обусловливают пучение. Что касается пучения от замерзания воды между частицами грунта, то оно весьма незначительно, да и вода в большинстве случаев замерзает там не вся.

Излагая свои соображения относительно пучения и замерзания, Тэбер делает несколько чрезвычайно интересных замечаний. Он говорит, что грунты, промерзая в естественных условиях, ведут себя вообще, как открытые системы, но маловодопроницаемые грунты ведут себя, как замкнутые, вспучивание может быть чрезмерным в тех местах, где уровень воды по своему положению так близок к поверхности, что капиллярный подъем доходит до зоны промерзания, иначе говоря, где возможен подток и подсасывание.

Далее Тэбер отмечает, что сравнительно небольшая нагрузка совершенно устраняет образование вспучивания открытой системы, когда грунт имеет такую текстуру, что при благоприятных условиях образуется лишь немного льда. Текстуру грунта, по Тэберу, харак-

теризуют размер, форма и расположение частиц, степень уплотнения, а кроме того, величина и процент содержания пустот, что в значительной мере обусловливается предыдущими данными.

Как на пример такой текстуры, при которой не бывает выделения льда, Тэбер указывает на смесь из песка с диаметром частиц 0,07 *мм* и глины, причем глины не должно быть менее 20% по весу. Далее Тэбер указывает, что вспучиванию сернобариевой соли (диаметр частиц около 2 микрон) уже препятствует давление 2,11 *кг/см²*, «но,— прибавляет он, — это же давление весьма мало уменьшает вспучивание чистой глины».

Говоря о механизме пучения, Тэбер останавливается на описании интересного опыта, в котором пробирки с глиной, будучи подвергнуты охлаждению с боков, лопаются, потому что ледяные кристаллы растут радиально внутрь и производят давление на стенки пробирок. Если же зарыть эти пробирки в песок, чтобы охлаждение шло сверху вниз, то они не лопаются, так как кристаллы растут в вертикальном направлении; у горлышка при этом образуются чередующиеся слои льда и промерзшей глины.

В заключение Тэбер все же указывает на необходимость более детального изучения состава воды, природы происходящих при замерзании процессов и т. д.

Буюкос (58) процесс замерзания воды в грунтах объясняет несколько иначе. По его мнению, опытами установлено, что сначала замерзает вода в больших капиллярах и силой кристаллизации притягивает к себе воду из более мелких капилляров, а также воду из пленок, обволакивающих почвенные частицы. Поэтому для замерзания грунта, ни разу не замерзавшего, требуется более низкая температура, чем для грунта, уже подвергавшегося однократному или многократному замерзанию. Это происходит потому, что при первоначальном замерзании часть работы тратится на вытягивание воды из мелких капилляров, в то время как при повторных замерзаниях вода уже находится в более крупных капиллярах, в которых замерзание происходит легче. Легкое размешивание грунта палочкой или долгое стояние в незамерзшем состоянии вновь понижает точку замерзания. И то и другое (т. е. и перемешивание и долгое стояние) способствуют восстановлению прежнего состояния влаги, вводят ее в мелкие капилляры и вновь понижают поэтому точку замерзания.

Буюкосом приводятся следующие данные для грунта, состоящего из 20 *г* почвы (глины) и 4,5 *см³* воды:

Порядок замораживания	Температура замерзания в °С
Первое замораживание	—1,145
Второе »	—0,955
Третье »	—0,645
Четвертое »	—0,620
Легкое размешивание в пробирке палочкой . .	—1,235

Буюкос, однако, говорит. что явление это имеет место главным образом в тех случаях, когда почва содержит мало влаги; при большем же содержании влаги картина изменяется.

Мотль (48), базируясь на многолетнем опыте управления шоссейных дорог штата Миннезота, дает описание возникновения пучин, очень близкое к описанию Тэбера:

«С начала зимнего промерзания движение капиллярной воды в почве становится быстрее (это было доказано лабораторными опытами). Движение это направлено к тем слоям почвы, которые уже замерзли. Там, где почва очень мелкозерниста, вода при этом поднимается с глубины 10 фут. (3 *м*) к верхним слоям, уже замерзшим. По причинам, не вполне выясненным, вода, достигая замерзших слоев, замерзает небольшими частями, большей частью слоями, не соединенными между собой, и при этом толкает почвенные слои вверх, так как она сама расширяется. По мере того как промерзание подвигается ниже, слои льда продолжают образовываться на нижней поверхности замерзшей почвы. Это явление продолжается вместе с ростом промерзания до п о л н о г о и с т о щ е н и я запаса поступающей из нижних слоев воды».

Что касается условий, способствующих и обусловливающих пучение, то, по Мотлю, они вполне совпадают с теми, которые называют перечисленные выше исследователи, и сводятся к мелкозернистости грунта, высокому стоянию грунтовых вод, подземным течениям и неоднородности грунтов.

Остановимся на описании процессов пучения Бортоном (Burton), представляющих, с одной стороны, некоторые особенности, а с другой, — результат большого опыта, поставленного на американских железных дорогах, что представляет, конечно, большой интерес для строителей. Правда, это описание не относится непосредственно к районам вечной мерзлоты, но поскольку процесс пучинообразования в областях, где нет вечной мерзлоты, мало чем отличается от процесса в областях с вечной мерзлотой, эти наблюдения и опыты имеют для нас значительный интерес.

Наблюдения велись в районе Мичигана в 1929 — 1930 гг. на поврежденных пучинами шоссейных дорогах. По предварительному обследованию было отмечено 500 мест, поврежденных пучинами; из них 150 мест были детально изучены. В результате исследований оказалось, что развитию пучин способствуют следующие обстоятельства:

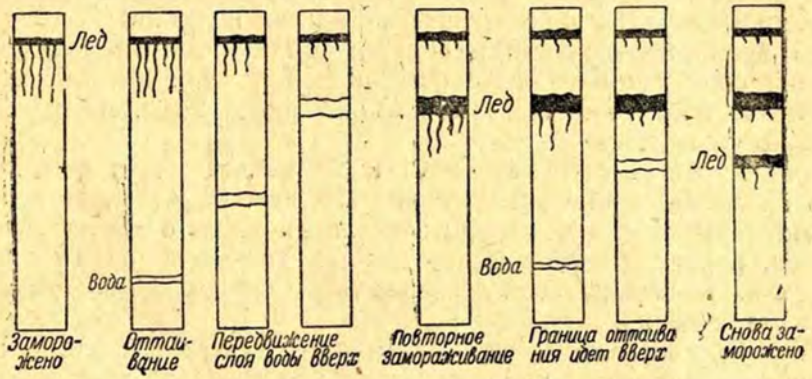
1) если слой или небольшая масса мелкоструктурного грунта заключены между слоями более грубой породы, лучше дренированной

2) если среди суглинка или глины встречается небольшое включение мелкого песка или ила.

Кроме того: 1) пучению подвержены не очень крупные и мелкие пески, когда уровень воды бывает высок и когда нижележащие глины препятствуют продвижению воды;

2) пучение наблюдается и в крупнозернистых грунтах, если вода попадает в них под известным напором.

Из 156 повреждений 94 падают на те места, где ил, мелкий песок, илистая глина или супесь окружены более крупнозернистыми грунтами; 22 повреждения возникли от пучин в местах, где ил или очень мелкий песок оказались окруженными глиной; 30 повреждений имели место на песке мелком и средней крупности; 6 повреждений произошли на крупнозернистом грунте; остальные 4 повреждения встретились на местах, где характер грунтов и их влажность как будто бы ничем не отличались от окружающей среды. Из 500 случаев пучения 76% падает на выемки, 14%—на нулевые места и 10%—на насыпи. Для изучения замерзания в лаборатории при Мичиганском университете была, как указывает Бортон, устроена специальная холодная комната, где можно было создать любую температуру, любое увлажнение и измерять температуру при помощи термоэлементов. Опыты производились с монолитами, взятыми непосредственно с пу-



Фиг. 45. Образование прослоек льда в грунте по Бортону (Burton)

чинистых мест в форме цилиндров диаметром в 1 фут (30,5 *см*) и высотой 3 фута (91,5 *см*); но воспроизвести пучение, соответствующее вполне пучению в естественных условиях, так и не удалось. Вторая серия лабораторных опытов относилась к замораживанию грунтов, размешанных с водой и потом осевших в пробирках. Высота пробирок равнялась 20 *см*, диаметр 6,5 *см*. При оттаивании снизу замерзших в этих пробирках грунтов наблюдалось появление слоя воды, отделявшего оттаявшую часть от промерзшей, который, постепенно утолщаясь, продвигался вверх, как это показано на фиг. 45. Утолщение слоя воды и движение вверх происходило оттого, что оттаявшие над слоем воды частицы грунта падали через этот слой вниз, а лед, который сковывал эти частицы, переходил в воду прослойки, увеличивая ее толщину. Если теперь вновь происходило замораживание грунта сверху, то прослойка воды замерзала в том месте, где ее настигали отрицательные температуры. При повторном оттаивании снизу можно было получить вновь прослойку воды, двигающуюся снизу, которую новым замораживанием можно было превратить в слой льда и т. д.

Бортон полагает, что и в природе происходит нечто подобное при изменениях температуры воздуха, что вызывает неравномерное оттаивание и замерзание почвы. Соответствие такого процесса действительности, по нашему мнению, подвержено значительному сомнению.

«С 1930 г.,—говорит Бортон,— прежде чем производить постройку дорог, делали подробное исследование грунтов предполагаемой трассы. На проектных чертежах обозначались типы грунтов. Все в дальнейшем делается с учетом этих данных. Все применяемые новые способы строительства, конечно, фиксировались». В заключение Бортон выражает уверенность, что они через несколько лет будут иметь очень интересный материал по данному вопросу.

Из всего сказанного выше вытекает, что с вопросами промерзания и пучения грунтов теснейшим образом связан вопрос о распределении влаги и что если не считать соображений Бортона об оттаивании снизу, то все остальные исследователи, как мы видим, согласны с тем, что во время промерзания и образования пучин промерзающий и пучащий слой так или иначе обогащается влагой. По Мотлю, это обогащение идет до полного истощения запаса воды, поступающей из нижних слоев.

Однако Евдокимов-Рокотовский держится особых взглядов. Ссылаясь на лабораторные исследования (34, стр. 46 — 47), он считает, что находящаяся в грунте при замерзании вода о т ж и м а е т с я и грунт, переходя в мерзлое состояние, несколько о б е з в о ж и в а е т с я, но зато глубоко лежащие талые грунты все более и более насыщаются водой.

«Гораздо ярче описываемые явления,—отмечает Евдокимов-Рокотовский, — приходится наблюдать в натуре в районе залегания вечной мерзлоты. С наступлением морозов грунт промерзает и степень влажности падает, зато в талом слое, который находится между слоем вечной мерзлоты и слоем зимнего промерзания, влажность грунта увеличивается». Для доказательства правильности своих утверждений Евдокимов-Рокотовский ссылается на опыты и наблюдения. Приведенные им данные о миграции влаги в процессе промерзания даны в табл. 18. Эта таблица заслуживает внимания хотя бы уже потому, что она является чуть ли не единственной в литературе, иллюстрирующей динамику описываемого Евдокимовым-Рокотовским отжимания влаги в природных условиях. К сожалению, Евдокимов-Рокотовский ничего не говорит ни об авторе этой таблицы, ни о способе ее получения, а между тем эта таблица, как увидим, рождает ряд недоуменных вопросов, ответа на которые мы у Евдокимова-Рокотовского не находим.

В табл. 18 влажность дана в процентах по отношению к весу, по всей вероятности, сухого остатка. Первый вопрос, который напрашивается при этом: что такое нормальная влажность, о которой говорится в таблице, остается ли она постоянной хотя бы в течение того времени, когда деятельный слой находится в талом состоянии, и как и когда она определена? Второй вопрос: действительно ли из реальных

Таблица 18

Грунт—иловатый супесок, наблюдения произведены возле ст. Букачачи с сентября по ноябрь 1926 г.	Глубина от поверхности земли в *м*								
	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,2	3,27
Нормальная влажность талого грунта до замерзания в %	23,1	23,8	24,1	23,7	22,0	24,2	23,1	24,7	Вечная мерзлота; влажность 43,2% (по весу)
I. Промерзание на глубине 1,12 *м*									
талого	—	—	—	29,7	29,1	30,4	28,9	32,1	
мерзлого	25,4	16,7	14,7	—	—	—	—	—	
II. Промерзание на глубине 2,07 *м*									
талого	—	—	—	—	—	32,8	39,1	43,7	
мерзлого	25,4	16,7	14,7	13,8	14,2	—	—	—	
III. Промерзание на глубине 3,10 *м*									
талого	—	—	—	—	—	—	—	51,1	
мерзлого	25,4	16,7	14,7	13,8	14,2	13,1	14,7	—	

определений получена с таким поразительным постоянством влажность мерзлого грунта на разных глубинах, как это показано в приведенной таблице при трех стадиях промерзания?

В самом деле, если возьмем строки II и III, то влажность мерзлотного слоя на пяти глубинах в обоих случаях сходится до десятых долей, тогда как в действительности две части одной и той же пробы одного и того же образца при анализе обыкновенно дают различную влажность, причем разница нередко доходит до 1% и более.

Попробуем теперь проверить элементарно баланс прихода и расхода влаги. Глубина взятия проб на влажность, указанная в таблице, дает возможность разделить толщу испытуемого грунта при промерзании на 3,1 *м* и глубине залегания вечной мерзлоты 3,27 *м* на восемь слоев следующих толщин: 0,1; 0,5 — 0,1 = 0,4; 1,0 — 0,5 = 0,5; 1,5 — 1,0 = 0,5; 2,0 — 1,5 = 0,5; 2,5 — 2,0 = 0,5; 3,1 — 2,5 = 0,6; 3,27 — 3,10 = 0,17, нормальную влажность которых можно считать соответственно равной 23,1; 23,8; 24,1% и т. д.

Если допустить теперь (это будет недалеко от истины), что объемный вес твердой фазы рассматриваемого грунта одинаков по всей толщине, то нормальное содержание влаги в некоторых условных единицах в упомянутых выше восьми слоях будет соответственно равно 0,1·23,1; 0,4·23,8; 0,5·24,1 и т. д.

После этого рассмотрим, сколько влаги при промерзании до глубины 3,1 *м* потерял промерзший слой и сколько влаги приобрел талый слой.

Первый слой толщиной 0,1 *м* при промерзании по данным таблицы приобрел влаги:

$$(25{,}4 - 23{,}1) \cdot 0{,}1 = 0{,}23 \text{ ед.}$$

Второй слой толщиной 0,4 *м* потерял влаги:

$$(23{,}8 - 16{,}7) \cdot 0{,}4 = 7{,}1 \cdot 0{,}4 \text{ ед.}$$

Третий слой толщиной 0,5 *м* потерял влаги:

$$(24{,}1 - 14{,}7) \cdot 0{,}5 = 9{,}4 \cdot 0{,}5 \text{ ед.}$$

и т. д.

Если проделать такие же вычисления и для остальных мерзлых слоев, то получим, что из слоя, замерзшего до глубины 3,1 *м*, ушло влаги следующее количество:

$7{,}1 \cdot 0{,}4 + 9{,}4 \cdot 0{,}5 + 9{,}9 \cdot 0{,}5 + 7{,}4 \cdot 0{,}5 + 11{,}1 \cdot 0{,}5 + 8{,}4 \cdot 0{,}6 = 26{,}8$ ед., приобрел же этот промерзший слой (см. выше) 0,23 ед.

Таким образом, потеря влаги в промерзшем на 3,1 *м* слое равна

$$26{,}8 - 0{,}2 = 26{,}6 \text{ ед.}$$

Прибыль же влаги в талом слое равна

$$(51{,}1 - 24{,}7) \cdot 0{,}17 = 4{,}5 \text{ ед.}$$

Таким образом, убыль влаги из мерзлого слоя превышает прибыль влаги в талом слое приблизительно в 6 раз, что невозможно. Аналогичной «точности» баланс получается и по другим строкам, при других глубинах промерзания. Впрочем, это не мешает Евдокимову-Рокотовскому через десять страниц ниже (стр. 57) утверждать, что при пучении «наблюдается, хотя обычно незначительное, обогащение вспученного грунта водой».

Каким образом одновременно происходит процесс обезвоживания и обогащения водой, автор не объясняет.

Белокрылов (13, стр. 44) пришел к такому выводу, что с началом промерзания грунтов с поверхности, а вместе с тем и с началом поднятия горизонта вечной мерзлоты избыток воды грунта частью промерзает прослойками льда в толще грунта, а частью отжимается в более теплые места с положительной температурой.

По утверждению Датского (6, стр. 174), выкопанные в ноябре 1927 г. и в январе 1928 г. шурфы на Сковородинской станции показали, что углубляющаяся зимняя мерзлота отжимает воду в талую прослойку, заключенную между зимним промерзанием и вечной мерзлотой.

Таким образом, мы видим, что перемещение влаги в деятельном слое при его замерзании, как об этом говорят Евдокимов-Рокотовский, Белокрылов и др., совсем не соответствует тому процессу перемещения, который должен был бы существовать, если бы существовал процесс подсасывания влаги к замерзающему деятельному слою.

Даже у авторов, как будто бы считающих, что процесс подсасывания реален, мы все же находим указания на совершенно иное распределение влаги, противоречащее этому процессу.

Так, Сумгин, хотя и отмечает (60, стр. 77), что вопрос о миграции влаги при замерзании грунтов еще мало разработан, в дальнейшем дает некоторые схемы перемещения влаги в виде пара как во время зимнего промерзания, так и в период оттаивания. Ему кажется совершенно естественным, что при оттаивании деятельного слоя получается «своеобразное перегонное устройство, в котором конденсатором служит поверхность мерзлого грунта» (60, стр. 125). «Но если теоретически это положение не может встретить возражений, то практически как это выражается в цифрах, мы пока ничего сказать не можем».

Таким образом, здесь для Сумгина остается неясной только количественная сторона явления. Для читателя же остается неясным и то, почему Сумгин полагает, что конденсация паров (так как речь идет о конденсации паров на холодной поверхности мерзлого грунта) возможна, например, в среде, где пустот или вовсе нет или очень мало, как это зачастую бывает в грунтах в районах распространения вечной мерзлоты.

По тем же соображениям можно поставить под сомнение и другое утверждение Сумгина — о конденсации паров на нижней поверхности сезонной мерзлоты.

Далее мы находим у Цытовича указание, что «качественные показатели наличия переувлажненных прослоек грунта над вечно мерзлым слоем имеются в достаточном количестве» (60, стр. 126), и далее, что «наличие переувлажненных горизонтов у верхней границы вечной мерзлоты, надо полагать, дает возможность в любое время года по распределению влажности в грунтах района вечной мерзлоты определить верхнюю ее границу» (60, стр. 126). В доказательство приводится все та же кривая влажности в одной из буровых скважин Усть-Енисейского порта, которая фигурирует в работах Цытовича и Сумгина неизменно с 1930 г., но которая, как мы уже видели (фиг. 41, 42, 43), совершенно не является универсально типовой, как это можно заключить из слов упомянутых авторов.

Некоторые авторы склонны допускать передвижение не только воды, но и полужидких плывунных масс; к этим авторам принадлежат Сукачев, Сумгин (2, стр. 93). Городков (8, стр. 50), Аболин и Дранцын это утверждение оспаривают. Некоторые делят грунты на пучинистые и непучинистые, причем к пучинистым относят илистые и пылеватые суглинки, а к непучинистым — песок. Федосов (46, стр. 41) находит, что типичным представителем пучинистых грунтов является песок, а дающим усадку при замерзании — глина.

Сопоставляя все сказанное, мы видим, что нет не только сколько-нибудь общепринятой теории или удобной рабочей гипотезы, но даже нет сколько-нибудь точно установленных общих фактов. Это печальное положение происходит от сложности вопроса, от недостаточной изученности его, оттого, что многие гипотезы и теории (например, гипотеза об отжатии влаги к границе вечной мерзлоты) строятся и обобщаются на основании случайных единичных наблюдений, и, наконец, оттого, что факты, справедливые и верные для грунтов одного

гранулометрического состава и влажности, распространяются на все грунты и т. п.

Ниже, основываясь на специальных опытах и исследованиях Сковородинской станции, мы постараемся осветить некоторые из приведенных выше сложных вопросов, касающихся миграции влаги и механизма пучения. Что же касается общей исчерпывающей теории пучения, то создание ее придется, конечно, отложить до более полной изученности вопроса.

§ 20. Некоторые лабораторные опыты Сковородинской мерзлотной станции над замораживанием грунтов и др.

Выше уже говорилось о замерзании растворов и взвесей. Мы уже знаем, как лед в стакане с водой, случайно замерзшей на окне только с одной стороны, механически вытеснил тонкий осадок грунта и совершенно очистил ту половину дна, по которой он распространился. Целая серия опытов была произведена нами с замораживанием различных грунтов различной влажности в стеклянных пробирках и в парафиновых трубках для выяснения механизма замерзания и миграции влаги.

Прежде всего интересно было повторить опыты Тэбера над замораживанием грунтов в пробирках, о которых упомянуто выше. Когда замораживались грунты, увлажненные до полной влагоемкости или несколько больше в пробирках сверху, со стороны открытого конца, то пробирки неизменно лопались и получить тэберовские результаты не удавалось. У Тэбера же при таком замораживании пробирки не лопались. То, что пробирки лопались, казалось вполне естественным: замерзая сверху, грунт примерзал и к стенкам пробирки, создавая этим пробку и замкнутое пространство для еще незамерзшей части грунта; незамерзшая вода, пропитавшая грунт, лежащий ниже этой пробки, оказывалась заключенной таким образом в твердую оболочку, которую она и разрывала, расширяясь при дальнейшем замерзании.

Пробирки, в которых производились опыты, имели длину 15 *см*, диаметр 1,35 *см*; наполнялись пробирки грунтом на высоту 12 *см*, считая от дна.

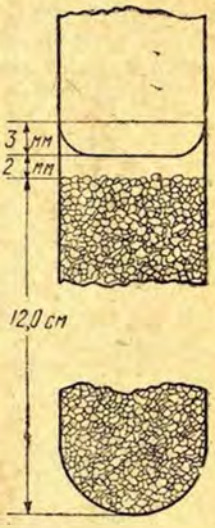
Нечто иное происходило при замерзании снизу. Если замораживался пылеватый или суглинистый грунт, то пробирка, как правило, лопалась, а боковая поверхность в пределах замерзания покрывалась характерными узорами; вода над поверхностью не выступала, грунт вспучивало до 2 *мм*.

Опыт с песком протекал иначе. Одна из пробирок наполнялась песком и водой для заполнения всех пустот так, что зажатого воздуха между отдельными песчинками и водой не было; обозначим эту пробирку буквой *А*. Другая пробирка содержала песок, насыщенный водой, между частицами которого были защемлены пузырьки воздуха; обозначим эту пробирку буквой *В*.

Для удаления воздуха пробирка *А* наполнялась постепенно,

для чего брались небольшие порции песка, насыщенного водой, которые тщательно перемешивались проволокой для удаления воздуха. При постепенном замораживании снизу над песком выступала вода. Высота поднятия воды показана на фиг. 46.

Формы и размеры подъема воды в обеих пробирках были одинаковы. Сам песок не пучился и горизонт его не поднимался, по крайней мере настолько, чтобы это можно было заметить. Пробирка *A* с более плотной упаковкой песка (без воздуха) лопнула; пробирка *B* осталась цела. При оттаивании вода опустилась до прежнего горизонта, песок в пробирке *B* осел на 2 *мм* ниже первоначального уровня, получив таким образом более плотную упаковку (уплотнился); в пробирке *A*, по крайней мере наглаз, этого не наблюдалось. Пробирку с пылеватым грунтом оттаять не представлялось возможным, так как она распалась на несколько отдельных частей.



Фиг. 46. Замораживание (книзу) песка в пробирке

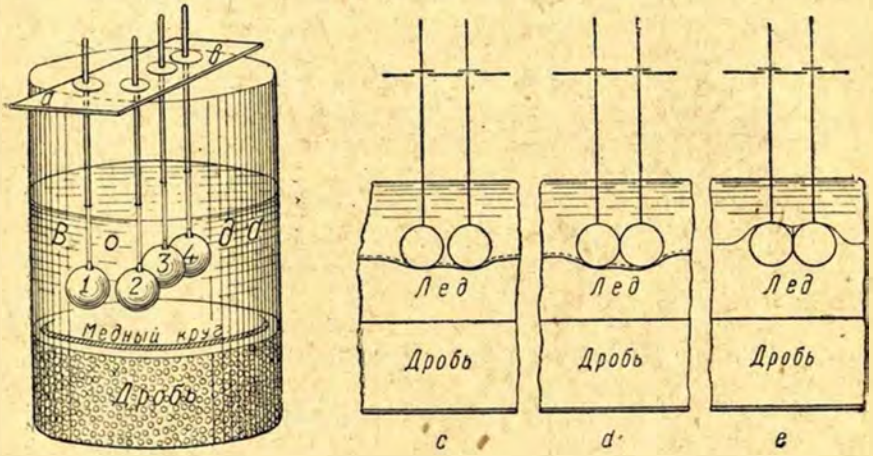
Попробуем разобраться в этих явлениях замораживания песка в пробирках. Крупный и средний песок является единственным грунтом, в котором, по заключению многих исследователей, вода замерзает при 0° и в котором не замерзающей при этой температуре воды нет или почти нет. Как известно, при замерзании воды дело происходит так: когда температура падает до 0°, а извне продолжается охлаждение, то вода замерзает не сразу, а вплоть до полного замерзания одновременно существуют две фазы: твердая и жидкая. Так должно протекать замерзание воды и в порах песка между его отдельными частицами.

Постепенно, когда все новые и новые порции воды превращаются в лед, увеличиваясь при этом в объеме, избыточная вода, не помещающаяся в порах, прогоняется при этом вверх, где и выступает над поверхностью песка. Это движение происходит совершенно свободно, так как до полного замерзания, как сказано выше, часть воды находится в жидком состоянии. Следующим вопросом, подлежащим разрешению, является вопрос о том, почему пробирка *A* с песком без включения воздушных пузырьков лопнула, а пробирка *B* осталась целой. Для выяснения этого были проделаны многочисленные опыты. Приведем некоторые из них.

Опыт с замерзанием в воде металлических шариков

Четыре металлических шарика диаметром 2 *см* каждый были прикреплены менделеевской замазкой к тонким стеклянным трубочкам и подвешены при помощи картонных кружочков и пластинки *ав* так, как это показано на фиг. 47.

Два из этих шариков *1* и *2* были расположены на небольшом расстоянии друг от друга, равном приблизительно 2 — 3 *мм*; два других шарика — *3* и *4* — соприкасались друг с другом. Шарики эти были опущены в цилиндрический стакан, в котором внизу была насыпана свинцовая дробь, прикрытая медным лакированным диском; сверху была налита вода. Дробь как менее теплоемкое и легко проводящее тепло и холод тело была насыпана для осуществления возможно быстрого замерзания находящейся над дробью воды, так как низ стакана предполагалось поместить в охлаждающую смесь, чтобы вести охлаждение снизу. Медный круг был положен для того, чтобы выровнять поверхность, так как шарики были расположены недалеко от диска и желательно было получить по возможности ровную поверхность растущего от этого диска льда.



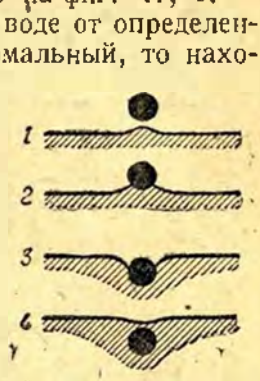
Фиг. 47. Замораживание в воде металлических шариков

Наблюдения дали следующую картину. При охватывании шариков льдом, поднимавшимся от диска, ни сближения, ни расхождения шариков, которые были на некотором расстоянии один от другого, ни разъединения соприкасавшихся шариков не наблюдалось. Ни один из шариков не был приподнят. Не был приподнят растущим льдом и дополнительно поставленный шарик из менделеевской замазки.

Все четыре стальных шарика замерзали следующим образом. Надвигавшийся лед при приближении к шарикам сначала выгибался под ними, как показано на фиг. 47, *c* и *d*, нижняя же половина шариков покрывалась мельчайшими воздушными пузырьками. Эту вдавленность льда под шариками, повидимому, можно объяснить тем, что тепло, находящейся над льдом воды, имевшей температуру +2,0°, передавалось через теплопроводный шарик вниз и мешало замерзанию воды под шариком. Между тем лед, продолжая расти вокруг шариков, охватывал их все более и более, как показано на той же фигуре пунктиром. Благодаря этому охвату и понижению темпера-

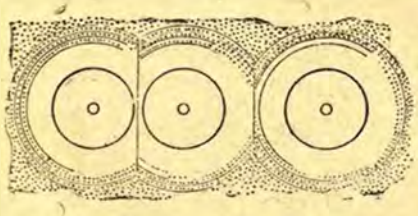
туры воды наступил, наконец, момент, когда шарики перестали передавать тепло и их коснулся лед. С этого момента начинается обратный процесс: благодаря теплопроводности или «холодопроводности» шариков холод передается вверх и шарики начинают обрастать кристально прозрачным льдом, как это показано на фиг. 47, *е*.

Таким образом, если равномерный рост льда в воде от определенным образом охлажденного диска принять за нормальный, то нахождение в этой воде более теплопроводного шарика нарушает этот нормальный рост: сначала рост льда под шариком замедляется, а потом ускоряется.



Фиг. 48. Схема вмерзания шарика из менделеевской замазки. Лед надвигается снизу; *1, 2, 3, 4*—последовательной фазы

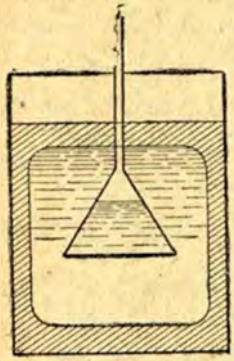
Помещенный рядом с металлическими шариками шарик из менделеевской замазки влиял на замерзание воды по-иному: шарик из этой замазки сначала как бы подтягивал к себе лед, а потом, когда он охватывался льдом, рост льда над этим шариком как бы замедлялся (фиг. 48). Такое же действие, как замазка, оказывал на процесс замерзания и парафин, в небольшой кусочек которого были вплавлены две дробинки, чтобы он не всплывал наверх. Из этого можно было заключить, что теплопроводность и замазки и парафина меньше теплопроводности воды. Лак, которым был покрыт медный диск, сошел и превратился в мелкую желтоватую пыль. Эта пыль гналась нарастающим льдом все время перед собой и находилась на поверхности льда. Когда металлические шарики начали обрастать льдом, эта пыль отгонялась от шариков обволакивающим их льдом и укладывалась около шариков по концентрической окружности, как показано на фиг. 49. Крупные песчинки, брошенные на поверхность льда, быстро затягивались льдом и, повидимому, влияли на процесс замерзания, как металлические шарики.



Фиг. 49. Схема расположения пыли у замерзающих металлических шариков

Кстати, здесь же следует сказать несколько слов и о замерзании воды с насыпанной в нее дробью. Стакан, в котором производился опыт, нижней частью был погружен почти до уровня ледяного диска в охлаждающую смесь из льда и соли, причем температура этой смеси колебалась в пределах от —15° до —21°. В процессе замерзания при такой температуре дробь оказалась включенной в совершенно прозрачный лед: пузырьков и воздушных нитей не было видно; не было также ничего, что указывало бы на направление кристаллизации. Никакого следа пучения дроби обнаружено не было. Стакан, в котором эта дробь замерзала, не лопнул, так что, повидимому, никаких горизонтальных сил не возникло.

Второй опыт имел целью показать, что воздух, включенный между частицами грунта, может играть роль, так сказать, компенсатора. Мы уже знаем, какие бурные явления разыгрываются при замерзании воды со всех сторон, например в каком-нибудь сосуде, когда через некоторый промежуток времени после начала замерзания образуется вокруг незамерзшей внутри воды ледяная оболочка. Эта оболочка при дальнейшем замерзании воды под влиянием сильного гидростатического давления начинает трескаться, коробиться, а вода начинает выливаться наружу и замерзать. Если предварительно перед замерзанием мы вставим в воду воронку, как показано на фиг. 50, то по мере замерзания вода будет вгоняться в воронку, сжимая воздух, и уменьшать гидростатическое давление. Вследствие этого ледяная оболочка трескаться не будет.



Фиг. 50. Перед замораживанием воды в нее опущена воронка. Трубка воронки вверху заделана

Сопоставляя описанные опыты с опытами над замораживанием песка в пробирках, мы можем заключить, что при замерзании песка как с пузырьками воздуха, так и без них замерзающая вода может иметь довольно сложную поверхность, сильно разнящуюся от плоскости. Грубое изображение этой возможной поверхности в увеличенном масштабе дано на фиг. 51, и нет ничего невероятного, что в нарастающем слое льда кое-где могут образоваться небольшие включения незамерзшей воды. В дальнейшем эта вода, замерзая и расширяясь, может разорвать окружающую ее оболочку и создать усилия, направленные в разные стороны, в том числе и горизонтально. Возможно, этим усилиям и надо приписать то, что пробирка *А* лопнула. Чем мельче песок, чем плотнее его упаковка, тем вероятнее появление такого рода включений и горизонтальных сил.

Фиг. 51. Возможная схема замерзания воды в песке (черным показан лед, штриховкой — вода)

В пробирке же *В* с менее плотной упаковкой песка и при наличии пузырьков воздуха эти последние могут играть при замерзании роль компенсаторов и в значительной степени парализовать появление горизонтальных сил. Все эти предположения подлежат проверке и в настоящее время могут быть приняты только как более или менее вероятные. Что же касается давления кристаллов растущего льда, то, повидимому, если таковое существует, то оно ничтожно, так как большие и маленькие шарики из разных веществ не поднимались растущим льдом, и только легкая

пыль, образовавшаяся от лака, гналась нарастающим слоем льда перед собой.

Для того чтобы выяснить, может ли свободно растущий кристалл льда производить давления и совершать какую-либо работу, были произведены опыты с почти уравновешенным шариком. Здесь приходится употреблять слово «почти», так как грубость применявшихся приборов не позволяла установить, в какой мере шарик являлся уравновешенным.

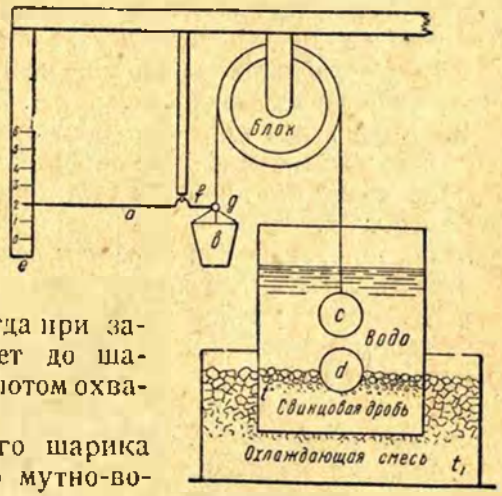
Результаты опытов (см. протокол опытов) говорят о том, что если свободно растущий лед и может производить давление и совершать работу, то только в весьма незначительных размерах. Конечно, все сказанное относится только к кристаллам, растущим в воде, в которой при их росте не возникает гидростатических напряжений, например в воде со свободной поверхностью и т. п.

К сожалению, нам не удалось найти в литературе точные указания на размеры силы давления растущих кристаллов льда. Интересно, что для алюмокалиевых кристаллов эта сила оказалась равной приблизительно 0,1 *г/см*² (Шубников А. В., «Как растут кристаллы», 1935 г., стр. 83).

Сковородинская НИМС, апрель 1935 г.

Протокол опыта 25 апреля 1935 г.

c и *d* — стальные шарики диаметром 2 *см* (фиг. 52); расстояние между шариками около 0,5 *см*; *a* — указатель из тонкой проволоки с отношением длины плеч, равным 1 : 5. Указатель в точке *g* прикреплен к противовесу *b*, уравновешивающему груз *c* и реакцию опоры указателя в точке *g*. В точке *f* указатель может лишь вращаться, указывая другим концом на шкале *e* в 5 раз увеличенную величину перемещения точки *g*, равного перемещению шарика *c*. Вопросы: переместится ли шарик *c* и если переместится, то насколько? Когда при замораживании снизу лед дойдет до шарика *c* и начнет его касаться, а потом охватывать?



Фиг. 52. Схема установки опыта (1935 г.)

Начиная с 1 ч. 40 м., нижнего шарика не видно из-за охватившего его мутно-волокнистого льда.

Последовательные этапы замерзания показаны на фиг. 53.

Указатель в 1 ч. 30 м. поднялся по шкале на 0,5 *мм* при оценке десятых частей миллиметра на-глаз, что соответствует действительному перемещению в 0,1 *мм*.

Таблица 19

Время	Температура в °С		Примечания
	дроби t_1	смеси t_2	
12 ч. 25 м. дня	+0,4	—21,2	
1 ч. 00 м. дня	—3,8	—20,6	Начало обледенения шарика
1 ч. 15 м. дня	—4,8	—20,6	Расстояние между шариками заполнилось льдом
1 ч. 30 м. дня	—6,6	—20,0	Указатель как будто поднялся по шкале на 0,5 *мм*
1 ч. 40 м. дня	—7,1	—20,0	
1 ч. 50 м. дня	—10,0	—19,5	Указатель показывает подъем, не превышающий 0,6 *мм*
2 часа дня	—10,2	—19,6	

26 апреля опыт был повторен с той разницей, что в начале опыта шарики были приведены в соприкосновение. Картина замерзания та же, что и в предыдущем опыте. Указатель поднялся в начале обледенения верхнего шарика по шкале на 0,8*мм*. Увидеть разъединение шариков не было возможности.

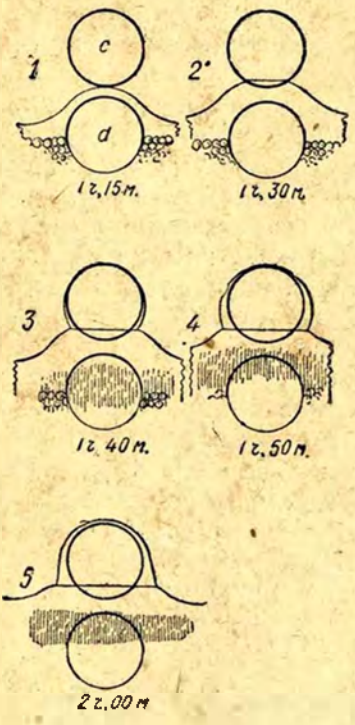
27 апреля был повторен тот же опыт, но со следующими изменениями: дробь была заменена опрокинутым медным тиглем, в соприкосновение с дном которого и был приведен шарик *c*, как показано на схеме фиг. 54.

Указатель, блок и противовес оставлены без изменения. Контакт шарика *c* с тиглем *T* контролировался при помощи тока *E* и гальванометра *G*. Привод к гальванометру на протяжении *mn*, т. е. в пределах воды, был изолирован. Если бы шарик перестал касаться тигля, ток прекратился бы.

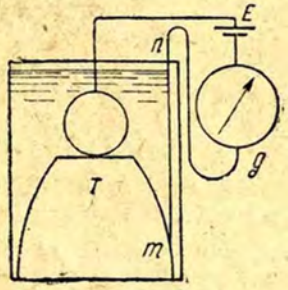
Опыт начался в 4 ч. 40 м. Замерзание шло медленно. Сначала под шариком наблюдалась вогнутость льда, как в опыте, когда нарастание льда шло от медного диска. В 7 час. поверхность и дно тигля начали покрываться льдом и ток падал почти до нуля. В 7 ч. 25 м. начиналось обледенение шарика *c*. Лед над тиглем был почти прозрачный. Индекс поднялся на 2,3 *мм*, что соответствовало действительному подъему шарика почти на 0,5 *мм*. Любопытно, что когда шарик уже обледенел, температура воды у шарика была от +0,6 до +0,8°. Термометр был расположен, как показано на схеме фиг. 55.

Таблица 20

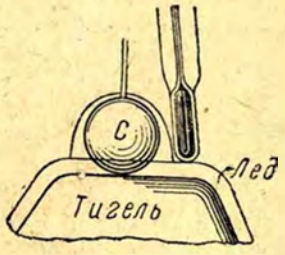
Время наблюдения	Показания по шкале указателя в мм	Температура в °С: воды в стакане	Температура в °С: охлаждающей смеси	Показания гальванометра
5 ч. 40 м. дня	19,0	От +0,0 до +2,0	—20,4	Ток сильнее
5 ч. 50 м. дня	19,2	От +0,3 до +1,2	—20,4	То же
6 ч. 30 м. вечера	19,2	У шарика +0,6	—17,0	» «
7 ч. 00 м. вечера	19,4	У шарика +0,6	—12,0	Ток упал почти до нуля
7 ч. 25 м. вечера	21,0	У шарика +0,8	—12,0	Отклонение около 0,5 деления
7 ч. 30 м. вечера	21,3	У шарика +0,6	—12,0	Отклонение около 0,1 деления



Фиг. 53



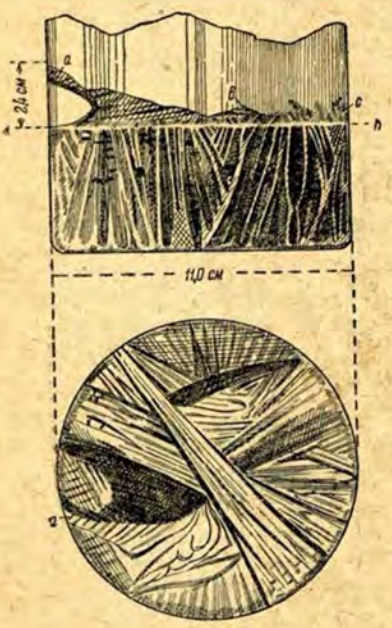
Фиг. 54



Фиг. 55

Учитывая все сказанное, вряд ли можно всегда утверждать о направленности роста кристаллов при замерзании грунтов, как это делает Тэбер, говоря, например, о радиальном росте кристаллов внутрь к оси пробирки при замораживании влажных глин, если это замораживание идет с боков. По всей вероятности, как увидим далее, это возможно лишь тогда, когда мы имеем переувлажненный грунт (суспензию), и вряд ли возможно в грунтах, увлажненных даже до полной влагоемкости.

Остановимся теперь на рассмотрении замерзания пылеватых грунтов и на выяснении причин, почему при их замораживании пробирки обязательно лопаются. По исследованиям гидрогеологов, скорость передвижения воды в этих грунтах даже при значительных напорах весьма мала. В этом, по всей вероятности, лежит причина разрушения пробирок.



Фиг. 56. Замораживание сверху сильно увлажненного пылеватого грунта. Влажность около 125% по отношению к сухому веществу (по весу). Сковородинская НИМС, 1935 г.

При замораживании пробирки с илистым или пылеватым грунтом процесс может вначале протекать так, как и при замерзании песка, т. е. часть воды, расширяясь, перейдет в твердую фазу, а незамерзшая вода будет при этом выгоняться из пор, но так как сопротивление этому передвижению воды велико, то она не успеет, как в случае с песком, выступить наружу, а будет настигнута надвигающимися отрицательными температурами и заморожена. В процессе этого замерзания неизбежно возникновение гидростатических напряжений, направленных во все стороны, от которых и происходит разрушение пробирки. Если бы было возможно осуществить постепенное замерзание с такой скоростью, с какой в пылеватых грунтах может продвигаться вода, то при таком замораживании и в этих грунтах, надо полагать, не возникало бы горизонтальных напряжений.

Кроме опытов с замораживанием грунтов в пробирках были проделаны еще следующие опыты. Пылеватый грунт, сильно переувлажненный (влажность 125% по отношению к сухому грунту), замораживался сверху в стеклянном цилиндре диаметром 11 *см*, для чего он был помещен во время промораживания в ящик с опилками. После нескольких часов промораживания оказалось, что верхняя поверхность грунта была покрыта тонкой корочкой льда и имела неровный вид, как изображено на фиг. 56. В одном месте грунт выперло наружу,

очевидно, через «окно», подобное тем окнам, которые наблюдаются при замерзании воды, о чем сказано выше. Выпертый грунт, обозначенный на чертеже буквой *a*, выступил за пределы горизонта *hh* на высоту 2,4 *см* и уперся в стенку стеклянного цилиндра; в другом месте грунт выступил в виде трехгранной пирамиды *b*. Грунт *c*, случайно во время установки покрывший тонкой пленкой стенку стакана, замерз, образовав изображенный на фигуре узор; более светлые полоски соответствуют чистому льду, более темные — замерзшему влажному грунту.

Если мы посмотрим на стакан сбоку, то увидим более светлые полоски и более темные, причем более темные во многих местах имеют еще горизонтальные членения (на чертеже еще более темные). Более светлые полоски, дающие своеобразный разветвленный узор (схема образования которого указана на фиг. 57), — это грунт, непосредственно прилегающий к стеклу стакана; более темные места—лед, отодвинувший грунт от стенки стакана; льдом образованы и более темные горизонтальные членения. Замерзание не было доведено до конца, и грунт замерз не весь, представляя ниже замерзшей верхней корки полужидкую массу все еще сильно увлажненного грунта, сплошь пронизанную полосками, которые для краткости назывались «пилами». Эти ледяные полоски, или пилы, имели вид, изображенный на фиг. 35, где они даны в натуральную величину. Толщина их в момент исследования была незначительна — 1 — 2 *мм*, и они ничем не отличались от аналогичных образований в чистой замерзающей воде. Отделялись они от незамерзшего грунта, имевшего консистенцию густой сметаны, совершенно легко.

Фиг. 57. Схема узоров на внешней поверхности замерзших пылеватых грунтов

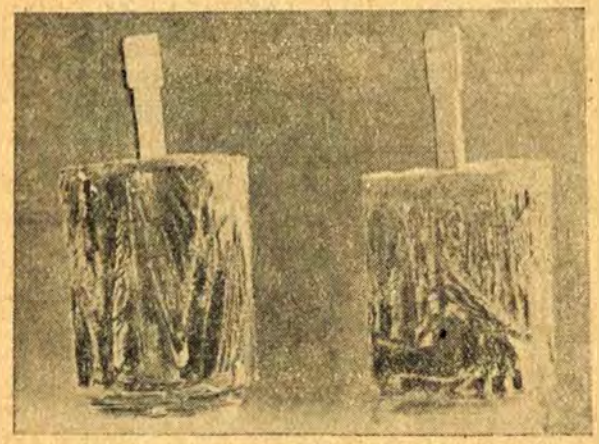
Второй опыт заключался в замораживании переувлажненного тоже пылеватого грунта в двух цилиндрических жестяных банках. Замораживание велось сверху. В замораживаемый грунт были погружены две палочки: одна деревянная, другая металлическая (оловянная). Обе палочки во время замерзания поддерживались особым приспособлением, состоящим из двух параллельных дощечек, так что палочки не могли погружаться вниз сверх установленной границы, но могли совершенно свободно подниматься. Замораживание велось до конца, пока весь грунт окончательно замерз. Вынутый из жестянок грунт с двумя вмерзшими палочками изображен на фиг. 58.

Деревянная палочка при замерзании грунта поднялась на 1,7 *мм*, металлическая немного больше — около 2,2 *мм*. Анатомия мерзлых масс замерзшего грунта обнаружила следующее.

Для образца грунта с вмерзшей металлической палочкой (фиг. 59) на чертеже кроме схематического общего вида даны три разреза: два горизонтальных под вмерзшей палочкой и один по оси; в последнем разрезе сама палочка удалена. Грунт разрезался ножом. При резании грунт напоминал твердую халву. При резании тонким слоем этот слой загибался наподобие стружки.

На горизонтальных разрезах мы видим постепенную концентрацию воды у центра и по приближении к металлической палочке. В сечении по *cd* мы видим просвечивающий прямоугольник чистого льда, соответствующий сечению оловянного стержня. Темная рамочка по периметру соответствует тому футляру из чистого льда, который образовался вокруг стержня и который виден в сечении по *ab* опять-таки в форме темных вертикальных полосок. Темные жилки на всех сечениях соответствуют включениям чистого льда, который, как видно, концентрируется вблизи металлического стержня.

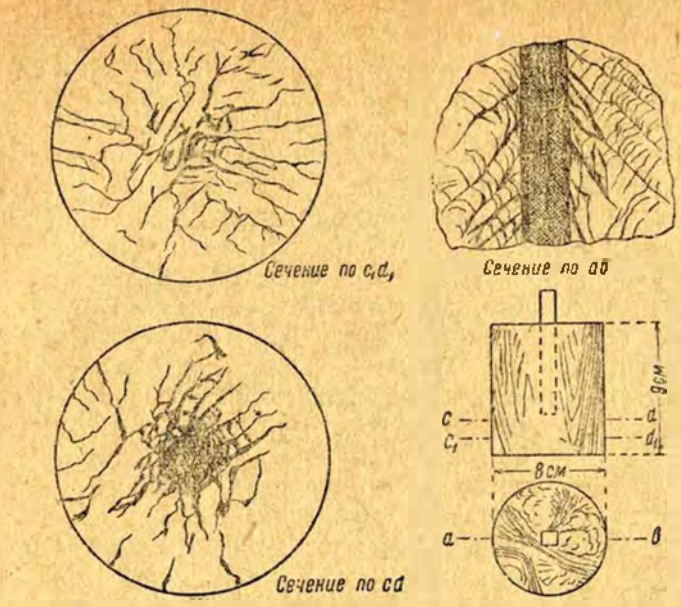
Образец грунта с вмерзшей деревянной палочкой дан на фиг. 60. Совсем иначе протекало замерзание с деревянной палочкой. Хотя внешний узор почти такой же, но разрезы грунта дают совсем иную картину. Концентрации влаги в центре горизонтальных сечений и ледяного футляра вокруг палочки не наблюдается.



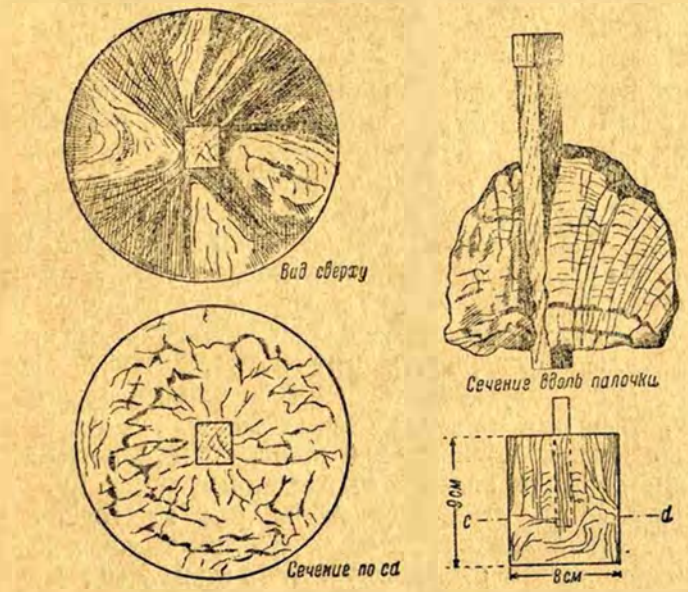
Фиг. 58. Слева палочка из олова, справа — палочка из дерева

Последние опыты, повидимому, говорят о том, что при соответственном понижении температуры в переувлажненных пылеватых грунтах процесс замерзания протекает следующим образом: в местах наибольшего содержания воды и, следовательно, наименьшей концентрации твердых частиц грунта, т. е. в местах, замерзающих при более высоких температурах, начинается образование плоских пилообразных кристаллов льда, раздвигающих легкие, удобоподвижные частицы грунта и присоединяющих к себе все новые порции превращающейся в лед и расширяющейся при этом воды. Этот процесс начинается, конечно, в тех местах, где грунт наиболее охлажден, почему эти области в результате и должны явиться наиболее обогащенными водой. При замораживании сверху областью наибольшего увлажнения является верхняя поверхность, при замораживании снизу — нижняя, при замерзании со всех сторон — периферия, а при погружении теплопроводного тела, например металлической палочки, — и эта палочка, так как по ней проникает холод вглубь и у поверхности начинается кристаллообразование воды, притягивающей в этом процессе все новые частицы воды и отталкивающей частицы грунта.

Однако в самом процессе образования пил уже заложен предел возможности их развития, так как чем более влаги идет на образование пил, тем беднее влагой становится оставшийся грунт, тем плотнее



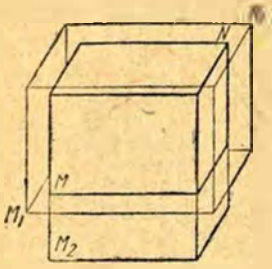
Фиг. 59. Замораживание грунта сверху с металлической палочкой



Фиг. 60. Замораживание грунта сверху с деревянной палочкой

делается упаковка его частиц, тем менее подвижными они делаются, тем более сопротивляются силам, стремящимся их переместить, а а также движению через них воды. В таком уплотненном грунте уже нет места для развития пил, кристаллизационные силы уже не могут перемещать отдельные частицы и при пылеватых грунтах вода, застигнутая в порах надвигающимся охлаждением, замерзает в них, расширяясь и раздвигая частицы грунта.

Однако, если нормальное развитие пил прекращается, то это еще не значит, что грунт замерзает в однородную массу. В грунтах, в достаточной мере увлажненных, но все же таких, где свободное развитие пил уже не может иметь места, ледяные образования все же развиваются. Чрезвычайно неправильные, иногда очень тонкие ледяные поверхности разрезают грунт по всем направлениям, разбивая его на отдельные более или менее крупные комки, на которые при оттаивании грунт легко распадается. Вследствие этого структура грунта, только что приготовленного в лаборатории, с которым по большей части и оперируют, существенно разнится от грунта, уже промерзшего.



Фиг. 61

В естественных условиях расширение грунта возможно лишь вверх, так как расширению в стороны препятствует, вообще говоря, такое же стремление к расширению соседних участков грунта, а расширению вниз—развивающееся с давлением сопротивление нижележащих слоев, тогда как перемещению вверх мешает сопротивляться лишь вес вышележащих слоев.

С расширением воды при замерзании ее в порах грунта связано и некоторое перемещение замерзающей массы вверх, связанное с перемещением уже самих частиц грунта. В самом деле, объем грунта, имеющий вид прямоугольного параллелепипеда MN, свободно замерзая и расширяясь во все стороны, должен превратиться в подобный ему параллелепипед M_1N_1 (фиг. 61). Замерзая же в описанных выше условиях, он должен превратиться в параллелепипед N_2M_2, равновеликий параллелепипеду M_1N_1.

Весьма вероятно, что при таком изменении объема происходит перемещение не только воды, но и частиц грунта. До более обстоятельного изучения этих перемещений влаги и частиц мы ограничимся изложенным, фиксируя внимание лишь на том, что в пылеватых, сильно увлажненных грунтах при замерзании, несомненно, наблюдается перемещение влаги к охлаждаемым участкам, а само замерзание связано с перемещением частиц грунта по отношению одна к другой. Что касается песка, то там, как выяснено выше, влага отжимается от замерзающих участков и эти участки в мерзлом виде являются в результате более бедными водой.

Для уточнения и более полного обоснования этих явлений весьма полезно познакомиться с серией лабораторных опытов, проделанных на Сковородинской станции П. Н. Каптеревым. Мы не будем приводить

всех его опытов, так как их было сделано более 150 и результаты их однородны, а ограничимся лишь наиболее характерными, чтобы, с одной стороны, познакомить с методикой, а с другой, — с порядком тех цифровых данных, которые при этом получаются.

Все эти опыты можно разделить на четыре группы:

1) замораживание с подтоком воды;

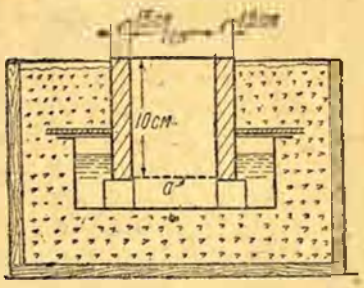
2) замораживание уравновешенных образцов;

3) замораживание в парафиновых трубках и в стеклянных кубиках с последующим анализом влажности;

4) замораживание свободного образца без какой-либо оболочки тоже с последующим анализом на влажность.

Замораживание с подтоком, правильнее со свободным доступом воды, велось так, как изображено на фиг. 62.

Песок, пропущенный через сито, имел частицы в 1 *мм* и замораживался сверху в парафиновом цилиндре, толщина стенок которого равнялась 1,5 *см*. Снизу песок был прикрыт латунной сеткой *а* с отверстиями в 0,4 *мм*. Влажность песка соответствовала 25% (к сухой навеске). Первые двое суток вся установка простояла при температуре, не спускавшейся ниже нуля, а вслед за этим трое суток стояла при температуре —4° и несколько ниже. Поверхность песка при этом высохла, так что его можно было сдувать; это на третий день и было сделано, причем толщина сухого сдутого слоя оказалась равной приблизительно 0,5 *см*. Под сухим песком оказалась ровная поверхность замерзшего песка. Вслед за этим в тот же день цилиндр был исследован и вскрыт: снизу латунной сетки были две пальмовидные ледяные пластинки, вплотную примерзшие к сетке. Вода в цинковой ванне была покрыта тонким слоем льда. Подсасывание воды могло происходить свободно все время. Внизу слой песка толщиной около 2 *см* оказался талым и переувлажненным; остальной песок был мерзлым и очень крепким (кроме верхнего сухого слоя, о чем сказано выше). Анализ показал, что влажность талого песка снизу равнялась 26% (к сухой навеске); влажность середины 24,5% и влажность верхнего мерзлого слоя равнялась 25%. Иначе говоря, никакого подсасывания при замерзании песка при таких условиях опыта не происходит.

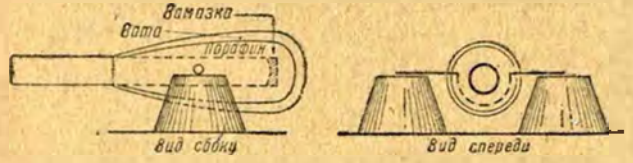


Фиг. 62. Замораживание песка при доступе воды снизу

Замораживание уравновешенных образцов заключалось в том, что, как показано на фиг. 63, грунт в стеклянной трубке, заделанной с одной стороны менделеевской замазкой и предварительно с той же стороны утепленный, подвешивался в уравновешенном состоянии, как показано на фигуре, и в таком виде выставлялся на мороз. Замораживание начиналось с неутепленного конца. Для песка через 40 мин. равновесие нарушалось и утепленный конец опускался.

Способ такого исследования имеет тот недостаток, что равновесие нарушается здесь не только от миграции влаги, но иногда и вследствие перемещения центра тяжести самой массы грунта, который, расширяясь, выдавливает дно.

Рассмотрим замораживание в парафиновых трубках разной длины с внутренним диаметром 2 *см*. Этих опытов, давших совершенно сог. а:ные результаты, было произведено больше ста. Опыты велись с песком и с пылеватыми грунтами различной влажности и различного гранулометрического состава. Трубки замораживались сверху, снизу и в горизонтальном положении, чтобы выяснить, не играет ли какой-нибудь роли вес перемещаемой влаги. Грунт замораживался, как уже сказано, в парафиновых трубках. Эти трубки с грунтом (фиг. 64), прикрытым медными кружочками (причем кружки давления на грунт не оказывали, так как опирались на стенки парафиновой трубки), помещались в алюминиевые бюксы, т. е. небольшие цилиндрические коробочки с крышками, которые и приводились в соприкосновение с охлаждающей смесью (снег + соль при температуре от —19° до—20°). Помещение трубок в бюксы, изображенное на фиг. 64, применялось на случай появления трещин в парафине и во избежание случайных соприкосновений грунтов с охлаждающей смесью. В целях укрепления парафиновых трубок в бюксах, а также для изоляции от холода, который мог по бюксе передаться грунту, трубки предварительно обвертывались ватой и в таком виде вкладывались в бюксы. После замораживания парафиновые трубки вскрывались, грунт делился ножом на две или три части и весь сдавался в лабораторию для определения влажности. Сумма всей влаги, отнесенная ко всему сухому остатку, контролировала общую первоначальную влажность образца.



Фиг. 63. Замораживание грунта в стеклянной трубке

Фиг. 64. Заделка парафиновой трубки с грунтом в буксу

Некоторые из результатов этих опытов с песком (со ст. Ушумун), пропущенным через сито с отверстиями 0,25 *мм* и промытым до прозрачности воды, даны в табл. 21.

В табл. 22 даны результаты опытов с замораживанием пылеватого суглинка, взятого с площадки Сковородинской станции. Состав суглинка, который определялся по способу Рутковского, следующий: песка 7,0%, пыли (частицы от 0,25 до 0,006 *мм*) 78,1%, глины 14,9%. Замораживание ведется сверху. Цинковая ванна с охлаждающей смесью ставится сверху бюкс. Вся группа бюкс окутывается снаружи полотенцем.

Повидимому, в этом опыте с замораживанием после оттаивания огромное значение имеет происходящее при замерзании образование

Таблица 21

Дата	Условия опыта	% влажности в сухой навеске: холодный конец	% влажности в сухой навеске: теплый конец	% влажности в сухой навеске: первоначальная общая влажность	Примечание
23/VII 1935 г.	Замораживание в вертикальном положении снизу	20,7 (низ)	24,0 (верх)	22,1	Сверху получился ледяной слой около 1 *мм*. Медный кружочек, прикрывавший верхний конец, приподнялся
То же	То же	22,3	27,0	24,1	
»	»	22,0	25,4	24,3	
»	Замораживание сверху	22,6	23,7	23,0	
»	То же	22,9	24,0	23,4	

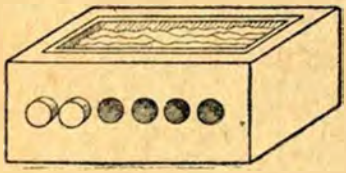
Таблица 22

Условия опыта	Влажность холодного верха в %	Влажность нижней части в %	Средняя амплитуда изменения влажности в %	Примечание
Первое замораживание (без оттаивания)	41,6 42,1	38,8 40,2		Все породы сдавались в анализ в мерзлом состоянии. По наблюдениям Каптерева, даже при противодействии силы тяжести влага все же движется к холодному концу
Второе замораживание (после оттаивания в течение суток)	41,8 42,6 42,0 41,3	39,2 38,8 41,4 40,2	2,1	
Третье замораживание (после суточного оттаивания)	40,6 42,7 43,3 43,3	36,2 36,7 36,8 37,5	5,7	

структуры переувлажненного грунта, причем образуются достаточно широкие ходы. Образцы подвергались после оттаивания еще четвертому замораживанию, которое дало аналогичные результаты при амплитуде в 6,1%. Аналогичные результаты получились и при замораживании в горизонтальном положении. Для этого цинковая ванна с охлаждающей смесью окружалась деревянной рамой с отверстиями, куда и вставлялись бюксы (фиг. 65).

П. Н. Каптерев делает следующие замечания по поводу этих опытов. Все породы сдавались в анализ в мерзлом состоянии, но у «теплого» конца грунт часто не был вполне твердым, а напоминал резину. У холодного конца даже после первого замораживания было заметно выступление воды (льда), но в несравненно больших размерах это наблюдалось после второго и особенно после третьего замораживания. Воды выступало столько, что после оттаивания ее можно было сливать.

В горизонтальном положении замораживалось 12 трубочек с грунтом. Сперва морозились все трубки; после первого замораживания было взято 3 трубки для производства анализа, после второго замораживания — 4 трубки, а после третьего замораживания — остальные 5 трубок. После третьего замораживания у холодного конца оказались линзы чистого льда с сильной выпуклостью, направленной внутрь грунта, так что грунт оказался отодвинутым в глубь трубки.



Фиг. 65. Замораживание грунтов в горизонтальном положении

Аналогичные опыты с пылеватыми грунтами, увлажненными до полной капиллярной влагоемкости, дали такие же результаты. Грунтом наполнялись сосуды — кубики размерами 6 × 6 × 6 *см*, склеенные менделеевской замазкой из стеклянных пластинок. Замораживались эти кубики последовательно сверху, снизу и со всех сторон, и во всех случаях влага стремилась к охлаждаемым поверхностям.

Чрезвычайно интересный опыт проделан П. Н. Каптеревым с замораживанием песчаной «бабы», сделанной так, как ее делают дети. Такая «баба» диаметром 7,5 *см* и высотой 8 *см* была сделана на стеклянной пластинке и замораживалась свободно, без всяких стенок. Песок для ее выполнения был взят крупностью от 0,5 до 0,25 *мм*. После промораживания поверхность ее оказалась сухой (кроме дна, стоявшего на стеклянной пластинке).

Были взяты пробы на влажность: одна сверху, одна из середины, одна снизу и четыре с боков. Их влажность оказалась следующей: сверху 16,4%, снизу 19,3%, с боков 18,0%, 19,4%, 19,4% и 17,8% и из середины 21,9%. Здесь произошло перемещение влаги к середине, т. е. нечто совершенно обратное тому, что наблюдал Сумгин (10, стр. 19), делавший замораживание в других условиях и, вероятно, с другими грунтами.

Остановимся далее на опытах с замораживанием грунтов с влажностью, не достигающей полной влагоемкости. Эти опыты показали, большую трудность изготовления образцов однородной влажности, на что, между прочим, указывает и Лебедев (30, стр. 13).

Три части старательно изготовленного образца до замораживания дали при анализе на влажность следующее содержание влаги: 23,4%, 27,4% и 27,0%. Отсюда вытекает сомнительность экспериментов с таким грунтом.

При замораживании пылеватого суглинка в парафиновых трубках методом, о котором подробно сказано выше, получились результаты, приведенные в табл. 23.

Таблица 23

Трубки	Процент влажности к сухой навеске			% влажности до опыта
	холодный конец	середина образца	теплый конец	
Первая	27,2	26,9	27,7	27,2
Вторая	26,8	27,3	28,4	27,4

Эти результаты показывают, что никакой заметной миграции влаги при этом не происходит и что переход влаги в парообразном состоянии если и существует, то сколько-нибудь значительного влияния на перераспределение влаги при быстром замерзании не оказывает.

Остановимся еще на некоторых лабораторных опытах и наблюдениях. На фиг. 66 показана схема опыта замораживания пылеватого грунта в условиях возможного подтока воды. На чертеже показан получившийся при этом очень мелкий узор ледяных прожилков как снаружи, так и внутри. Никакого пучения при замерзании не наблюдалось, и стеклянный сосуд, в котором находился замерзающий сверху грунт, не лопнул. Не делая из этих фактов никаких выводов, так как этим изучение вопроса, конечно, не исчерпывается, приходится лишь отметить известную сложность этого вопроса, не охватываемую теми схемами, которые придуманы некоторыми исследователями.

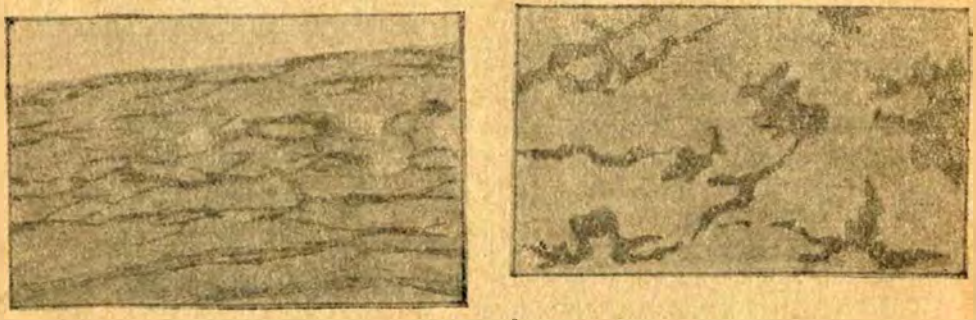
Фиг. 66. Опыт замораживания сильно пылеватого грунта с возможным подтоком воды (2/3 натуральной величины)

Другой опыт, на котором следует остановиться, заключается в самом обыкновенном замораживании пылеватого суглинка сверху. Грунт был помещен в картонный пропарафиненный цилиндр. Цилиндр этот

был зарыт в сухие опилки, находившиеся в деревянном ящике, так что открытой оставалась лишь верхняя поверхность грунта. После замораживания оказалось следующее. Грунт выпучило на 3,0 *мм* со стороны теплого, зарытого в опилки, конца. Верхняя поверхность в общем осталась горизонтальной, но покрылась узором, показанным на фиг. 67. Появлением этого узора была обусловлена и некоторая неровность верхней поверхности. Наиболее выступавшие ее части имели более светлый тон и казались как бы подсушенными. Картонный цилиндр был совершенно цел и не деформирован, за исключением дна. Снаружи наблюдались обычные узоры. Разрезы, сделанные перпендикулярно оси, дали совершенно различную структуру в средней и нижней частях цилиндра, а на продольном разрезе по оси в нижней половине в некоторых прожилках были обнаружены пустоты. Не касаясь динамики замерзания, на которую как будто бы указывает узор прожилков, зарисованных с возможной тщательностью, остановимся

Фиг. 67. Замерзание сверху

Замораживаемый грунт помещался в картонном парафинированном цилиндре. Снизу и с боков цилиндр окружался опилками.



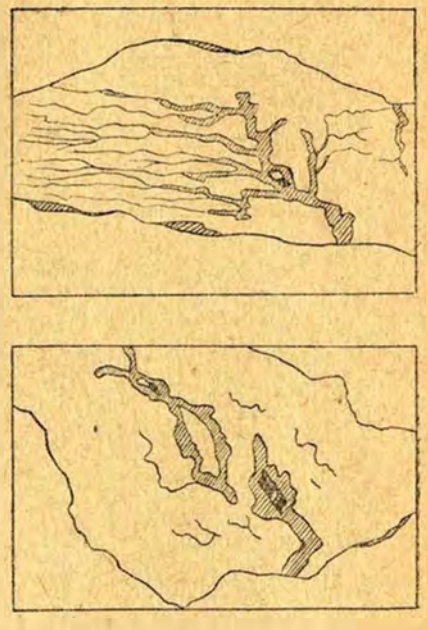
Фиг. 68.

Слева—мерзлый грунт вечно мерзлого слоя—вертикальный разрез; справа—то же—горизонтальный разрез. Игарка, сентябрь 1933 г.

лишь на факте обнаружения пустот. Пустоты наблюдаются не только в лабораторной обстановке, но и в природе. Так, на фиг. 68 даны вертикальный и горизонтальный разрезы замерзшего серого пылеватого

суглинка, взятого в Игарке. На вертикальном разрезе ясно выраженных пустот мы не видим, но видим в некоторых прослойках как бы столбчатое строение, отчасти напоминающее тонкие стеклянные волокна, имеющие атласный блеск. В этих местах ледяных прослоек, очевидно, не все пространство заполнено льдом. К сожалению, из-за отсутствия надлежащих приборов рассмотреть подробнее структуру этого образования не удалось.

В другом куске вечно мерзлого грунта в Игарке, взятом с глубины не более 1 *м* и данном в разрезах на фиг. 69, были найдены ясно выраженные пустоты, покрытые инеем и кристалликами льда. Эти пустоты наблюдались в прожилках, заполненных льдом. Вопрос о наличии и происхождении этих пустот является чрезвычайно интересным, но не разработанным. Пустоты, видимые простым глазом (вроде только что описанных), хотя и встречаются, но не являются правилом. Что же касается микротрещин и микропустот, существование которых некоторым исследователям кажется столь вероятным и даже необходимым как явление, сопутствующее замерзанию влажных грунтов, то вопрос этот нужно считать пока совершенно не выясненным. Невыясненным является и вопрос о перемещении, или миграции, переувлажненных плывунных масс, несмотря на то, что лабораторные опыты Сковородинской станции — как приведенные выше, так и многие другие — с несомненностью показывают возможность такого перемещения. Невыясненным является в первую очередь генезис в природных условиях этих плывунных масс.



Фиг. 69

Вверху вкрапления льда вертикальный разрез на глубине 0,7 *м*; внизу — вкрапления льда — горизонтальный разрез того же куска. Черным показаны пустоты, белым — кристаллы льда

Получить плывунную массу в ступке в лаборатории совершенно легко, но выяснить, как она образуется в естественных условиях, не так просто.

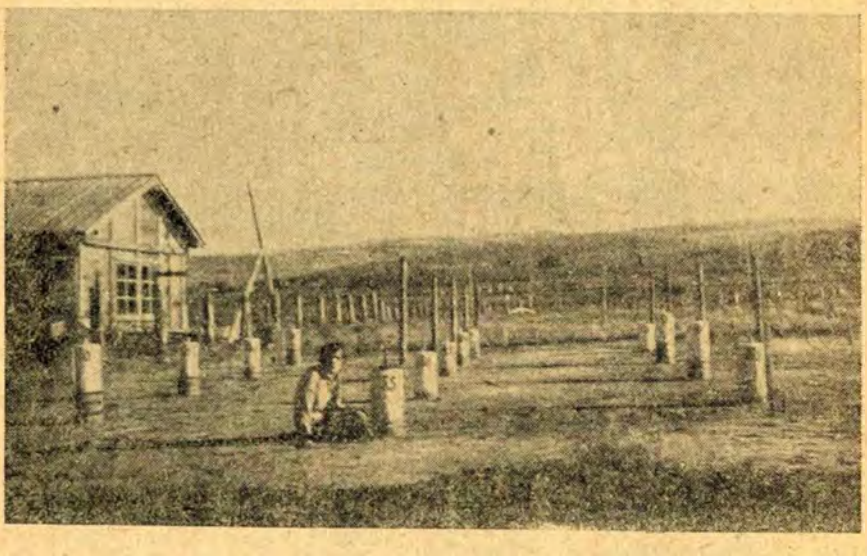
§ 21. Анализ пучения в естественных условиях

Анализ пучения 12 столбов на оголенной площадке

Мы уже рассмотрели выше общую картину пучения и те объяснения, которые дают этому явлению различные исследователи в связи с процессом замерзания и наличием и перемещением влаги. Чтобы бо-

лее подробно разобраться в этом, опишем сначала те опыты и установки, которые были осуществлены на территории Сковородинской станции, и те итоги, которые получились в результате наблюдения за этими установками.

Прежде всего нужно отметить одну из наиболее старых (1930 г.) установок станции, а именно установку на оголенной площадке 12 деревянных стульев, или столбов, заглубленных на 0,5; 1; 1,5 и т. д., вплоть до 6 *м*. Установка этих столбов производилась следующим образом. Столбы до 2,5 *м* устанавливались в вырытых для этого ямах и затем засыпались землей из отвала. Что же касается столбов с большим заглублением, то установка их производилась так: сначала вырывалась обыкновенная яма до глубины залегания мерзлого грунта,



Фиг. 70. Оголенная площадка Сковородинской НИМС (столбы пучения)

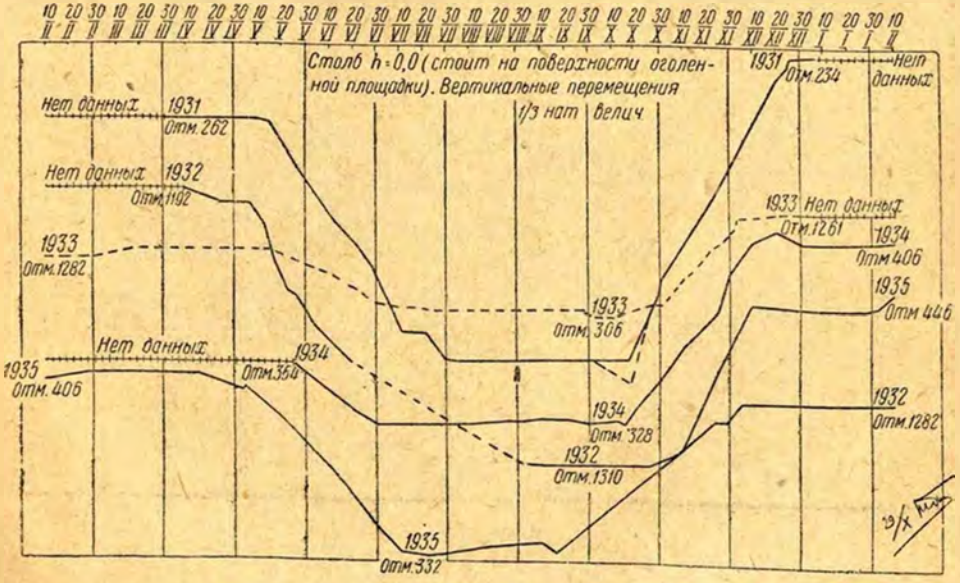
а потом высверливалось круглое цилиндрическое отверстие, куда и вставлялся цилиндрический столб. По установке столбы эти в пределах вырытой ямы засыпались землей. Место расположения этих столбов на оголенной площадке показано на плане станции (фиг. 10). Общий вид этой установки, состоящей из 12 столбов, дан на фиг. 70, а отдельного столба —на фиг. 71. Диаметр установленных столбов равнялся 25 *см*; расстояние между столбами было 3 *м*. Кроме 12 столбов, которые, как сказано, были зарыты на разную глубину, был еще установлен тринадцатый цилиндр (деревянный) прямо на поверхности площадки. И этот свободно стоящий столб и остальные заглубленные столбы были снабжены наглухо приделанными к ним рейками, разделенными на сантиметры, которые и нивелировались (фиг. 71).

Неподвижным репером служила железная трубка, заглубленная на 14 *м* для измерения на этой глубине температуры. Как показал

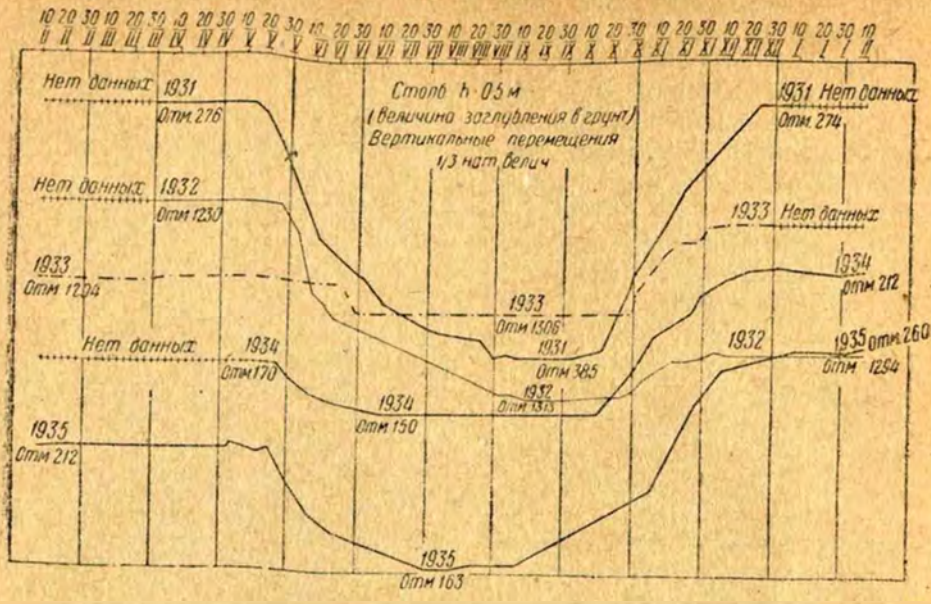
опыт, эта трубка, выступающая над землей примерно на 0,5 *м*, является незыблемым репером. Относительно этого репера определялись вертикальные перемещения 12 деревянных столбов и 1 столба, стоящего на поверхности, перемещения которого были, таким образом, равны перемещениям поверхности оголенной площадки.

Результаты нивелировочных данных приведены на графиках фиг. 72—84, по которым можно довольно подробно проследить за вертикальными перемещениями этих столбов. К сожалению, за некоторые сроки отсутствуют данные об этих перемещениях, а смена реек, произведенная без достаточной продуманности, лишила отметки желательной однородности. Об этих графиках надо сказать то, что сказано было выше о других графиках; здесь иногда могут иметь место почти неизбежные ошибки нивелировки в пределах точности отсчетов, т. е. до 2 *мм*. Эти графики, пригодные для деталь-

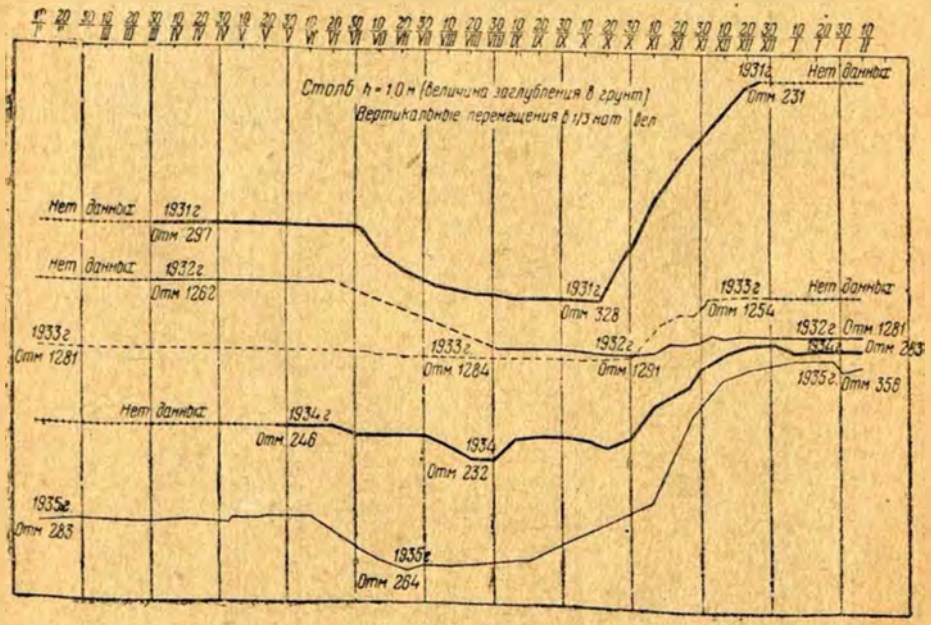
Фиг. 71. Столбы пучения на оголенной площадке



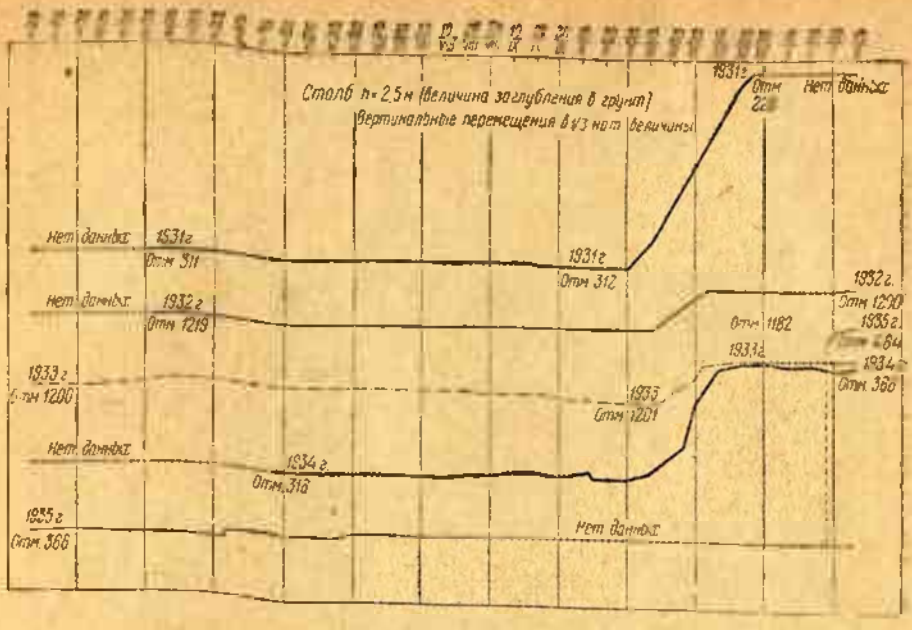
Фиг. 72


Столб h·0.5 м
(Величина заглубления в грунт)
Вертикальные перемещения
1/3 нат. велич.
Нет данных
1931
Отм. 276
1931 Нет данных
Отм. 274
1932
Отм 1230
1933 Нет данных
1933
Отм 1204
1934
Отм 212
1933
Отм 1306
1931
Отм 385
1932
Отм 1260
1935 Отм. 260
Отм 1294
1934
Отм 170
1934
Отм 150
1935
Отм 212
1935
Отм 163

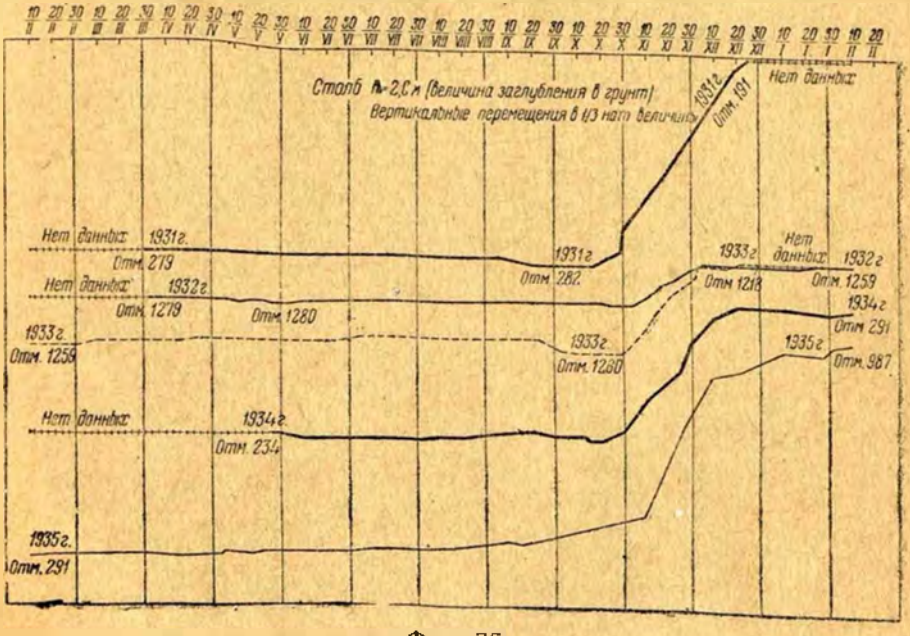
Фиг. 73


Столб h = 1.0 м (величина заглубления в грунт)
Вертикальные перемещения в 1/3 нат. вел
1931г Нет данных
Отм 231
Нет данных
1931г
Отм 297
Нет данных
1932г
Отм 1262
1931г
Отм 328
1933г Нет данных
Отм 1254
1933г
Отм 1281
1933г
Отм 1284
1932г
Отм 1291
1932г Отм 1281
1934г Отм 283
1935г Отм 358
Нет данных
1934г
Отм 246
1934
Отм 232
1935г
Отм 283
1935г
Отм 264

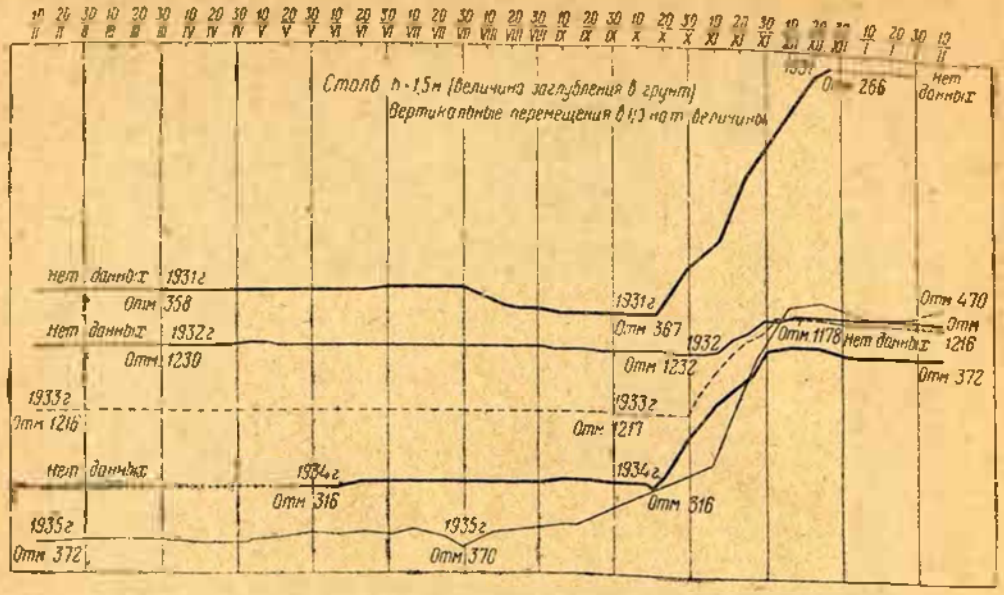
Фиг. 74


Столб h=2,5 м (Величина заглубления в грунт)
Вертикальные перемещения в 1/3 нат. величины
Нет данных
1931 г
Отм 311
1931 г
Отм 312
1931 г
Отм 2..
Нет данных
1932 г
Отм 1219
1932 г
Отм 1200
1933 г
Отм 1200
1933 г
Отм 1201
Отм 1182
1933 г
1934 г
Отм 360
Нет данных
1934 г
Отм. 316
1935 г
Отм 366
Нет данных

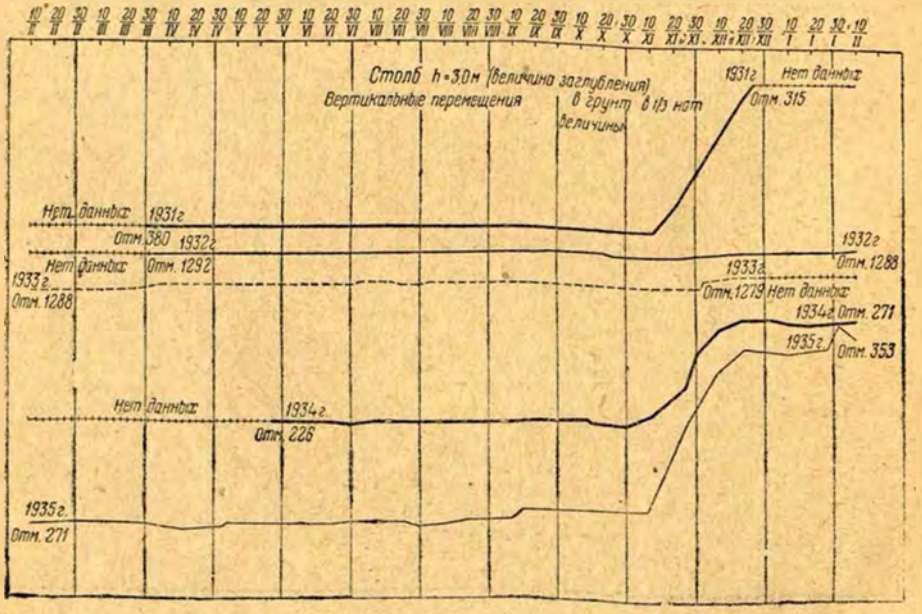
Фиг. 75


Столб h=2,0 м (Величина заглубления в грунт)
Вертикальные перемещения в 1/3 нат. величины
Нет данных
1931 г
Отм. 279
1931 г
Отм. 282
1931 г
Отм. 191
Нет данных
Нет данных
1932 г
Отм. 1279
1932 г
Отм. 1280
1933 г
Отм. 1218
1932 г
Отм. 1259
1933 г
Отм. 1258
1933 г
Отм. 1280
1934 г
Отм 291
1934 г
Отм. 234
1935 г
Отм. 987
1935 г.
Отм. 291

Фиг. 76

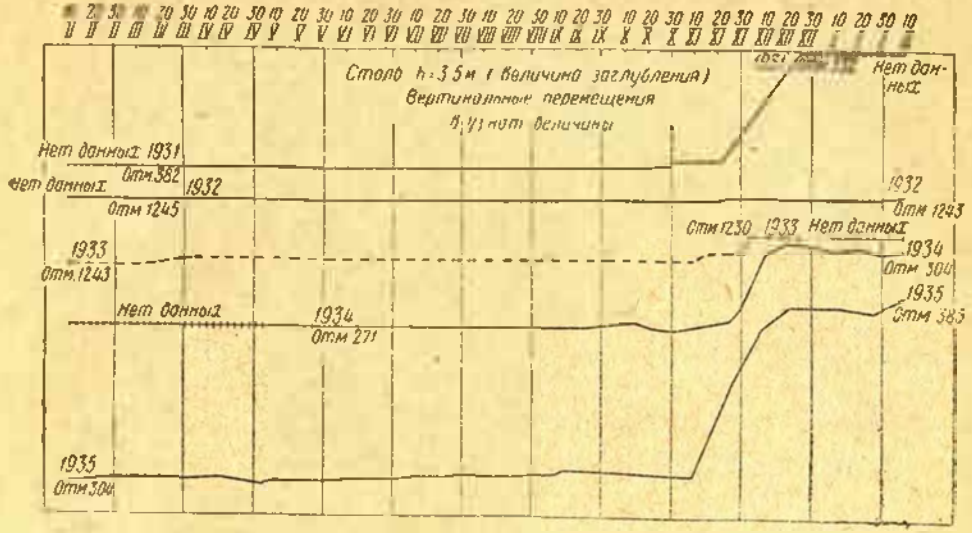

Столб h-1,5м (величина заглубления в грунт)
Вертикальные перемещения в (+) нет величины
Нет данных 1931г
Отм 358
Нет данных 1932г
Отм 1230
1933г
Отм 1216
Нет данных
1934г
Отм 316
1935г
Отм 372
1931г
Отм 367
1932
Отм 1232
1933г
Отм 1217
1934г
Отм 316
1935г
Отм 370
Отм 266
Нет данных
Отм 470
Отм 1216
Отм 1178
Нет данных
Отм 372

Фиг. 77


Столб h-3,0м (величина заглубления)
Вертикальные перемещения в грунт в (+) нет величины
Нет данных 1931г
Отм 380
1932г
Отм. 1292
1933г
Отм. 1288
Нет данных
1934г
Отм. 226
1935г
Отм. 271
1931г
Нет данных
Отм 315
1932г
Отм. 1288
1933г
Отм. 1279
Нет данных
1934г Отм. 271
1935г
Отм. 353

Фиг. 78

ного изучения процесса пучения, все же мало пригодны для того, чтобы по ним создать в своем представлении сравнительную картину пучения.

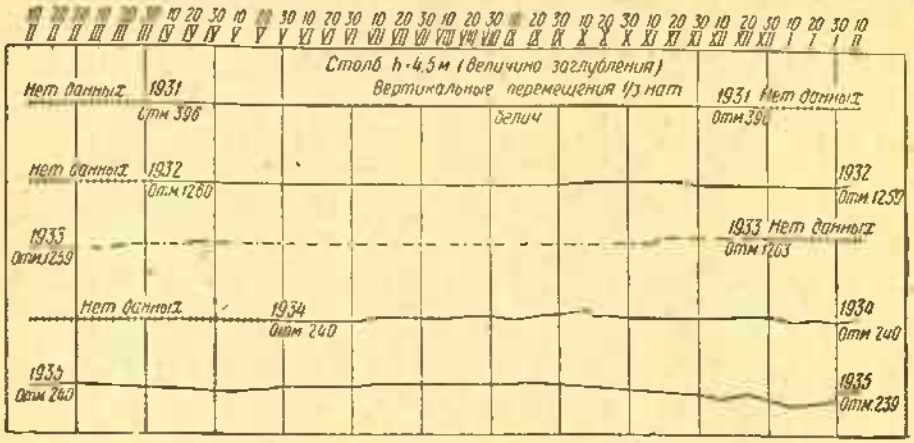


Фиг. 79

Фиг. 80

В связи с этим данные этих графиков переработаны, в результате чего получились графики, показанные на чертежах фиг. 85 и 86. На этих графиках пучение столбов дается в уменьшенном масштабе. Месяцы, когда вертикальных пучений не наблюдается, выкинуты;

дается только время начала и конца каждого вертикального перемещения и само перемещение предполагается происходящим по закону прямой. Все это вносит в графики известную условность и схематичность, но зато они выигрывают в наглядности. Изучение как подроб-



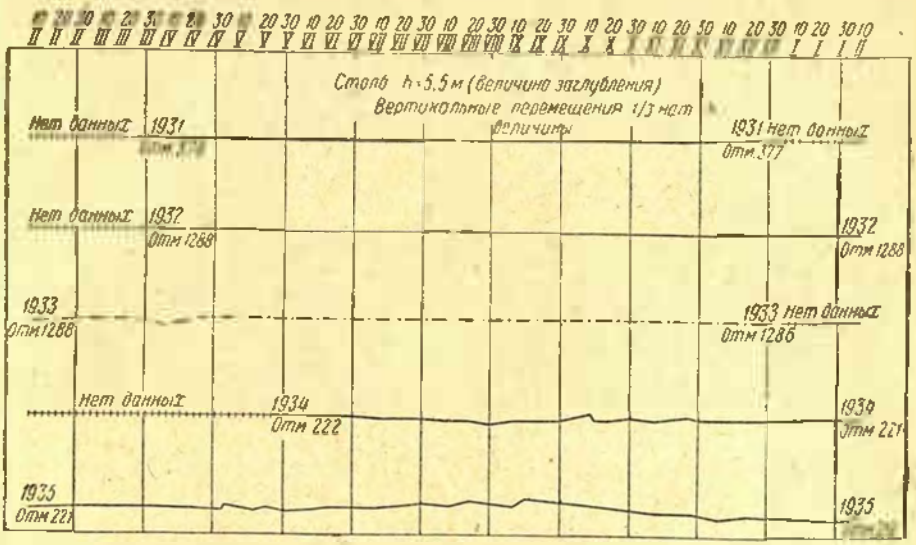
Фиг. 81

ных графиков (фиг. 72 — 84), так и их схем (фиг. 85 и 86) показывает, что все столбы можно разделить по характеру пучения на три группы. К первой группе можно отнести те столбы (в том числе и стоящие на поверхности), которые с наступлением морозов поднимаются, а с

Фиг. 82

оттаиванием грунта опускаются. Ко второй группе следует отнести столбы, которые поднимаются с наступлением морозов, но при наступлении весны и лета не опускаются. К третьей группе можно отнести столбы, которые вовсе не имеют вертикальных перемещений и, таким образом, стоят вполне неподвижно.

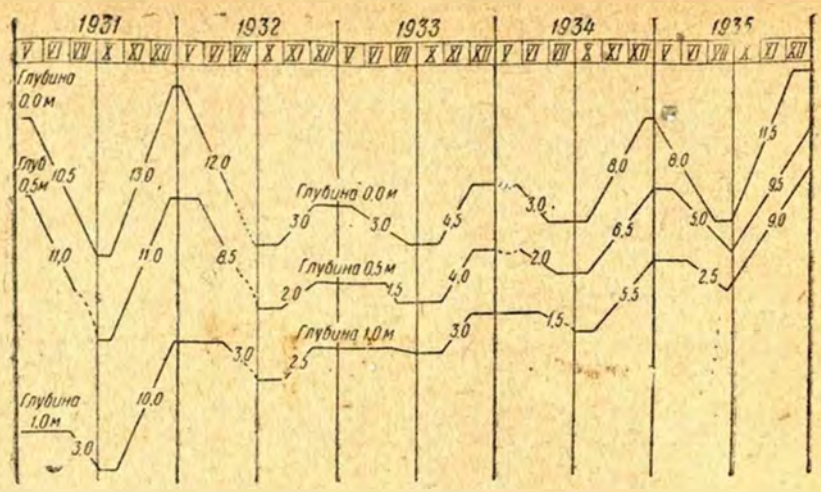
Прежде чем перейти к рассмотрению этих групп, рассмотрим подробнее самый механизм вертикальных перемещений столбов и постараемся несколько уточнить терминологию, которая после статьи Дат-



Фиг. 83

Фиг. 84

ского «О выпучивании столбов» (13, стр. 119, 144, 145) страдает некоторой неточностью, позволившей Датскому констатировать, а другим повторять, что никакого выпучивания столбов из грунта не происходит и что «общепринятый термин «выпучивание» не только не опре-

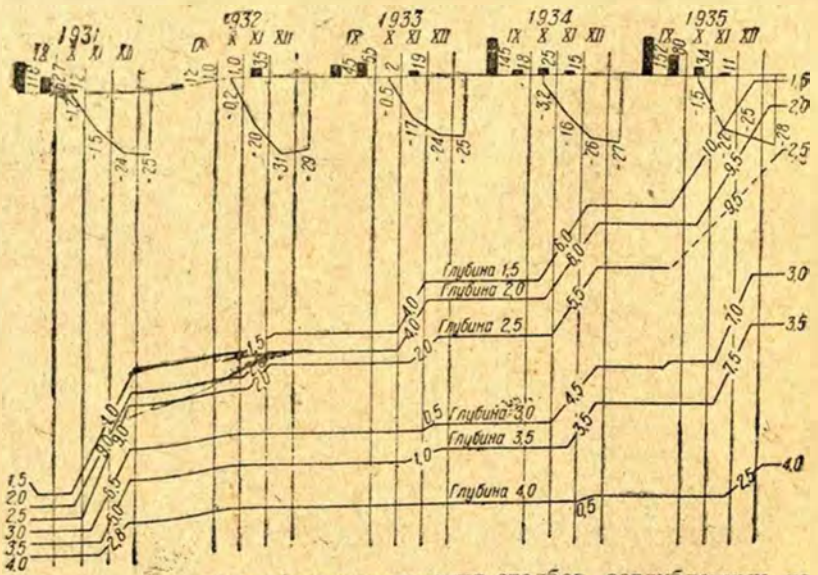


Фиг. 85. Сводный график перемещений столбов, заглубленных на 0,0; 0,5; 1 *м*

Примечание. а) Столб на глубине 0,0 м. Понижение в 1932 г. на 12 см, но точно не установлена дата его окончания. В 1934 г. момент начала падения упущен и нет ряда наблюдений, поэтому понижение, вероятно, больше 3 см.

б) Столб на глубине 0,5 м. В 1931 г. понижение продолжалось до 1 сентября, что не отражено на графике. В 1932 г. понижение продолжалось до 10 сентября. В 1934 г. момент начала опускания неизвестен.

в) Столб на глубине 1 м. Опускание в 1931 и 1932 гг. тянулось до начала сентября. В 1934 г. максимум понижения соответствует 1 ноября.

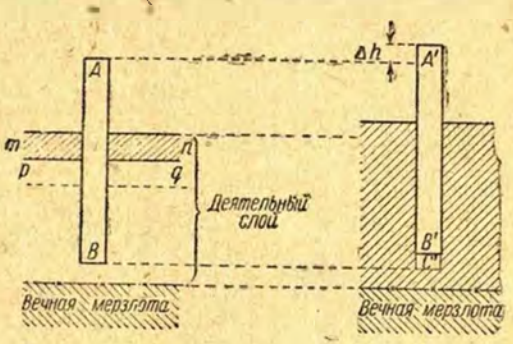


Фиг. 86. Сводный график перемещения столбов, заглубленных на 1,5; 2,5; 3; 3,5 и 4 м. Сверху даны количества осадков и средние месячные температуры

деляет характер явления, но и вводит в заблуждение». Однако, отказавшись от этого термина, Датский все же дальше его вводит и говорит, что «выпучивание происходит только при наличии верхнего оттаивания грунта» и что«чем глубже заложено основание столба в вечно мерзлый грунт, тем меньше величина его выпучивания», понимая под выпучиванием, повидимому, увеличение надземной части столба при оседании оттаявшего грунта.

Будем впредь называть п у ч е н и е м всякое вертикальное перемещение вверх как самого грунта, так и заключенных в него предметов, происходящее вследствие замерзания и расширения грунта; противоположное явление — перемещение вниз при оттаивании—будем называть о с е д а н и е м.

Пучение, т. е. вертикальное перемещение вверх предметов (например, деревянных столбов), заглубленных в грунт, происходит при замерзании последнего следующим образом.



Фиг. 87

Если в деятельный слой пучащего грунта погружен деревянный, бетонный или железобетонный столб или вообще какое-нибудь тело AB (фиг. 87) так, как это показано на фигуре, то с наступлением зимнего промерзания наблюдается следующее явление: сначала промерзает некоторый слой mn и не только промерзает, но при наличии влаги и примерзает к телу AB. Прочность этого промерзания зависит от температуры и от других факторов и, как увидим далее, вообще говоря, весьма велика.

При замерзании следующего, лежащего ниже, слоя pq этот последний, замерзая и расширяясь, приподнимает слой mn вместе с вмерзшим в него телом AB. При замерзании дальнейших, лежащих еще ниже, слоев этот процесс повторяется, тело с примерзшими к нему слоями грунта поднимается все выше и выше и таким образом в ы д е р г и в а е т с я из лежащих ниже слоев. В результате столб AB занимает положение $A'B'$, а под столбом образуется пустота C', которая заполняется по большей части водой, а отчасти и оползшим с боков грунтом. Бывают случаи, когда пространство C' остается пустым. Вода и грунт, попавшие в пространство C', потом замерзают.

С наступлением летнего оттаивания грунт по мере оттаивания сжимается и оседает, скользя вдоль тела AB. Когда же грунт протает на всю глубину, то, как показывает опыт, столб в большинстве случаев до прежней отметки не опускается: возвращению на старое место будет мешать, с одной стороны, оползший в пустоту под столбом $A'B'$ грунт, а с другой (если столб не несет соответствующей нагрузки), — трение об окружающий его грунт, которое его и поддерживает.

Вот это-то остаточное пучение, или, иначе говоря, абсолютное вертикальное перемещение вверх после полного годичного цикла или ряда таких циклов, мы можем назвать в ы п у ч и в а н и е м. Повторяясь из года в год, такой процесс может привести к тому, что тело *AB* совершенно выдернется из грунта. Это и наблюдается в действительности на сваях деревянных мостов, на телеграфных столбах, на столбах оград, как это видно из фиг. 88, где засняты столбы ограды, установленные в 1927 г. Датским.

На фиг. 71 дан снимок столба, который в 1930 г. был заглублен на 2 *м* до черты, отделяющей выбеленную верхнюю часть. За 6 лет его выпучило на 45 *см*, как видно по поставленной рядом рейке. Сни-

Фиг. 88. Столбы ограды Сковородинской НИМС

мок, приведенный на фиг. 70, сделан на 2 года раньше; здесь столбы выпучены меньше, что легко заметить, сравнивая оба снимка.

Установив в таком виде схему пучения, оседания и выдергивания столбов, обратимся к рассмотрению графика фиг. 85. Этот график представляет вертикальные перемещения столбов, заглубленных на 0,5 и на 1 *м*, и столба, стоящего свободно на поверхности. Начнем с последнего. Из графика видно, что пучение в разные годы имеет разную величину и что оседание при оттаивании грунта обыкновенно равно пучению в течение зимы предыдущего года; некоторую разницу в размерах пучения и последующего за ним оседания в 1931—1932 гг. и в 1933—1934 гг. нужно отнести в первом случае за счет ошибок при нивелировке, а во втором—за счет упущенного в наблюдениях момента начала оседания, о чем и сказано в при-

мечании на чертеже. Конечно, поверхность грунта не может с течением времени ни нарастать, ни понижаться, и возможные здесь колебания вряд ли могут превышать доли сантиметра (высыхание и набухание верхних слоев и некоторая возможная игра в упаковке частиц).

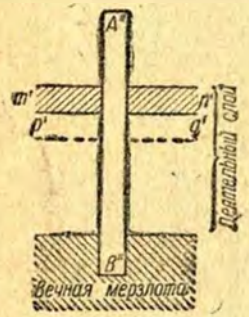
Графики перемещения столбов, заглубленных на 0,5 и 1 *м*, показывают, что их пучение несколько меньше пучения свободной поверхности грунта. Что же касается оседания после пучения, то оно весьма часто значительно меньше предшествовавших пучений, вследствие чего эти столбы постепенно выдергиваются из грунта.

Далее мы видим, что столбы, заглубленные на 1,5 *м* и более, вовсе не имеют обратных оседаний, а потому здесь возникает вопрос, отчего же столбы, заглубленные на 0,5 и 1 *м*, т. е. столбы более легкие, садятся. Есть основания считать, что здесь при оседании происходит не обратное углубление столба в грунт после выдергивания (так как он ничем не нагружен), а лишь оседание этого столба вместе со слоем окружающего его грунта вследствие осадки оттаявших под ним нижележащих слоев. Обратное же заглубление в грунт, хотя бы даже частичное, в пустоту *C'*, изображенную на фиг. 87, может происходить лишь при достаточной нагрузке, большей, чем сила трения, возникающая по поверхности соприкосновения столба с грунтом.

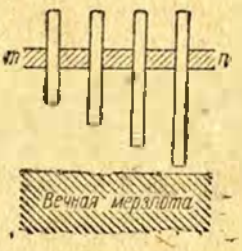
На фиг. 86 даны графики пучения шести столбов, заглубленных на 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 и 4 *м*. Все эти столбы, как правило, не садятся; исключение составляет лишь столб, заглубленный на 1,5 *м*, давший осадку в сентябре 1931 г. График позволяет разбить столбы на две группы: первую, заключающую в себе столбы, заглубленные до 2,5 *м* включительно (т. е. до границы вечной мерзлоты), и вторую, заключающую три остальных столба с большим заглублением. Столбы первой группы ведут себя в отношении пучения почти одинаково; величина пучения их почти ничем не отличается от величины пучения менее заглубленных столбов, охарактеризованных графиками фиг. 85, только начало пучения как будто несколько запаздывает. Что же касается столбов второй группы, то их пучение имеет значительно меньшие размеры, заметно убывающие с глубиной. В некоторые годы (например, в 1932 г.) пучения этих столбов вовсе не наблюдалось. Время начала пучения в большинстве случаев как бы запаздывает. Причина этого, конечно, лежит в том, что столбы первой группы только доходят до вечной мерзлоты и во время пучения их нижние концы находятся в талом грунте; таким образом, то выдергивание этих столбов, о котором говорилось выше, производится из талого грунта. Столбы же второй группы своими нижними концами, так сказать, заделаны в вечную мерзлоту. Работе сил, выдергивающих столбы первой группы, сопротивляются силы трения этих столбов о грунт и вес самих столбов; силам же, выдергивающим столбы второй группы, кроме сил трения и веса еще сопротивляются так называемые силы смерзания, т. е. сопротивление сдвигу столбов относительно примерзшего к ним вечно мерзлого грунта. Такой случай изображен на фиг. 89. Эти силы сопротивления сдвигу столбов относительно примерзшего к ним вечно

мерзлого грунта настолько велики, что столбы, заглубленные в грунт на 4,5 *м* и более, т. е. заделанные в вечную мерзлоту на 2 *м* и более, совсем не выдергиваются и, следовательно, не перемещаются в вертикальном направлении. Вследствие этого и графики их пучения не нанесены на фиг. 86, так как самое явление пучения отсутствует.

Объяснить приблизительную одинаковость пучения всех столбов, нижние концы которых лежат выше границы вечной мерзлоты, повидимому, возможно самим механизмом пучения. В самом деле, пусть у нас имеется несколько столбов, закопанных в грунт на разную глубину (фиг. 90). Когда в процессе зимнего промерзания к ним примерзнет некоторый слой *mn*, то дальнейшее пучение столбов, зависящее от расширения при замерзании нижележащих слоев, будет обусловливаться поднятием слоя *mn* с вмерзшими в него столбами. Это поднятие будет для всех столбов одинаково, и только пустоты типа *C'* (фиг. 87) под ними различны и будут больше у более заглубленных столбов. С этим явлением одинакового пучения различно заглубленных столбов мы еще встретимся дальше и увидим, что в некоторых случаях из этого правила бывают исключения. Труднее понять при этом равенстве пучения запоздание начала пучения таких столбов.



Фиг. 89



Фиг. 90

Перейдем теперь к столбам, заделанным в мерзлоту. Здесь и запоздание начала пучения и уменьшение его величины, повидимому, можно объяснить следующим образом. Мы представляем себе выпучивание столбов как выдергивание их примерзшим к ним слоем *m'n'* (фиг. 89). Пока этот слой мал и морозы невелики, то и силы смерзания этого слоя со столбом *A'' B''* тоже сравнительно незначительны. В этом случае расширяющийся при замерзании нижележащий слой стремится, с одной стороны, выдернуть столб *A'' B''* из вечной мерзлоты, а с другой — оторвать от столба и продвинуть вверх слой *m'n'*. Замерзающий грунт в слое *p' q'* действует, таким образом, как пружина, а расправиться этой пружине мешает столб *A'' B''*, заделанный одним концом в вечную мерзлоту, а другим — в слой *m'n'*. Этот столб работает при этом на растяжение и теоретически может быть разорван, что, как увидим далее, и случается на деле. В рассматриваемых случаях столбов, заглубленных на 3; 3,5 и 4 *м* (графики пучения которых даны на фиг. 86), сопротивление сил смерзания вечной мерзлоты с нижним концом настолько велико, что слой *m'n'*, пока он не получил достаточного развития, отрывается от столба и продвигается вверх. В дальнейшем, когда поверхность смерзания слоя *m'n'* со столбом при увеличении толщины слоя *m'n'* увеличится, а температура понизится, произойдет выдергивание столба из вечной мерзлоты. Вследствие этого мы имеем за-

паздывание начала пучения столба и уменьшение размеров самого пучения. При увеличении глубины заделки столбов в вечную мерзлоту мы, как это уже отмечено, наконец, доходим до такой глубины, когда силы смерзания вечной мерзлоты со столбом делаются настолько большими, что выдергивания из мерзлоты вовсе не происходит, а замерзающий деятельный слой скользит вдоль столба, поднимаясь осенью и зимой (т. е. в период пучения) и опускаясь весной и летом, что фактически и наблюдается.

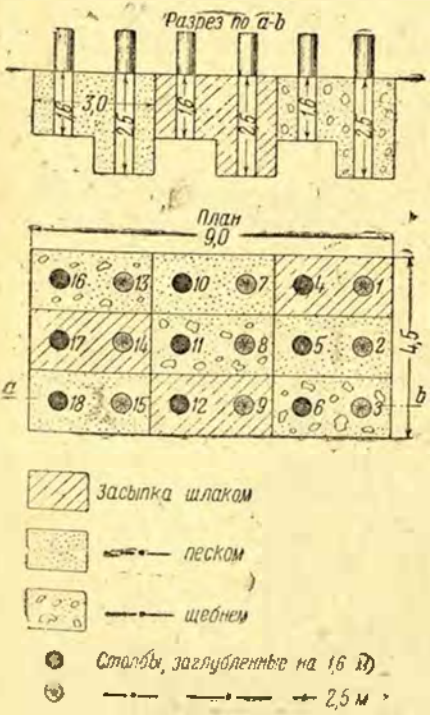
При пучении грунта в этом случае в столбе $A''B''$ развиваются значительные растягивающие усилия, а при оттаивании — меньшие сжимающие усилия. Эти последние обусловливаются трением оседающего грунта по поверхности столба.

Остановимся теперь еще на том обстоятельстве, что столбы, заглубленные на 1,5; 2 и 2,5 *м*, в период оттаивания грунта до границы вечной мерзлоты не оседают. Для менее заглубленных столбов (0,5 и 1 *м*) оседание, как видно из графика фиг. 85, наблюдается, и мы его объясняем как следствие оседания при оттаивании нижележащих слоев. Если это так, то то же явление должно было бы происходить и с этими более заглубленными столбами, за исключением столба, заглубленного до вечной мерзлоты. Если оседания столбов нет, то это может происходить лишь при том условии, что слои, лежащие ниже 1,5 *м*, не оседают, а это значит, что слои эти и не пучат.

Далее мы увидим, что и другие опыты приводят к такому же парадоксальному заключению. Выходит так, что наиболее бурные явления пучения происходят в слое толщиной около 1,5 *м*, а ниже этого слоя явлений пучения и оседания либо вовсе не происходит, либо они происходят в относительно ничтожных масштабах, что вряд ли имело бы место, если бы слой грунта над вечной мерзлотой был переувлажнен, как говорят Сумгин, Евдокимов-Рокотовский и др. Здесь уместно оговориться, что все это верно только для условий Сковородинской станции и условий, аналогичных им, определяемых влажностью грунтов, их гранулометрическим составом и климатическими условиями. Для мест с грунтом, который вовсе не пучит, все это отпадает, а для мест с другой глубиной залегания вечной мерзлоты все сказанное приложимо с известными поправками на климат, влажность, глубину промерзания и т. д. Так, для условий Сковородинской станции столбы, заложенные на глубину 4,5 *м* от поверхности земли, уже не выдергиваются при пучении грунта; для других мест, где вечная мерзлота залегает глубоко, эту глубину нужно увеличить, а для Игарки, где летнее оттаивание в среднем меньше 1,5 *м*, ее, может быть, можно и уменьшить. Здесь сказано «может быть» на том основании, что температура вечной мерзлоты в Игарке близка к 0°, в то время как в Сковородине она приближается к —1,5°; с уменьшением же холода уменьшаются и силы смерзания, т. е. эффективность заделки столба в вечную мерзлоту. Далее, если в Сковородине на оголенной площадке деятельный слой с глубины 1,5 *м* и ниже не пучит или почти не пучит, то в других местах эта граница отсутствия пучения может лежать или ниже или выше в зависимости от указанных выше условий.

Все это ясно показывает, что, приступая к строительству на вечной мерзлоте, должны быть предварительно сделаны серьезные исследования и изыскания, а самый вопрос о пучении должен быть изучен в гораздо более широком масштабе, чем это обыкновенно делается. Из фиг. 85 и 86 мы видим, что если пучение различно заглубленных столбов на оголенной площадке в один и тот же год одинаково, то в разные годы столбы эти пучат по-разному: большое пучение мы наблюдаем в 1931 и 1935 гг., а незначительное — в 1932 г.

В верхней части фиг. 86 даны метеорологические характеристики годов, к которым относятся нанесенные графики. Эти характеристики даны относительно влажности, т. е. количества осадков, выпавших за три месяца перед началом пучения, и относительно температур воздуха в период пучения. Снег совершенно не принят во внимание, так как он с оголенной площадки удалялся. Зачерненные прямоугольники и стоящие рядом цифры показывают помесячное количество осадков в *мм*, а ниже дан график средних месячных температур.



Фиг. 91. Столбы с разной засыпкой

Внимательное рассмотрение этих данных приводит к заключению, что величина пучения находится в теснейшей связи с количеством выпавших осадков, главным образом сентябрьских и октябрьских. Августовские осадки имеют, повидимому, меньшее значение.

Так, рассматривая 1931 и 1934 гг., мы видим, что в 1934 г. в августе выпало больше осадков, чем в 1931 г., пучение же в 1934 г. меньше, что соответствует и меньшему количеству осадков в сентябре и октябре. В 1932 г. ничтожному количеству осадков соответствует и ничтожное пучение, несмотря на весьма интенсивное промерзание, так что утверждение Сумгина (52, стр. 89) о том, что количество и величина пучин зависит от глубины и интенсивности промерзания, хотя бы и при прочих равных условиях, должно быть пересмотрено, так как не интенсивность промерзания в первую очередь, а повидимому, осадки обусловливают величину пучения. В настоящее время вопрос этот дорабатывается и ведутся соответствующие исследования. Перейдем теперь ко второму опыту на Сковородинской станции, который был поставлен в сентябре и октябре 1930 г. Этот опыт называется «столбы

с разной засыпкой»; так будем для краткости называть его в дальнейшем и мы.

Деревянные столбы в количестве восемнадцати были установлены в низинке почти на заболоченном месте, указанном на общем плане станционной площадки (фиг. 10). Три пары столбов были засыпаны песком, три пары — шлаком и три пары — щебнем. Каждая пара состояла из столба, который устанавливался в котлован на глубину 2,5 *м*, и из столба, устанавливаемого на глубину1 ,6 *м*. На эту глубину столбы и засыпались песком, шлаком и щебнем. Столбы имели диаметр около 22 *см*; к ним для нивелировки были прикреплены рейки. План расположения и разрез столбов даны на фиг. 91. Вертикальные перемещения этих столбов определялись нивелировкой. В марте 1934 г. наблюдения были брошены, но в июле того же года вновь восстановлены.

На фиг. 92 приведены результаты наблюдений над шестью столбами: тремя, заглубленными на 1,6 *м*, и тремя, заглубленными на 2,5 *м*. Три столба первой группы были засыпаны соответственно шлаком, щебнем и песком. То же надо сказать и о трех столбах второй группы.

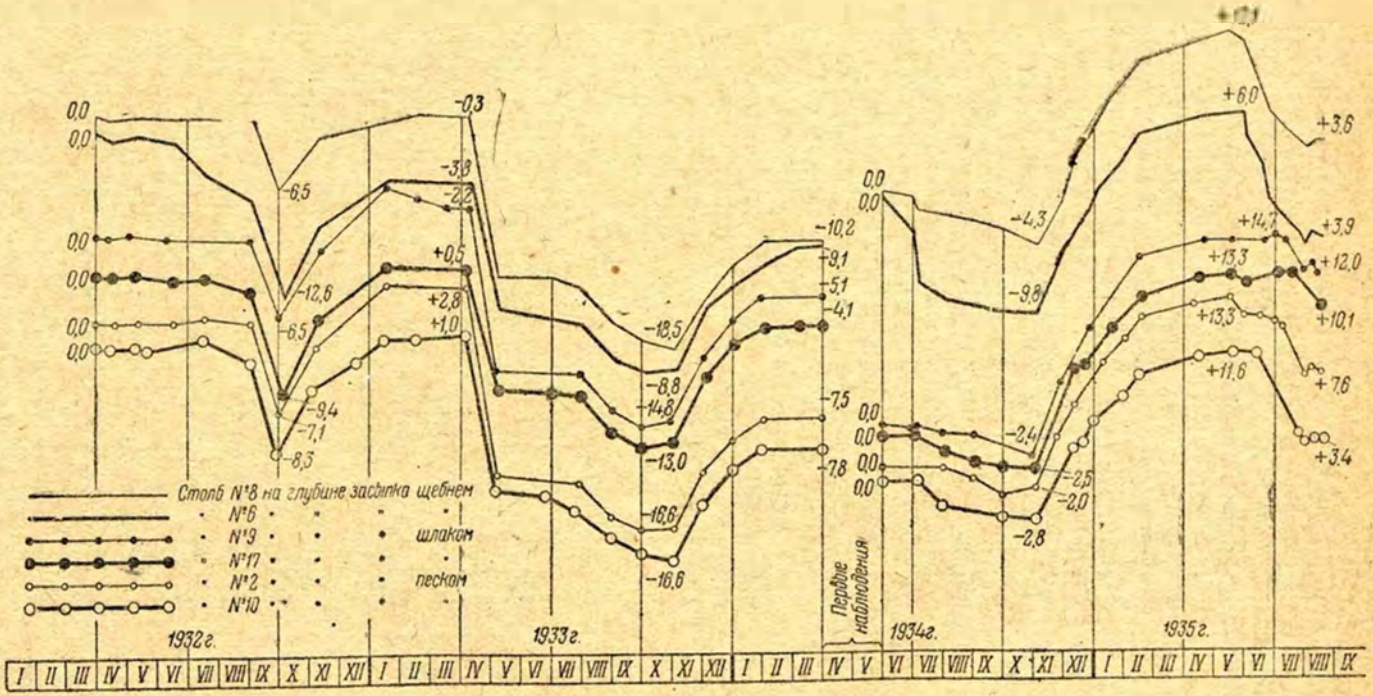
Что касается остальных двенадцати столбов, то графики их пучения и оседания не приводятся как не дающие ничего нового по сравнению с приведенными, взятыми случайно, с единственной руководящей идеей, чтобы иметь по одному глубоко зарытому столбу и по одному мелко зарытому столбу с разной засыпкой.

Чтобы яснее понять картину пучения и последующего опускания столбов, приводим табл. 24, составленную по графикам фиг. 92.

Таблица 24

Глубина в *м*	Оседание в 1932 г. в *см*			Пучение в 1932—1933 гг. в *см*			Оседание в 1933 г. в *см*			Пучение в 1933—1934 гг. в *см*		
	щебня	шлака	песка	щебня	шлака	песка	щебня	шлака	песка	щебня	шлака	песка
2,5	6,5	5,5	1,1	6,2	4,3	9,9	18,2	12,6	19,4	8,3	9,7	9,1
1,6	12,6	9,4	8,3	8,8	9,9	9,3	15,0	15,3	17,6	9,7	8,9	8,8

Глубина в *м*	Оседание в 1934 г. в *см*			Пучение в 1934—1935 г. в *см*			Оседание в 1935 г. в *см*		
	щебня	шлака	песка	щебня	шлака	песка	щебня	шлака	песка
2,5	4,3	2,4	2,2	16,4	17,1	15,3	8,5	2,7	5,7
1,6	9,8	2,5	2,8	15,8	15,8	14,4	9,9	3,2	8,2



Фиг. 92. Эпюры выпучивания и осадки столбов с различной засыпкой

На фиг. 92 некоторое первоначальное положение каждого столба принято за исходное и обозначено нулем. От этого нуля и ведется определение пучений и оседаний столбов. Если какой-нибудь столб в какой-либо момент поднялся выше исходного положения, его отметка, определенная относительно нуля, имеет знак +; если же столб опустился ниже исходного положения, то отметка имеет знак —. На фиг. 92 даны отметки лишь самых высоких положений столбов в период пучений и самых низких—в период оседаний. В приведенной же выше табл. 24 мы имеем величины наибольших оседаний столбов не относительно начального положения, а относительно наивысшей отметки предыдущего поднятия и точно так же величины пучений, считая от самой низшей отметки в период предыдущего оседания.

Что же дает нам указанная таблица? Если величины пучений всех рассматриваемых столбов в известный период попрежнему приблизительно равны между собой, то с оседаниями дело обстоит совсем неблагополучно в том отношении, что мы никоим образом не можем признать их в известный период равными между собой. В самом деле, в период оседания 1932 г. мы имеем величины от 6,5 до 12,6 *см*, в 1933 г. — от 12,6 до 19,4 *см*, в 1934 г. —от 2,4 до 9,8 *см* и, наконец, в 1935 г.—от 2,7 до 9,9 *см*. Это с первого взгляда как будто свидетельствует о том, что никакого неоседающего и непучащего слоя (по крайней мере в данном случае) нет и наши предыдущие выводы о существовании такового если и приложимы, то только к оголенной площадке, к которой и относятся графики фиг. 72 — 84. Однако такое заключение было бы поспешным. В самом деле, в случае рассматриваемых столбов с разной засыпкой мы имеем, как сказано выше, заболоченную площадку; кроме того, термический режим заболоченных мест резко отличается не только от режима оголенной, но и от режима естественной площадки, о чем подробно изложено выше в главе II.

Более детальное рассмотрение вопроса о подобных осадках мы отложим, ограничившись лишь констатацией самого факта. Здесь же подчеркнем другое чрезвычайно важное обстоятельство, что и щебень, и песок, и шлак (по крайней мере в условиях избытка в них влаги) пучат и к тому же пучат почти одинаково и что поэтому весьма распространенное мнение о каких-то особых пучинистых и непучинистых грунтах нужно признать несостоятельным. Таким образом, и утверждения Сумгина, что пучинистыми грунтами являются грунты, содержащие известное количество пылеватых частиц, и утверждение Федосова, что типично пучинистым грунтом является песок и т. д., можно принимать лишь с большими оговорками и ограничениями.

Из графиков (фиг. 85—86) мы уже видели, как один и тот же грунт (в данном случае пылеватый) в зависимости от выпавших осадков является то сильно пучинистым, то слабо пучинистым, и нет ничего невероятного в том, что в известных условиях он может сделаться совершенно непучинистым.

Раньше мы видели, что при замораживании снизу чистого песка, заключенного в пробирку, вода выступала над песком, но самый песок

не пучил. Из этого как будто следует, что при промерзании песка сверху в естественных условиях вода должна выжиматься из него либо в пузырьки воздуха внутри грунта (если таковые есть), либо в более пористые места, либо (если воде уйти некуда) пучение должно быть не больше величины расширения заключающейся в нем воды при ее замерзании. Однако опыт показывает другое. Причин может быть три: либо приток воды извне, либо засоренность песка пылеватыми или илистыми включениями, либо пучение соседних грунтов. Остановимся несколько подробнее на последнем случае.

Вообразим себе, что в песке имеется такое количество равномерно распределенных пустот, заполненных воздухом, что для расширения замерзающей воды их достаточно. В этом случае песок при замерзании пучить не должен, но это не значит, что он не будет пучить. Если таким песком засыпана, например, яма при постановке телеграфного столба, то при пучении окружающего песок грунта последний может увлекать с собой и песок, поднимая как одно целое верхний слой промерзшего песка, причем под этим слоем может образоваться пустота, куда может засасываться влага, а телеграфный столб может выдергиваться с примерзшим к нему слоем песка. То, что здесь сказано о песке, приложимо к гравию и т. п.

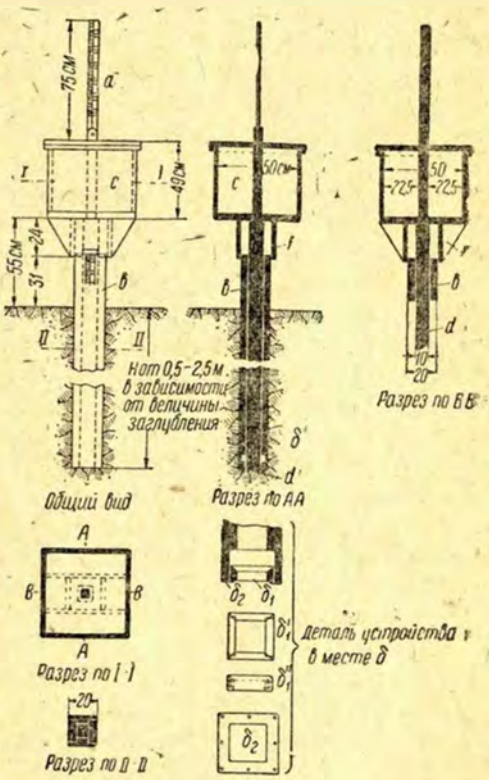
В настоящее время опыт со столбами с разной засыпкой возобновлен в более широком масштабе, и есть основания думать, что ближайшие годы дадут очень интересные результаты, в особенности в отношении столь часто рекомендуемой засыпки фундаментов гравием, пропитанным нефтью или нефтяными остатками.

В рассмотренных опытах пучение столбов сопровождалось выдергиванием их из земли, и силы, перемещающие столбы вверх, действовали через поверхности смерзания грунта со столбами.

Появление такого суждения о пучении было большим сдвигом в деле изучения мерзлотных явлений, так как многие понимали пучение столбов, каменных массивов-быков и т. д. как результат действия сил на подошву фундамента, подобно тому, как действует пучащий грунт на положенный на его поверхность камень. Такой взгляд существовал как следствие недооценки сил смерзания, огромный размер которых был после определен целым рядом исследователей. С появлением взгляда на пучение столбов и фундаментов как на выдергивание казалось бы, что представление о пучении как о результате действующей снизу силы совсем отпадает. Однако такое заключение было бы неправильным. В самом деле, стоило бы только найти какой-либо способ для уничтожения поверхностных сил смерзания, чтобы пучение стало результатом действия сил, приложенных исключительно к подошве фундамента перпендикулярно к ее поверхности. Желание расчленить пучение, производимое поверхностными силами смерзания, от пучения, производимого силами, действующими на нижнюю поверхность погруженного тела, привело к исследованию рассматриваемого вопроса на площадке Сковородинской станции при помощи установки, называемой установкой $Б_3$. Сущность этой установки заключается в следующем.

Установка $Б_3$ и полученные результаты

Задача изолировать тело от смерзания с грунтом по боковой поверхности была достигнута устройством прибора, изображенного на фиг. 93. Идея прибора чрезвычайно проста и заключается в том, что центральный деревянный стержень сечением 10 × 10 *см* окружается деревянной муфтой из досок толщиной 5 *см*, как это показано на разрезе II— II. Этот-то деревянный стержень вместе с покрывающей его муфтой и зарывается в землю. Вследствие такого устройства силы смерзания могут развиться лишь на поверхности муфты, и только она будет выдергиваться при пучении из земли. Что же касается центрального стержня, то он будет находиться в покое и сможет подняться с пучащим грунтом лишь тогда, когда промерзание дойдет до его подошвы и начнет пучить грунт под ним.

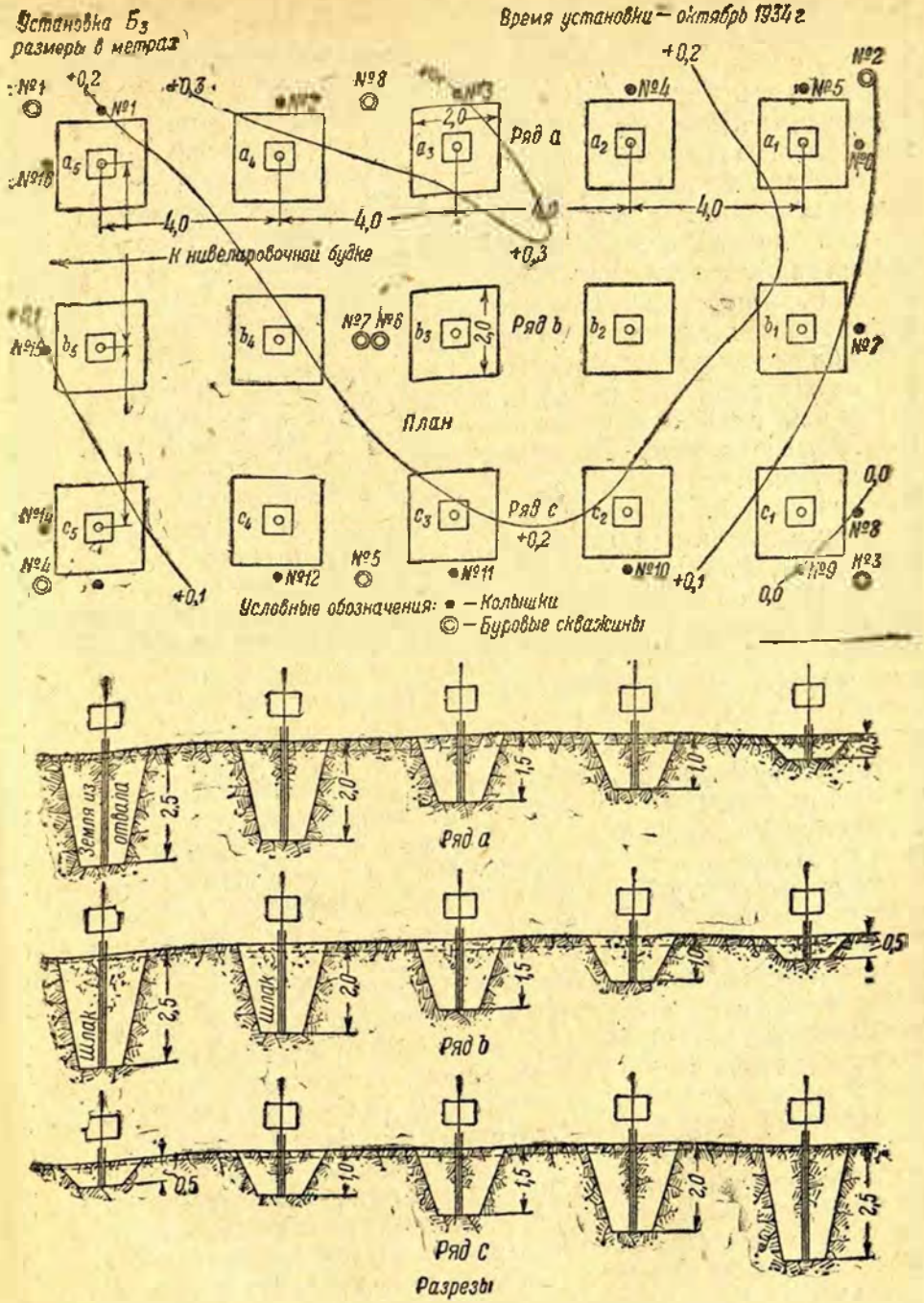


Фиг. 93. Установка $Б_3$. Время установки—октябрь 1934 г.

Детальное устройство прибора следующее. Во-первых, надо было подумать о том, чтобы грунтовая или какая-либо иная вода не проникла в тот небольшой зазор, какой имеется между муфтой и центральным стержнем. Для этого внизу муфты внутреннее сечение муфты уширялось, как показано в деталях устройства, в месте δ. При таком устройстве, когда в муфту вставлялся центральный стержень, внизу между стержнем и муфтой образовался зазор, равный 2,5 *см*, который на три четверти набивался асбестовым шнуром или паклей, пропитанной техническим вазелином. После этого в зазор вводился вкладыш, детально изображенный на фиг. 93 (детали δ_1, δ'_1 и δ''_1). Вкладыш δ_1 вдавливался в пропитанный вазелином шнур или в паклю железной пластинки δ_2, прикрепляемой к муфте *b* на шурупах. При надавливании вкладышем пакли или асбестового шнура из них выступал вазелин и заполнял на некотором протяжении зазоры между муфтой и центральным стержнем и между муфтой и вкладышем. Таким образом, низ прибора обеспечивался от попадания в него воды. В тех же целях водонепроницаемости и предохранения от деформаций набухания муфта делалась на шурупах, при сборке в местах соеди-

нения покрывалась вазелином, сверху обвивалась проволокой и покрывалась смолой. Теперь возникала опасность, как бы при пучении и поднятии муфты не поднялся бы трением и сравнительно легкий центральный стержень. Для этого на заплечиках центрального стержня устанавливался ящик *c*, который и наполнялся песком с таким расчетом, чтобы вес песка, ящика и центрального стержня со всеми приделанными к ним деталями создавал давление на грунт под подошвой стержня, равное 1,5 *кг/см*². Ящик покрывался крышкой; верх центрального стержня снабжался рейкой, которая и служила при нивелировке для определения вертикального перемещения центрального стержня *d*; внизу ящика для песка устраивалась тоже своего рода направляющая муфта *f*, в которую при пучении могла входить муфта центрального стержня *b*. Для определения перемещений последней вдоль стержня на верхнем ее конце были нанесены деления, а край соответствующей доски муфты *f* был скошен. Если бы муфта *b* была наглухо прикреплена к центральному стержню, то перемещения стержня *d* были бы в то же время и перемещениями муфты, которая не передвигалась бы и относительно скошенного края доски, так что по шкале, нанесенной на муфте, мы имели бы все время один и тот же отсчет. Из этого вытекают правила обработки наблюдений и определения действительных перемещений относительно некоторого неподвижного репера как центрального стержня, так и облегающей его муфты. Сначала вычисляются по нивелировочным данным и, если нужно, наносятся на график отметки центрального стержня, а затем к ним прибавляются перемещения муфты, отсчитанные по шкале, нанесенной на этой муфте.

Приборов описанного типа, но с разной длиной центрального стержня и облекающей его муфты было сделано пятнадцать; все они были установлены недалеко от столбов с разной засыпкой в октябре 1934 г. Рельеф местности, на которой они расположены, детальное расположение столбов, а также заглубления и засыпки показаны на фиг. 94. Центральный ряд *b* засыпан шлаком, так как особые свойства шлака весьма рекомендовались многими авторами чуть ли не как универсальное средство от всех мерзлотных бед. Вокруг установки $Б_3$ было забито, как показано на фигуре, шестнадцать колышков. Эти колышки забивались на нетронутой земле. Длина колышков равнялась 0,5 *м*, глубина забивки 0,4 *м*. Колышки нивелировались одновременно с пятнадцатью установленными приборами и служили для сравнения пучения центральных стержней и объемлющих их муфт (только что засыпанных свежим грунтом и мало влажным шлаком) с пучением этих колышков, характеризующим пучение нетронутого грунта, в который они были забиты. Кроме того, для общей характеристики явлений пучения было пробурено восемь скважин, в которых через каждые 25 *см* определялись влажность и гранулометрический состав грунта. Это было сделано независимо от анализа грунтов и влажности в ямах, вырытых для установки приборов, так как ямы эти (за исключением трех) в зависимости от глубины давали возможность исследовать только часть


Установка $Б_3$
размеры в метрах
Время установки — октябрь 1934 г
Ряд a
Ряд b
Ряд c
План
К нивелировочной будке
Условные обозначения: • — Колышки
◎ — Буровые скважины
Земля из отвала
Шлак
Разрезы

Фиг. 94

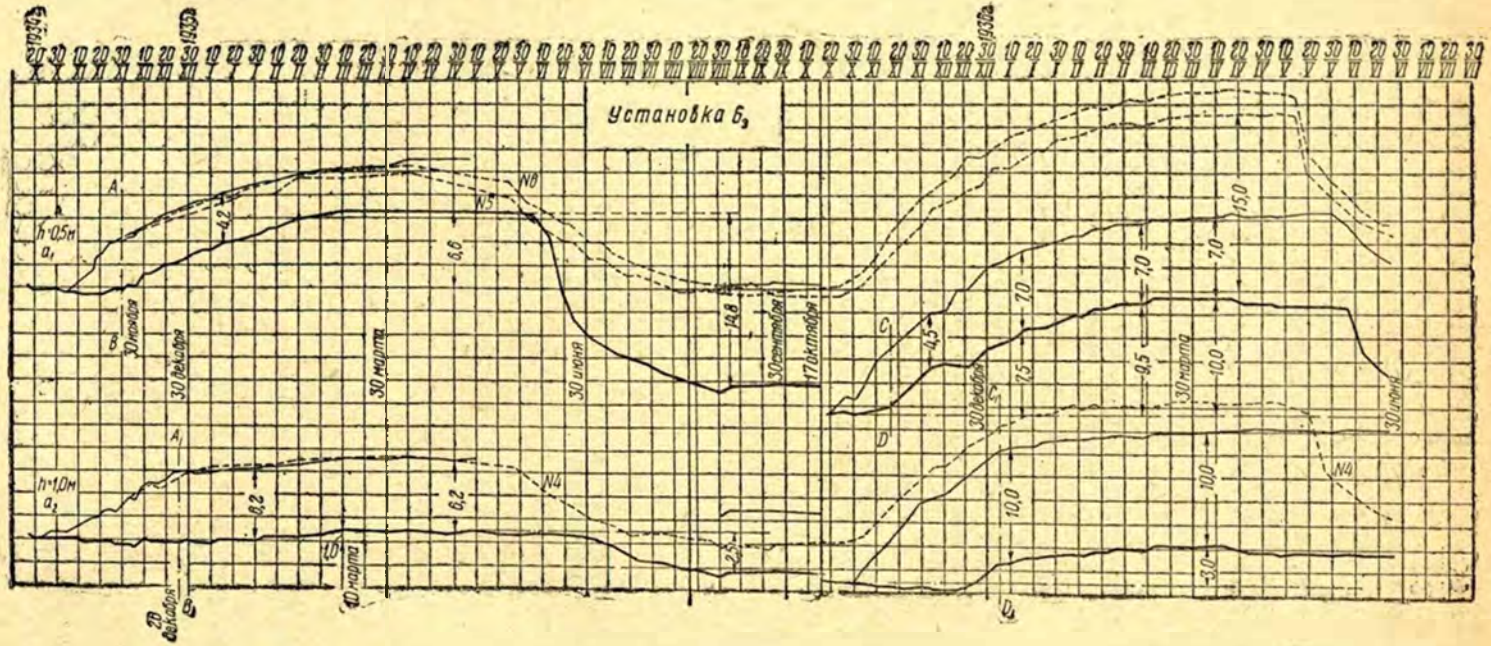
деятельного слоя и потому не давали полного представления о всей его толще.

Анализы грунтов из четырех скважин приведены выше (фиг. 42 и 43). Анализы грунта из шурфов и из других скважин мало чем отличаются от приведенных и ничего нового в общую картину не вносят. Результаты наблюдений за этими пятнадцатью приборами и колышками даны на графиках фиг. 95. Ввиду новизны дела и методики мы их приводим все целиком, чтобы читающий мог сам проверить сделанные заключения или вывести новые. На каждом из этих графиков толстой линией обозначены перемещения центрального стержня, тонкой сплошной линией—перемещения объемлющей его муфты и, наконец, пунктиром—перемещения соседнего колышка или двух колышков, которые легко найти по плану фиг. 94. Так, на фиг. 95 мы имеем графики вертикальных перемещений двух приборов: a_1 и a_2, из которых первый заглублен на 0,5 *м*, а второй — на 1 *м*. Две пунктирные линии при графике a_1 соответствуют двум колышкам № 5 и № 6 (фиг. 94), а пунктирная линия при графике прибора a_2—колышку № 4. Обрыв тонкой сплошной линии указывает на перерыв в наблюдениях за муфтой. Колышки, к сожалению, были забиты несколько позже установки, а именно 28 ноября 1934 г., когда процесс пучения уже был в полном развитии, почему их начальная отметка была приравнена к отметке, которую в это время имела муфта центрального стержня. Дальнейший график пучения этой муфты и этих кольев, а также то, что отметки и этих колышков и муфты стали почти одинаковыми в период наибольшего оседания (от 30 августа по 17 октября), оправдывает до некоторой степени такое приравнивание отметок, по крайней мере для мало заглубленных стержней и муфт.

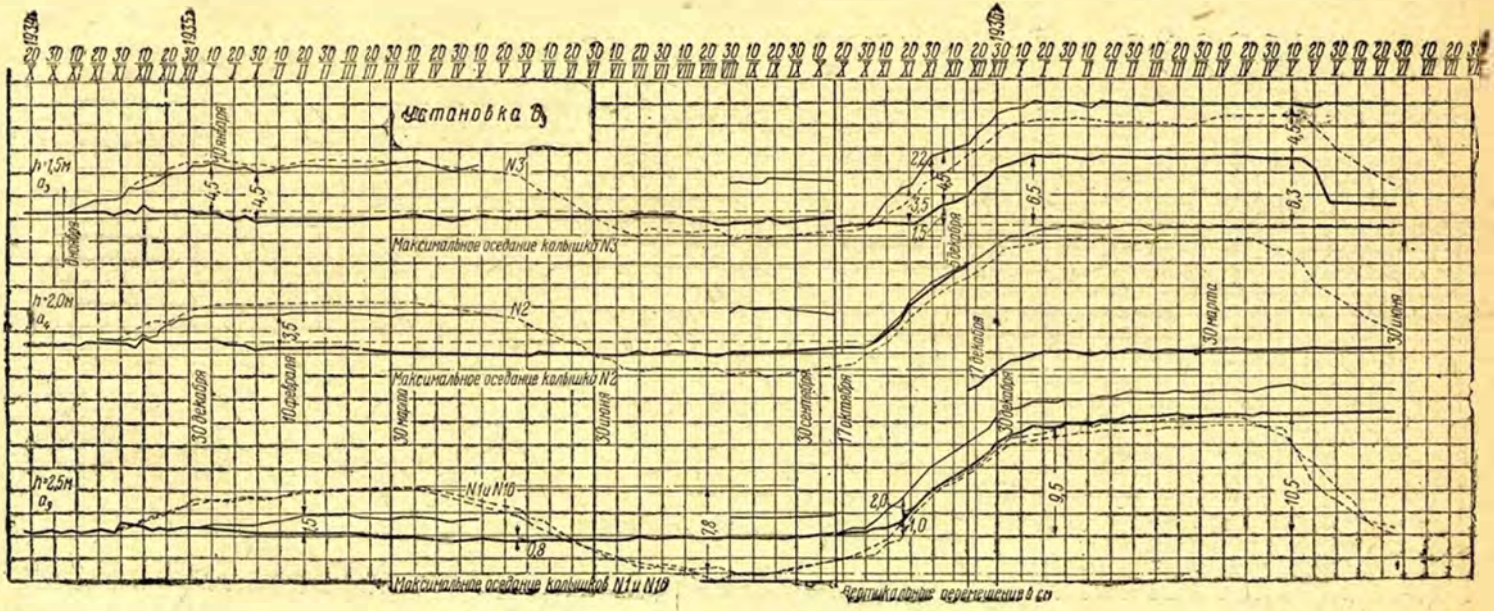
На всех графиках на абсциссе, соответствующей 17 октября 1935 г., имеется разрыв. Причины его таковы: выпученные муфты центрального стержня в период наибольшего оттаивания в октябре 1935 г. остались во взвешенном состоянии и не осели в период оттаивания, некоторые же центральные столбы опустились (фиг. 95, столбы a_1 и a_2). В результате центральные муфты оказались значительно вдвинутыми в оставленное для этого вверху пространство в муфте *f* (фиг. 93), а это создавало опасность, что в период пучения 1935 — 1936 гг. эти муфты центрального стержня упрутся в дно находящегося над ним ящика. Чтобы избежать этого, было решено все эти муфты осадить так, чтобы низ муфты вновь стал в уровень с подошвой центрального стержня. При этом осаживании оказалось, что и сам центральный стержень не оставался неподвижным, а опускался. Когда муфта подходила своим нижним концом к основанию стержня, то часто наблюдалось, что центральный стержень при этом слегка приподнимается. Все это свидетельствовало о том, что влажный грунт у оснований приборов был весьма слабым и переувлажненным; трамбование же при осаживании муфт превращало его в полужидкий, что нередко наблюдалось на территории станции. Иногда достаточно было при засыпке какой-нибудь ямы вести эту засыпку с более или менее тщательной утрамбовкой, как грунт, прежде казавшийся нормально влажным,

приобретал совершенно особую консистенцию какого-то полуупругого, довольно податливого тела, имевшего сходство с сильно утрамбованным жирным бетоном. Грунт в таком состоянии опускается под нажимом (например, когда на него становится человек), причем это опускание сопровождается легким поднятием грунта вокруг; при этом грунт, как говорят, «дышит под ногами». При описанном выше устройстве приборов, казалось, можно было бы ожидать такой схемы процесса пучения, какая намечена выше. Грунт, постепенно промерзая, пучит и в своем пучении увлекает муфту, которая и выдергивается при этом из еще не замерзшего внизу грунта. Стержень при этом остается в покое. Когда же промерзание грунта будет распространяться ниже подошвы центрального стержня, то пучение этих слоев будет поднимать и этот стержень, и вышележащий слой уже замерзшего грунта, и вмерзшую в этот грунт муфту, причем все это будет подыматься вверх, как одно целое.

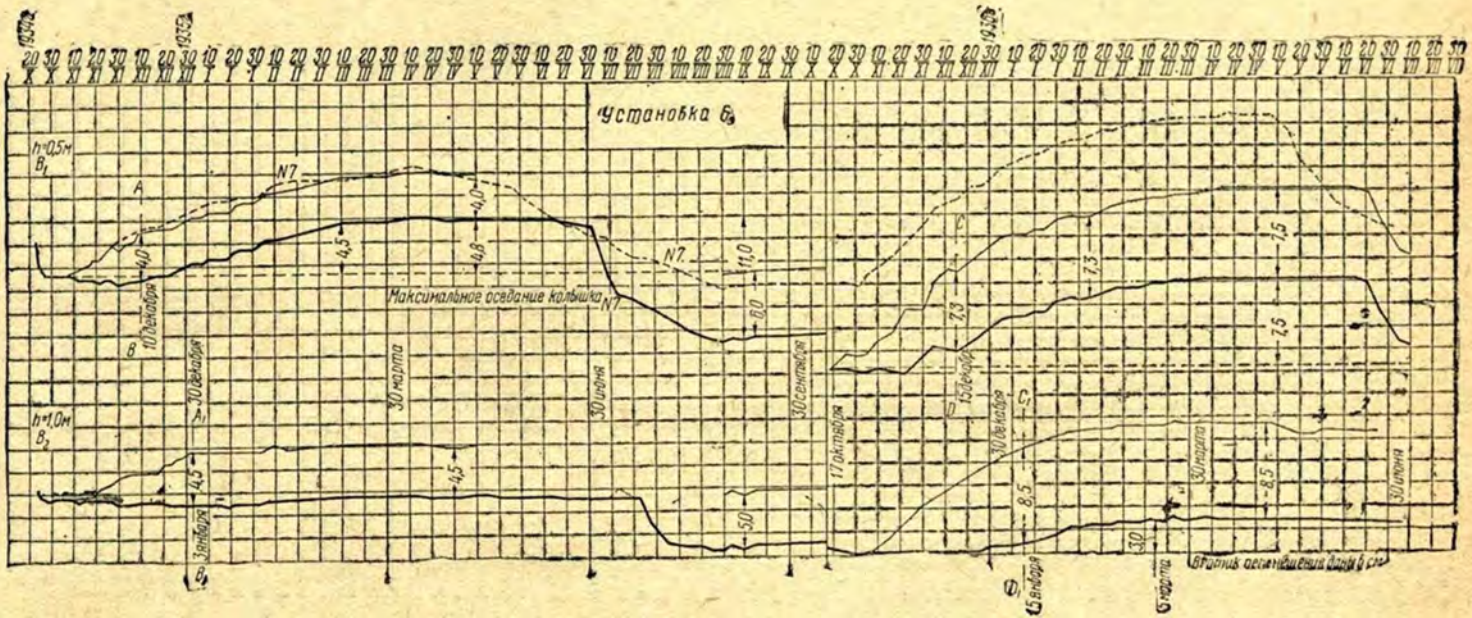
Оказывается, что эта схема на полученных графиках оправдывается далеко не полностью. В действительности этой схеме более или менее следуют лишь приборы, заглубленные на 0,5 и 1 *м*. Рассматривая графики пучений приборов a_1, b_1 и c_5 (фиг. 95—97—100), мы видим, что сначала пучило муфты центральных стержней, стержни же либо оставались на месте (стержень прибора c_5) либо слегка опускались, а потом и стержни и муфта поднимались, как одно целое, причем начало этого совместного подъема для различных стержней было разное; для приборов a_1 этот совместный подъем начался 1 декабря, для прибора b_1, засыпанного шлаком, — 10 декабря и для прибора c_5 — 24 ноября 1934 г. В следующем году (сезон 1935 — 1936 гг.) процесс пучения был более интенсивен, но по характеру остался тем же; однако центральные стержни приборов a_1 и c_5 вели себя по-другому и начали подниматься раньше, чем установилось неизменное положение между ними и объемлющей их муфтой. На этих деталях мы остановимся ниже, а здесь отметим лишь то, что зимний сезон 1935/36 г. был для поставленных опытов неудачным. Дело в том, что, как обнаружилось позже, между центральным стержнем и муфтой во многих приборах либо попала вода либо образовался конденсат и муфты некоторые раньше, а иные позже примерзали к столбам. Это примерзание, соединяющее муфты и стержень, заставляет их перемещаться, как одно целое. Такое движение на графиках характеризуется тем, что разница между отметками стержня и муфты остается постоянной, и график движения муфты легко может быть получен смещением графика стержня параллельно самому себе на эту постоянную разницу. Точно такой же характер графика мы имеем и в том случае, когда промерзание деятельного слоя доходит до низа центрального стержня; тогда при дальнейшем промерзании и пучении нижележащих слоев стержень и объемлющая его муфта тоже перемещаются, как одно целое, хотя стержень остается совершенно свободным, не примерзшим к муфте. В этой возможности примерзания муфты к стержню заключается главнейший и серьезный недостаток этого прибора, который мы называем пучиномером с нагрузкой.


Установка Б₂
h=0,5м
a₁
h=1,0м
a₂
A
A₁
B
B₁
C
C₁
D
D₁
N8
N5
N4
0,2
0,6
14,8
2,5
4,5
7,5
10,0
9,5
15,0
30 ноября
30 декабря
30 марта
30 июня
30 сентября
17 октября
10 марта
28 декабря

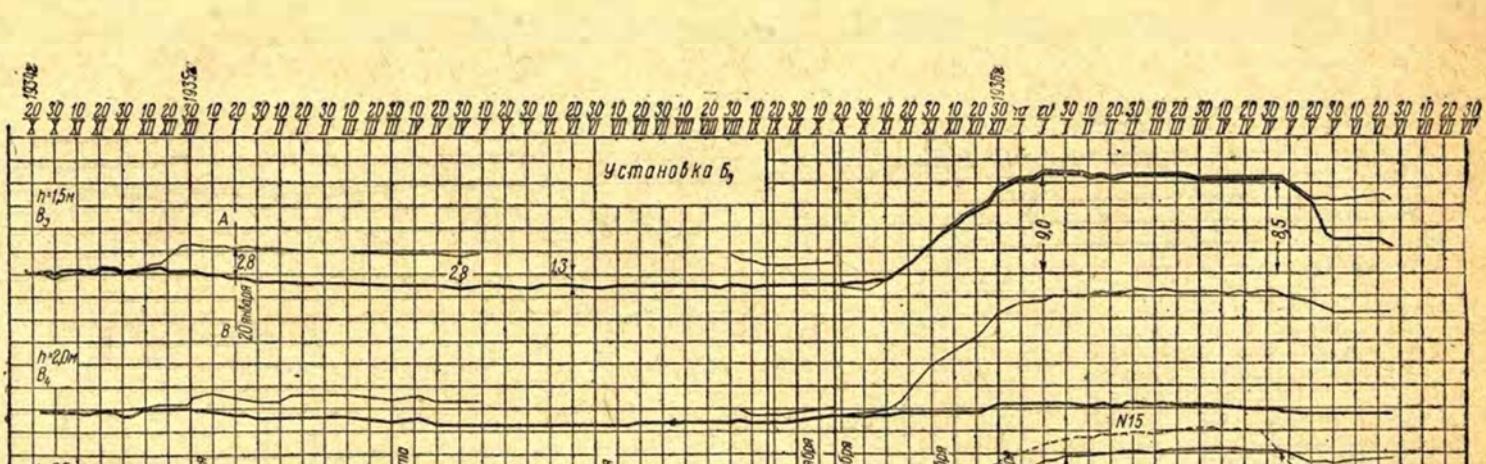
Фиг. 95


Установка Э
h=1,5м
h=2,0м
h=2,5м
N3
N2
N1 и N10
Максимальное оседание кольшка N3
Максимальное оседание кольшка N2
Максимальное оседание кольшков N1 и N10
Вертикальные перемещения в см
30 декабря
10 февраля
30 марта
30 июня
30 сентября
11 октября
31 декабря
30 июня

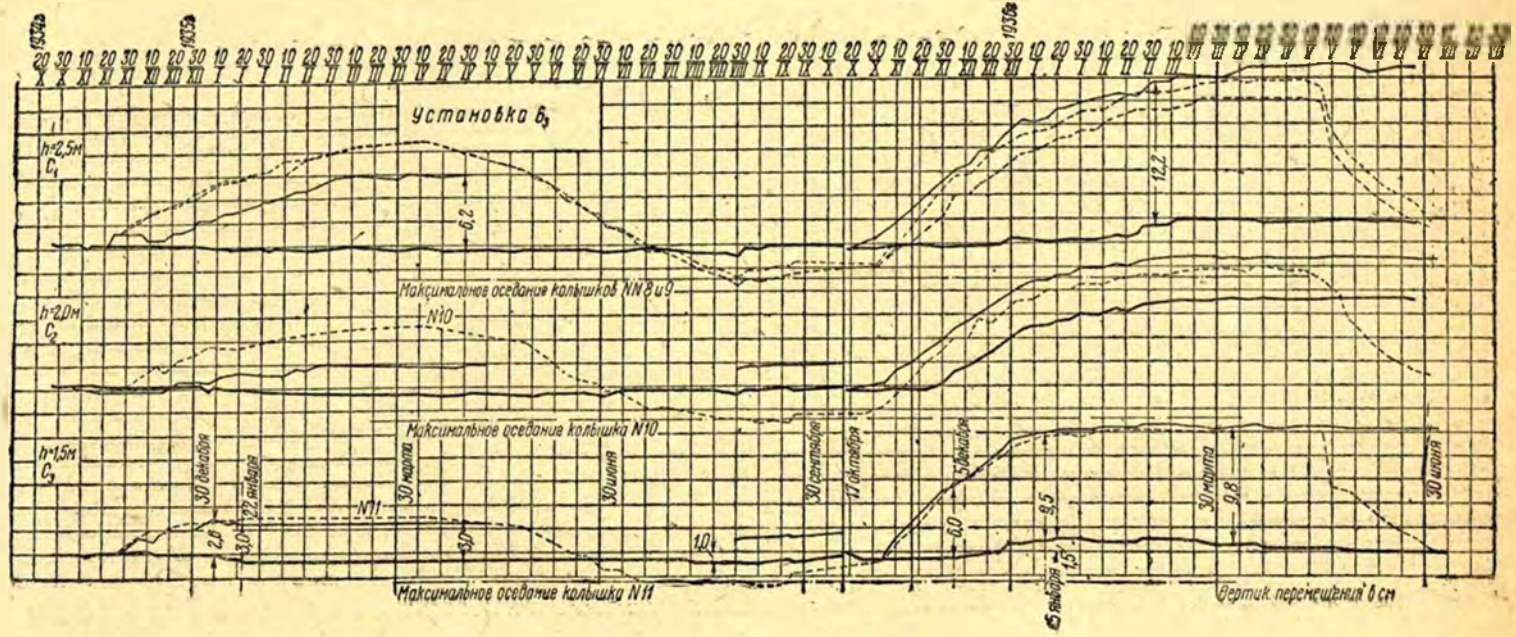
Фиг. 96


Установка B_1
h=0,5м
B_1
h=1,0м
B_2
N7
Максимальное оседание кольшка
10 декабря
30 декабря
30 марта
30 июня
30 сентября
17 октября
15 декабря
30 декабря
5 января
30 марта
30 июня
Отпорное оседание плиты B_1 см

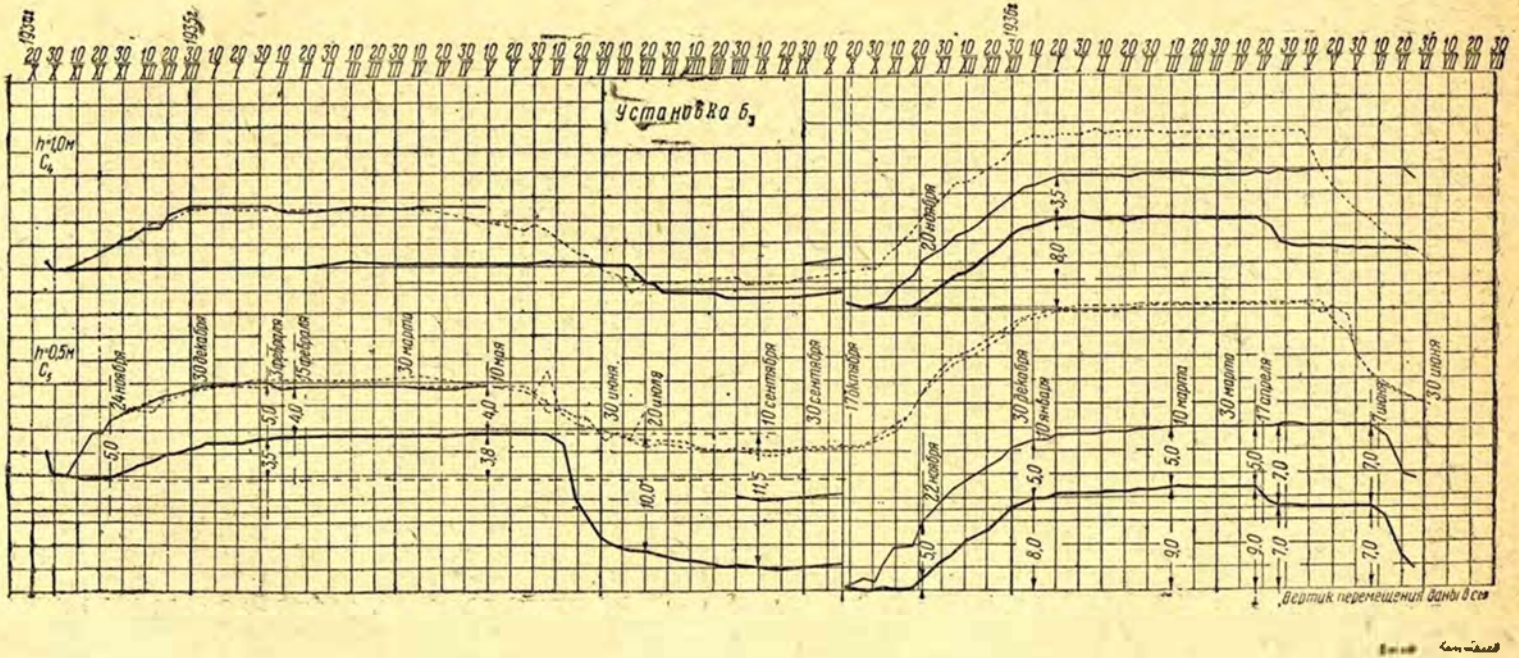
Фиг. 97


Установка Б₂
h=1,5м
B₂
A
B
2,8
20 января
2,8
4,3
9,0
8,5
h=2,0м
B₄
N15
h=2,5м
B₃
30 декабря
N15
30 марта
30 июня
30 сентября
17 октября
1 декабря
30 декабря
4,5
7,0
2,8
2,5
1,0
4,5
7,5
4,0
30 марта
30 июня
Вертикальные перемещения даны в см

Фиг. 98


1934г
1935г
1936г
Установка $б_3$
h=2,5м
C_1
h=2,0м
C_2
h=1,5м
C_3
Максимальное оседание колышков N8 и 9
N10
Максимальное оседание колышка N10
N11
Максимальное оседание колышка N11
30 декабря
22 января
30 марта
30 июня
30 сентября
11 октября
5 декабря
15 января
30 июня
6,2
2,8
3,0
3,0
10,1
12,2
8,5
0,0
1,5
9,8
Вертик. перемещения в см

Фиг. 99



Фиг. 100

В графиках пучиномеров, заглубленных на 1 *м*, а именно a_2, b_2, c_4 (фиг. 95—97— 100), характер пучения тот же, что и у заглубленных на 0,5 *м*. Основная разница заключается в величине пучения центрального стержня: у пучиномеров, заглубленных на 1 *м*, это пучение значительно меньше, чем у пучиномеров, заглубленных на 0,5 *м*, тогда как пучение муфт — того же порядка по величине. Это и понятно, так как толщина грунта под центральными стержнями пучиномеров a_2, b_2 и c_4 меньше. Что касается муфт, то к ним применимо то, что сказано о выпучивании столбов, различно заглубленных (см. фиг. 90 и соответствующие объяснения). Если бы все прослойки деятельного слоя при промерзании пучили одинаково, то уменьшение пучения центральных столбов было бы пропорционально глубине. Однако, как видим из опыта, этой пропорциональности нет: например, центральный стержень пучиномера c_4 в 1934 —1935 гг. совсем не был выпучен, как будто под ним находился вовсе не пучинистый грунт. В 1935 — 1936 гг. этот столб с 22 ноября начинало сильно пучить и пучило до 10 января, после чего пучение почти прекратилось.

Очень большая величина пучения центрального стержня, значительно более раннее начало его пучения по сравнению со стержнями пучиномеров a_2 и b_2, зарытыми на ту же глубину, и, наконец, быстрая и неполная осадка стержня в апреле, когда глубина весеннего протаивания не достигает и 0,5 *м*, — все это наводит на мысль, что центральный стержень в ноябре вверху примерз к муфте, которая и потянула его вверх. По всей вероятности, примерзание произошло благодаря конденсации паров в верхней, наиболее холодной, части муфты; очень возможно, что в апреле эта часть оттаяла и центральный стержень начал опускаться. Если эти соображения правильны, то пучение центрального стержня пучиномера c_4 должно было бы быть при отсутствии этого примерзания значительно меньше, и тогда утверждение, что нижележащие слои пучат меньше (к чему мы пришли раньше), остается в силе.

Вероятно, аналогичное примерзание стержня к муфте имело место и в пучиномере c_5, где на графике тоже имеется апрельский уступ понижения центрального стержня.

Чрезвычайно интересным и важным в строительном отношении является еще факт большого оседания центральных стержней при оттаивании. Стержни эти опускаются значительно ниже их первоначального положения в октябре 1934 г. (когда они были установлены). Стержни a_1, b_1 и c_5 опускаются ниже их первоначального положения в октябре соответственно на 8,6 и 8 *см*, как если бы грунт под ними стал податливее после зимнего промерзания, а между тем давление на грунт, передаваемое этими стержнями, как мы уже знаем, не превышает 1,5 *кг/см*^{2}. Вот почему, вероятно, дома, построенные на так называемых городках почти на поверхности земли или с незначительным заглублением, тонут постепенно в деятельном слое. Разрушающим агентом в этом случае является не столько пучение, сколько погружение в грунт. Грунт, повидимому, приобретает какие-то новые свойства, и эти свойства надлежит изучить более детально.

Перейдем теперь к рассмотрению графиков девяти пучиномеров, заглубленных на 1,5; 2, и 2,5 *м*.

Ни один из центральных стержней этих столбов в 1934 — 1935 гг. не был выпучен. Наоборот, все они незначительно — на глубину до 1 *см* — осели против первоначального положения. Что же касается пучения 1935 — 1936 гг., то оно чрезвычайно осложнилось явлением примерзания. 16 декабря 1935 г. в одном из пучиномеров, а именно в a_4, заглубленном на 2 *м*, центральный стержень был освидетельствован. Он действительно оказался примерзшим; с огромным трудом его удалось оторвать от муфты. Ввиду дефектности опыта 1935/36 г., происшедшей из-за примерзания муфт к центральным стержням, мы более не будем анализировать пучения установки $Б_3$ за это время. Все же, даже если отбросить опыт 1935/36 г., остается достаточно фактов, чтобы высказать весьма вероятное положение, что в районе установки $Б_3$ все явления наиболее интенсивного пучения происходят в верхнем слое толщиной до 1,5 *м*, более же глубокие слои не пучат или почти не пучат.

Утверждение, что с глубины 1,5 *м* пучение отсутствует (что справедливо для района установки $Б_3$), нельзя обобщать, но в общем можно определенно утверждать, что пучение грунтовых слоев при приблизительно однородном их составе и приблизительно одинаковой влажности с глубиной уменьшается и иногда, начиная с некоторой глубины, может совершенно отсутствовать. Из этого вытекает следствие, что изыскателю в местах строительства не лишне изучить пучение как функцию глубины, что, как увидим, сделать нетрудно.

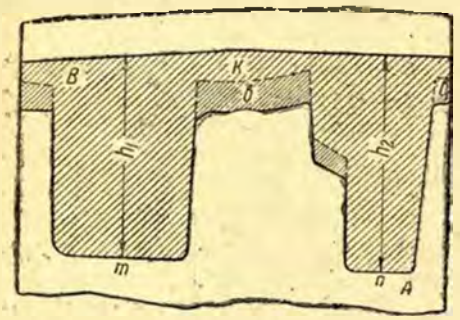
Дать исчерпывающее объяснение явлению уменьшения пучения с глубины ввиду недостаточной изученности этого вопроса пока нельзя, — можно лишь высказать несколько предположений.

С одной стороны, это можно было бы объяснить с точки зрения миграции влаги в период зимнего промерзания, когда влага перемещается к замерзающим, наиболее холодным местам и когда верхние слои обогащаются влагой за счет нижних. К такому представлению как будто бы приводят и лабораторные опыты, описанные выше. В этом случае нижние слои грунта должны обезвоживаться; это должно вести к понижению точки замерзания и к уменьшению, а возможно, и к уничтожению пучения в нижних слоях. Однако многочисленные бурения и анализы грунтов на влажность если и не опровергают такой возможности, то и не дают пока, при настоящем уровне наших знаний, определенных данных в пользу такого утверждения. Та пестрота гранулометрического состава, которая наблюдается, и много других обстоятельств делают общую картину распределения влажности столь пестрой, что установить какую-либо закономерность и разобраться в ней является делом весьма нелегким.

Второе объяснение заключается в том, что мы в нижних слоях (в годы исследования), хотя и имели отрицательные температуры, но не имели превращения воды в твердое состояние. О возможности существования такого переохлаждения мы говорили выше. Возможно, на-

конец, что здесь играют роль интенсивность промерзания, уменьшающегося с глубиной, и давление вышележащих слоев.

Мы указывали на то, насколько неравномерно распределение влаги в грунтах. Эта пестрота распределения влаги тесно связана с неоднородностью гранулометрического состава, а все это — с пестротой других свойств, (например, теплопроводности, расширяемости при замерзании и т. д.). В связи с этим возникают и некоторые новые соображения о механизме пучения грунтов, корректирующие и дополняющие схему, о которой говорилось в § 20, где для объяснения изменения расположения частиц грунта при замерзании предполагалось превращение вырезанного (мысленно) в талом грунте параллелепипеда в другой, замерзший и больший, по объему, но не подобный талому. Такое представление, приемлемое для объяснения деформаций вполне однородного грунта при его замерзании, является уже недостаточным для объяснения таких же деформаций в случаях, когда этой однородности в грунте не наблюдается.



Фиг. 101. Неравномерное замерзание грунтов

Ввиду сказанного нельзя считать, что нижняя поверхность зимнего промерзания опускается в виде поверхности плоской, а если и не плоской, то всегда остающейся параллельной самой себе. Есть все основания полагать, что это какая-то неровная поверхность, постоянно волнующаяся в зависимости от того, какие грунты, какие влажности, теплопроводности и теплоемкости настигаются спускающейся вниз волной холода. Разность одновременных температур на одной и той же глубине, в одном и том же районе, в пунктах, весьма близко расположенных друг от друга, повидимому, подтверждает такое представление.

Если допустить, что все изложенное о неоднородности грунта и неравномерности его замерзания верно, и предположить сверх того, что рассматриваемый грунт почему-либо не пучит, то вертикальный разрез замерзающего грунта может иметь вид, схематически и несколько утрированно показанный на фиг. 101, где заштрихованная часть B представляет замерзший грунт, а незаштрихованная A — талый.

Если допустим теперь, что пучение в замерзающем слое происходило пропорционально глубине промерзания, то картина изменится, и замерзший грунт займет положение, указанное пунктиром, если предположить, что в точках m и n он не вдавливается или почти не вдавливается в талый грунт.

Пучение более глубоко промерзших участков с высотами h_1 и h_2 будет больше, и они в своем пучении приподнимут лежащий между ними и примерзший к ним более тонкий участок k, который благодаря этому

будет отделяться от нижележащего талого грунта, образуя вакуум b, в который, возможно, будет засасываться вода, как она засасывается под поднимающиеся пучением столбы. Вода эта может засасываться как из нижележащего грунта, так и из соседних областей.

Наличие грунтовых и в особенности напорных вод, конечно, облегчит и усилит этот процесс. При таком процессе при меньшей влажности грунта возможно также образование пустот, в которых может образовываться иней, а иногда и более крупные кристаллы льда.

Описанная схема, конечно, не является единственной и не охватывает возможного многообразия явлений, которые функционально связаны с многочисленными комбинациями различных свойств замерзающих грунтов.

К сказанному следует добавить, что при наличии неоднородности грунта и содержания влаги в нем нет никакого основания думать, что вырезанный (мысленно) в таком грунте до замерзания небольшой параллелепипед останется параллелепипедом и после замерзания, что он не будет деформирован так, что плоские грани перестанут быть плоскими, а ребра — прямыми линиями. В этом случае в процессе деформирования опять-таки возможны отставание деформированных граней от нижележащего грунта и образование пустот, в которых будет при достаточной влажности скопляться вода, превращающаяся в дальнейшем в ледяные прослойки.

Конечно, вся схема механизма пучения с образованием прослоек приложима только к грунтам вроде пылеватых суглинков и пылеватых супесей, в которых перемещение влаги происходит со значительным трудом. Ввиду этого можно предполагать, что засасывание воды в образующиеся при замерзании вакуумы происходит главным образом из ближайших к вакууму областей за счет некоторого обезвоживания в этих местах грунта, так что грунт между прослойками льда будет менее влажным, чем он был до замерзания.

Несмотря на то, что приведенная схема механизма пучения как будто бы проще других, о которых речь была выше, она вследствие недостаточной проверки в природных и лабораторных условиях не может считаться ни вполне достоверной (т. е. отвечающей процессу, происходящему в природе), ни единственной. Отметив это, вернемся опять к установке $Б_3$ и к выводам, которые можно из этого опыта сделать.

Второй вывод, который мы можем сделать из рассмотрения этих графиков, тот, что после зимнего промерзания сопротивляемость грунтов в верхнем слое до 1,5 *м* сильно падает и грунты не могут выдержать даже тех слабых нагрузок, которые они выдерживают осенью. Этим, вероятно, и объясняются те большие оседания «столбов с различной засыпкой», на что мы обратили внимание выше.

Третий вывод будет относиться к шлаку, который в данных условиях является пучинистой засыпкой. Мы это уже видели, рассматривая графики пучения «столбов с различной засыпкой», которые были установлены в заболоченном месте. Здесь мы видим повторение этого явления в более нормальных условиях, когда заболоченности нет и когда пучение приборов, засыпанных сухим шлаком, не отличается от пуче-

ния других приборов. Данные о влажности приведены на фиг. 42 и 43.

Четвертый вывод касается влияния микрорельефа, который имеет определенное воздействие на величину пучения.

Для выяснения рассмотрим пучение колышков, забитых вокруг установки $Б_3$, как это видно на фиг. 94. В табл. 25 приводятся данные о шестнадцати колышках, расположенных, с одной стороны, в порядке рельефа местности, а с другой, — в порядке удаленности от заболоченного участка, который начинается, если смотреть на фиг. 94, вправо от колышков №6, № 7, № 8, на небольшом расстоянии от них. Это значит, что колышкам № 8 и № 9, лежащим на нулевой горизонтали, присваивается порядковый номер *1*, а колышку № 2, забитому в самой высокой точке выше горизонтали 0,3 рельефа,—последний порядковый номер 12. Те колышки, которые лежат справа от ряда приборов a_3, b_3, c_3, характеризуются как лежащие ближе к болоту, остальные же, считая в том числе и колышки № 3 и № 11, — как лежащие далее.

Таблица 25

Выпучивание колышков у установки $Б_3$

№ по пор.	№ колышков	Около какого пучиномера	Положение относительно горизонталей на фиг. 63	Положение относительно заболоченного участка	Размер пучения в см	
					в 1934—1935 г.	в 1935—1936 г.
1	8 и 9	c_1	На нулевой горизонтали	Ближе к болоту	12,0	16,0
2	7	b_1	Между *0* и *0,1*	То же	10,5	15,0
3	13 и 14	c_2	» *0* и *0,1*	Дальше от болота	8,5	12,5
4	15	b_2	На горизонтали *0,1*	То же	8,5	16,0
5	6 и 5	a_1	Между *0,1* и *0,2*	Ближе к болоту	10,0	16,0
6	10	c_2	То же	То же	8,0	12,5
7	11	c_3	»	Дальше от болота	5.5	12,5
8	12	c_4	»	То же	6,5	12,5
9	1 и 16	a_5	»	» »	7,5	13,5
10	4	a_2	Между *0,2* и *0,3*	Ближе к болоту	7,5	10,0
11	3	a_3	На линии *0,3*	То же	6,5	10,5
12	2	a_4	Выше *0,3*	Дальше от болота	6,0	11,5

Табл. 25 показывает, что чем ниже колышек и чем он ближе к заболоченному участку, тем пучение в общем больше. К этим выводам пришел и Датский. Однако строгой закономерности здесь нет, так как размер пучения зависит, конечно, и от целого ряда других факторов.

Устанавливаемый здесь факт неравномерности пучения как от микрорельефа, так и от других факторов, вопреки мнению Датского, важен для строителей и вот почему. Строитель, конечно, не может и не должен считаться с микрорельефом, но неравномерность и неодновременность пучения ему нужно иметь в виду. В самом деле, если по периметру большого массива, погруженного в деятельный слой, пучение

стремится развиваться неодинаково, то, как следствие, и выдергивающие напряжения по поверхности тоже могут иметь различную величину и достигать в некоторых местах величины, превышающей прочность смерзания. В этих местах мерзлый грунт будет отрываться (скалываться) от массива; таким образом, в период пучения грунт будет примерзшим к массиву фундамента не по всей поверхности, что создаст более благоприятные условия для его устойчивости. Между тем, анализируя графики пучения на спланированной оголенной площадке, мы видели, что пучение одинаково или почти одинаково. Точно так же, рассматривая пучение колышков у установки $Б_3$, мы видим, что пучение двух колышков № 8 и № 9 у пучиномера c_1 одинаково. То же надо сказать и о других трех парах: колья № 13 и № 14 у пучиномера c_5, № *6* и № *5* у пучиномера a_1, наконец, № *7* и № *16* у пучиномера a_5. Это значит, что сваи и фундаменты в виде отдельных столбов сравнительно небольших размеров выдергиваются при пучении силами, равномерно распределенными по периметру, чего нельзя утверждать относительно фундаментов больших размеров. Но поскольку в этом отношении экспериментальных данных нет и вопрос является совершенно не изученным, никаких практических предположений по этому поводу сделать пока нельзя.

Борьба с пучением

Раз процесс пучения сводится к выдергиванию, то сами собой напрашиваются и меры борьбы с пучением. Эти меры заключаются в следующем: 1) предохранить погруженное тело от примерзания к нему окружающего грунта;

2) сделать грунт непучинистым, т. е. другими словами, лишить его влаги, ибо где нет или мало воды, там нет и пучения; наиболее пригодными в этом отношении грунтами являются галька, гравий, крупный песок и крупный шлак, как легко отдающие влагу;

3) пропитать или покрыть столб или фундамент таким веществом, к которому бы грунт не примерзал или примерзал слабо;

4) заякорить столб или фундамент или нагрузить их так, чтобы силы пучения не в состоянии были бы их выдернуть.

Рассмотрим каждое из этих мероприятий отдельно.

Устройство муфт или обвертывание столбов каким-либо предохранительным слоем. Изучение этих методов начато на Сковородинской научно-исследовательской станции. В том, что муфты или обвертывание столба толем, положенным на слой вазелина, гудрона или смолы, помогут, сомневаться не приходится, но и рекомендовать эти способы пока нельзя, так как совершенно неясно то время, в течение которого эти мероприятия будут действительны. Мы уже видели, что муфты в установке $Б_3$ в течение первого года действовали хорошо, а на второй год в большинстве случаев примерзали к центральным стержням. Есть основания предполагать, что, изменив конструкцию, можно удлинить срок их действия, но насколько—неизвестно. То же нужно сказать и о всяких других предохранительных обволакиваниях, а также о про-

мазученном гравии, если бы даже таковой в известных случаях и был полезен. Пока неизвестно, сколько времени все это будет действовать, и только длительный опыт сможет дать на этот вопрос ответ. Обвертывание в пределах деятельного слоя толем по вазелину круглых гладких столбов можно рекомендовать пока (согласно опыту) только на срок 1 — 2 года и то при условии тщательного выполнения.

Удаление влаги из грунта. Это старый и испытанный метод, но он возможен лишь при известном рельефе местности, когда есть куда отвести воду и устроить дренаж. Вопрос осложняется, однако, тем, что устройство дренажа в мерзлотных условиях является делом нелегким. Детальнее об этом будет сказано ниже, здесь же ограничимся замечаниями, что применяемая часто засыпка фундаментов шлаком, песком или гравием при отсутствии дренажа не только ничему не помогает, но даже вредит.

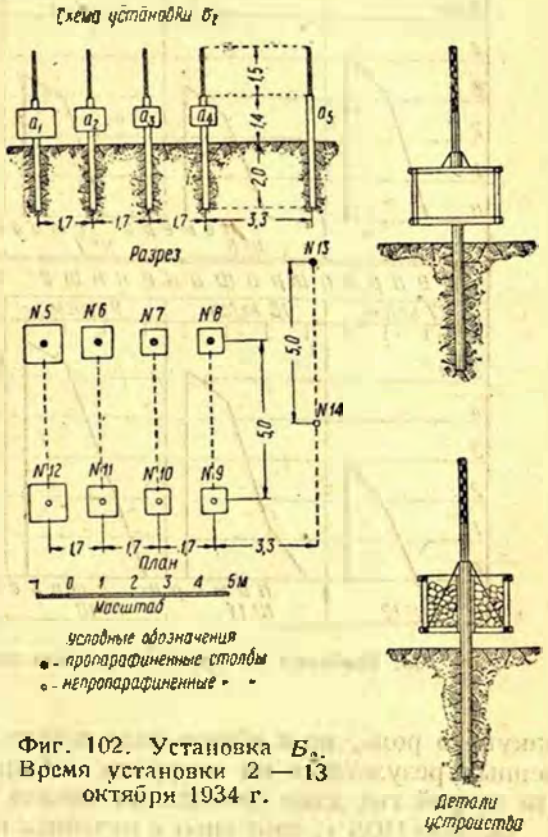
Покрытие или пропитывание фундаментов таким веществом, к которому грунт не примерзал бы или примерзал слабо. Такой опыт был сделан на Сковородинской станции. В качестве вещества, которым решено было пропитать столбы, был взят парафин. Парафин не смачивается водой, и потому было основание предполагать, что и вода при замерзании не будет к нему примерзать, а если и будет, то смерзание будет мало прочным. Этот опыт был еще соединен с другим, а именно был поставлен вопрос о величине усилия, которое нужно приложить к выдергиваемому силой пучения столбу, чтобы воспрепятствовать пучению и удержать столб на месте. Теоретически такая постановка вопроса имела полный смысл, несмотря на то, что огромная величина прочности смерзания была при постановке опыта хорошо известна. В самом деле, опыты ставились с круглыми деревянными цилиндрами, заглубленными в землю на 2 *м*; периметр этих цилиндров в среднем равнялся 28 *см*. Для того чтобы оторвать слой грунта в 20 *см* толщины, примерзший к такому столбу, потребовалось бы усилие свыше 1 *т* при предположении, что прочность смерзания не превышает 2 *кг/см*^{2}, т. е. величины для прочности смерзания небольшой.

В поставленных опытах нагрузка на столб не превышала 800 *кг*. Такая постановка опытов основывалась на следующих соображениях. Если рассматривать процесс пучения с самого начала его возникновения, то можно предполагать, что когда начинает замерзать и расширяться слой *pq* (фиг. 87), слой *mn* имеет незначительную величину и температуру, весьма близкую к температуре слоя *pq*, т. е. к 0°, а это значит, что и прочность его смерзания со столбом *AB* ничтожна. Таким образом, достаточно небольшой нагрузки на этот столб, чтобы воспрепятствовать его поднятию вместе со слоем *mn*, который при этом оторвется от столба *AB* и поднимется вверх, скользя по столбу. Таким образом, смерзание столба с грунтом нарушается в самом начале процесса. Нечто подобное должно происходить и далее при промерзании и пучении нижележащих слоев. Те огромные силы прочно-

сти смерзания, о которых говорят Цытович и др., возникают при более низких температурах. Но замерзающий и пучащий слой не будут ожидать (выражаясь образно), пока вышележащий слой сделается достаточно толстым и основательно замерзнет и примерзнет к столбу; он начнет пучить, как только начнет замерзать, т. е. когда температура вышележащего слоя будет только немногим ниже температуры этого слоя и, следовательно, близка к нулю. Таковы были предпосылки для постановки описанного ниже опыта.

Опыт пучения под нагрузкой. Установка $Б_2$

Пять круглых деревянных столбов длиной 3,4 *м* каждый с периметром поперечного сечения 28 *см* были зарыты в землю на глубину 2 *м*, так как эта глубина, как показал опыт пучения на оголенной площадке (фиг. 70, 71), соответствовала наибольшему выпиранию. Один из этих пяти столбов был оставлен без нагрузки, а на другие были навешены деревянные ящики, как показано на фиг. 102. Эти ящики были загружены камнем с таким расчетом, чтобы подошва наименее нагруженного столба передавала на грунт давление 2 *кг/см²*, подошва второго — давление 4 *кг/см²*, третьего — 8 *кг/см²* и, наконец, пятого — 12 *кг/см²*.

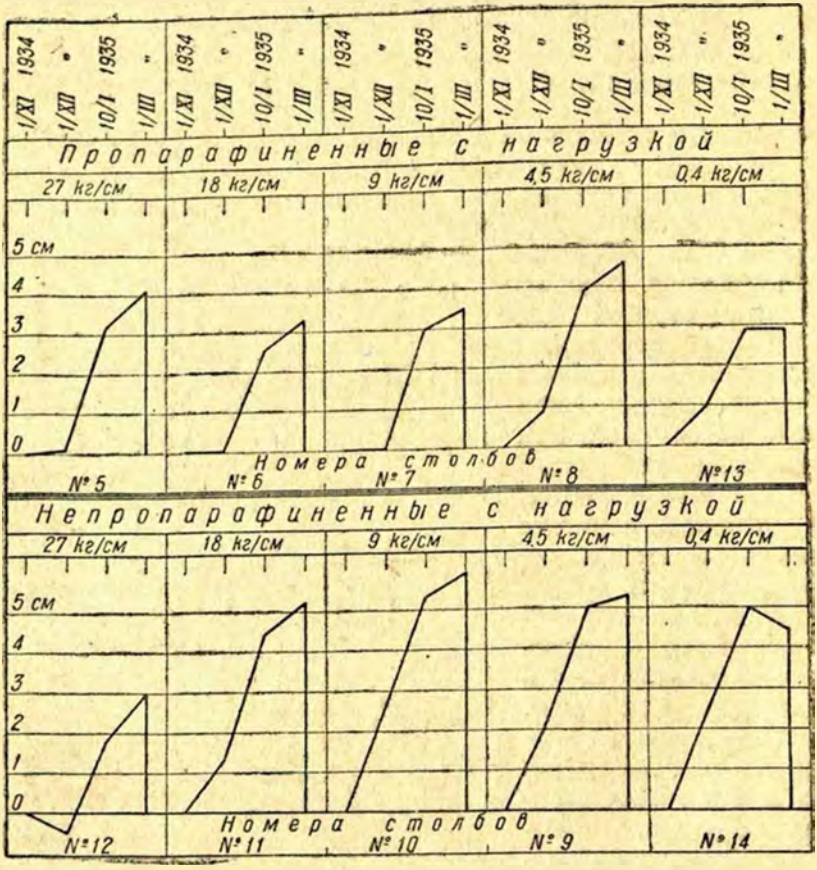


Фиг. 102. Установка $Б_2$. Время установки 2 — 13 октября 1934 г.

Если отнести эти нагрузки к 1 *пог. см* периметров сечений этих столбов, то получим соответственно следующие нагрузки: 4,5 *кг/пог. см* периметра; 9,0 *кг/пог. см* периметра; *18 кг/пог. см* периметра и 27 *кг/пог. см* периметра. Рядом, в расстоянии 5 *м* от этих столбов, была установлена вторая точно такая же серия столбов, с той лишь разницей, что погружаемая в землю часть столбов была пропарафинена. Столбы покрывались парафином и вдвигались в горячую печь, какие делаются для выпечки хлеба; парафин таял и впитывался в дерево. Сверху к столбам присоеди-

нялись разделенные на сантиметры рейки, по которым и производилась нивелировка столбов.

На фиг. 103 даны выборки из графиков пучения этих столбов. Из них ясно, что как нагрузка, так и парафинение не помогли. Правда, есть как будто некоторый намек на то, что в общем пучение пропарафиненных столбов меньше и начинается позже и что нагрузка сыграла



Фиг. 103. Выборка из грунтов пучения десяти столбов установки $Б_2$

какую-то роль, но в общем надо сказать, что никаких практически ценных результатов ни нагрузка ни пропарафинирование не дали. На второй год даже запоздания начала пучения не наблюдалось.

Осенью 1936 г. этот опыт с пучением под нагрузкой был поставлен несколько по-иному. На фиг. 104 изображен один из приборов, применявшихся в этом опыте. Прибор, как видно из чертежа, состоит из сваи A, забитой комлем вниз при помощи паровой иглы на глубину 5 $м$, столба B, зарытого в землю на глубину 2 $м$ (т. е. почти на всю глубину деятельного слоя), и рычага C, один конец

которого прочно соединен со сваей железным хомутом, а другой конец нагружен ящиком D с камнем. В точке N рычаг C опирается на столб B.

Обозначим теперь вес рычага через p, вес ящика с камнем и приспособлениями для подвешивания — через P, расстояние центра тяжести рычага C до оси сваи — через l_1, расстояние ad от хомута до подвески ящика—через L и ab—расстояние от оси сваи до оси столба—через l.

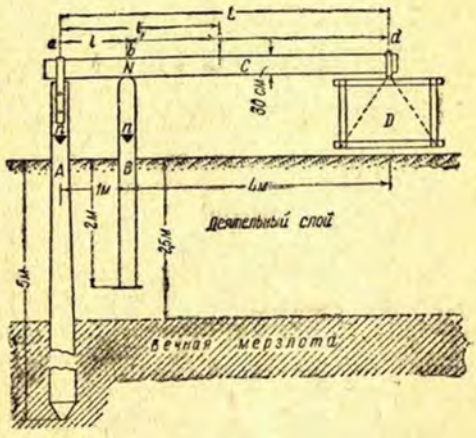
Нетрудно видеть, что величина давления R на столб B выразится через эти величины так:

$$R = \frac{pl_1 + PL}{l},$$

а выдергивающее сваю усилие

$$Q = \frac{p(l_1 - l) + P(L - l)}{l}.$$

Таких приборов было установлено четыре; они были расположены, как показано на фиг. 105. Кроме столбов b_1, b_2 b_3, b_4, на которые опирались соответственные рычаги, в целях сравнения было установлено еще два столба b_0 и b_5, зарытых на ту же глубину, но ничем не нагруженных. На фиг. 106 дан фотоснимок этой установки, называемой для краткости установкой $Б_5$.



Фиг. 104. Схема устройства прибора при изучении пучения столбов под нагрузкой

Сваи диаметром 27 — 31 *см* были забиты 7 — 10 августа 1935 г.; столбы диаметром 21 *см* были установлены 2 — 5 октября 1936 г.; около середины октября были установлены рычаги, а в начале декабря того же года была осуществлена надлежащая загрузка камнем ящиков D.

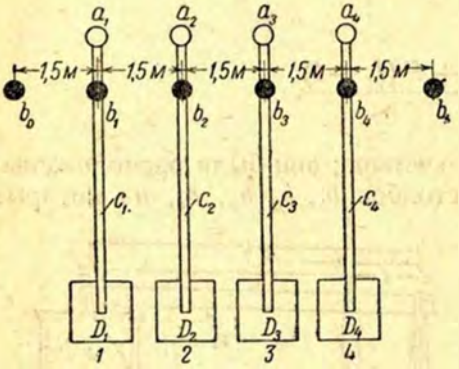
С началом заморозков на все столбы и сваи начинают действовать выдергивающие силы, развивающиеся при пучении, которые стремятся приподнять и сваи и столбы. Что касается столбов b_0 и b_5, то их перемещению вверх ничто не мешает и они могут служить эталонами свободного перемещения столбов, с которым можно сравнивать пучение других столбов, одинаково с ними заглубленных, но находящихся под нагрузкой.

Выдергивающим силам пучения, действующим на столбы b_1, b_2, b_3, b_4, противодействуют давления от соответствующих рычагов. Если выдергивающее столб усилие будет больше давления рычага,

то столб будет пучить; если же это усилие будет меньше или равно давлению рычага на столб, то столб останется в покое.

Что касается свай, то на каждую из них постоянно действует выдергивающая сила, определяемая приведенной выше формулой. В период пучения к этой силе присоединяется и выдергивающая сила, обусловленная пучением. Силам, выдергивающим сваи, противодействует смерзание этих свай с вечной мерзлотой.

Вертикальные перемещения и столбов и свай определялись нивелировкой, для чего в них были забиты на расстоянии около 30 *см* от дневной поверхности железные штыри *пп* для постановки нивелировочной рейки. Отметки этих штырей определялись относительно отметки установленного недалеко неподвижного репера.



Фиг. 105. План расположения приборов при изучении пучения столбов под нагрузкой

Допустим теперь, что нам удалось каким-нибудь способом создать давление R_1 на какой-нибудь столб, в точности равное максимальному усилию R'_1, выдергивающему этот столб в период пучения; тогда $R_1 = R'_1$.

В этом случае столб пучить не будет, но величина R_1 как зависящая от поперечных размеров столба весьма мало характеризует выдергивающие силы пучения.

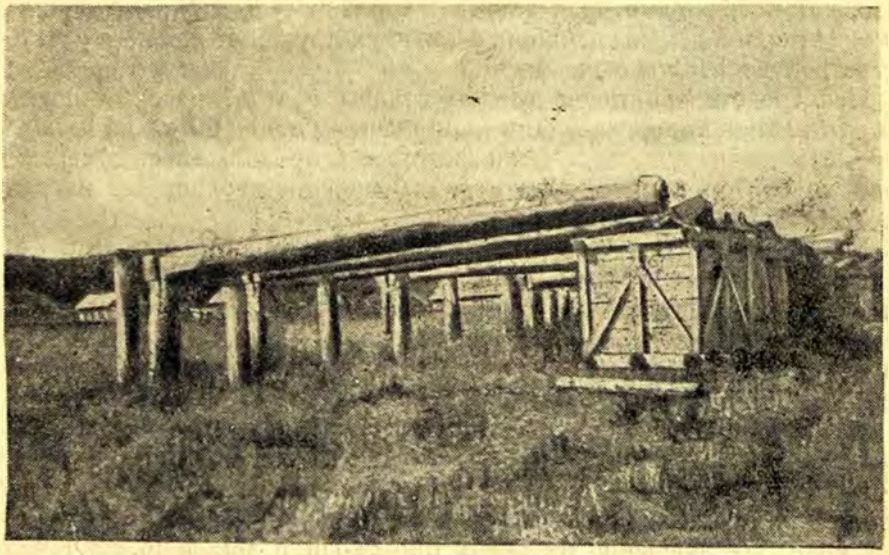
Мы знаем, что выдергивающее усилие R'_1 есть равнодействующая элементарных выдергивающих сил, каким-то образом распределенных по поверхности или по части поверхности столба, конечно, в пределах заглубления этого столба в деятельном слое. Мы знаем также, что распределение этих сил по высоте столба меняется в процессе пучения с изменением глубины промерзания и что величина их на какой-либо элементарной площадке поверхности столба не является, вообще говоря, величиной, постоянной во времени. Однако законов изменения элементарных выдергивающих сил по высоте столба мы не знаем. Но каково бы ни было распределение этих элементарных сил в какой-нибудь момент по высоте столба, мы имеем известное основание думать, что если в области действия выдергивающих сил мы разделим мысленно всю поверхность столба на вертикальные полоски шириной, например, в 1 *см*, то вдоль каждой такой полоски эти элементарные выдергивающие силы будут распределены одинаковым или почти одинаковым образом и по положению и по величине, из чего следует, что равнодействующие элементарных выдергивающих сил, действующих на этих полосках, равны или почти равны между собой.

Это дает основание рассматривать выдергивающее напряжение, развивающееся на такой полоске, как меру выдергивающего усилия,

развивающегося при пучении. Таким образом, если значение давления R_1, уравновешивающего силу пучения R'_1, выраженное, например, в килограммах, разделить на периметр поперечного сечения тела (в данном случае — в установке $Б_5$ — на длину S окружности поперечного сечения столба, выраженную в сантиметрах), то равнодействующая r выдергивающих сил на вертикальной полоске шириной в 1 *см* определится так:

$$r = \frac{R_1}{S} \text{ } кг \text{ на } 1 \text{ } пог.\ см \text{ периметра.}$$

Эту величину r можно назвать напряжением выдергивающих при пучении сил на 1 *пог. см* периметра поперечного сечения призматического тела, заглубленного в деятельный слой.



Фиг. 106

Условившись о таком способе характеристики выдергивающих сил, рассмотрим, что дают наблюдения над пучением столбов под нагрузкой.

Как уже было сказано, все столбы — от b_0 до b_5 (фиг. 105) — были зарыты в деятельный слой на глубину 2 *м*, причем столб b_2 внизу в пределах деятельного слоя был смазан техническим вазелином и обвернут толем.

Загрузка столбов b_1, b_2, b_3 и b_4 началась 13 — 14 октября 1936 г., когда были установлены рычаги c_1, c_2, c_3 и c_4, весившие от 200 до 240 *кг*, вследствие чего давление на столбы было порядка 500 — 600 *кг*, а усилия, выдергивающие сваи, — порядка 300 — 360 *кг*. В таком по-

ложении установка $Б_5$ находилась до первой декады декабря того же 1936 г., и уже эта сравнительно незначительная нагрузка отразилась на пучении столбов. В то время как ненагруженные столбы, начиная примерно с середины октября, неизменно и почти равномерно поднимались вместе с пучащим грунтом, пучение других столбов было задержано этой нагрузкой до конца октября. Что же касается свай, то их положение осталось неизменным, за исключением одной, которая с конца первой декады ноября начала перемещаться вверх.

В первой декаде декабря 1936 г. были навешены на рычаги и загружены камнем ящики так, что давление на столб b_4 могло уравновесить выдергивающие напряжения 60 *кг* на 1 *пог. см* периметра, давление на столбы b_3 и b_2 было рассчитано на выдергивающие напряжения 90 *кг* на 1 *пог. см* периметра и, наконец, давление на столб b_1 рассчитано на напряжение 120 *кг* на 1 *пог. см* периметра.

Под влиянием этих нагрузок все столбы, как и можно было ожидать, дали осадку, которая для двух столбов — b_1 и b_2 — окончилась в конце первой декады декабря, а для двух других столбов — b_3 и b_4 — в третьей декаде того же месяца.

Непосредственно после осадки столбы b_3 и b_4, рассчитанные на сопротивление выдергивающим напряжениям в 90 и 60 *кг* на 1 *пог. см* периметра, обнаружили пучение, которое и продолжалось до середины февраля 1937 г. Нужно заметить, что пучение столбов без нагрузки продолжалось тоже до этого времени.

Величина пучения столбов без нагрузки равнялась $\sim$ 8,5 *см*, а величина пучения столбов b_4, b_3 — соответственно 2,3 *см* и 1,5 *см*. Что же касается столбов b_2 и b_1, т. е. одного обвернутого толем и нагруженного для сопротивления выдергиванию в 90 *кг* на 1 *пог. см* периметра, а другого для сопротивления выдергиванию в 120 *кг* на 1 *пог. см* периметра, то эти столбы никакого пучения не обнаружили.

Как уже сказано, выдергивание из грунта одной из четырех свай началось в конце первой декады ноября 1936 г., т. е. почти за месяц до полной нагрузки. С момента же полной нагрузки приборов ящиками с камнем началось постепенное выдергивание из земли и остальных свай. Перемещение их вверх происходило довольно равномерно и продолжалось тоже до середины февраля, как и пучение столбов b_0, b_5, b_3 и b_4. Величина выдергивания свай a_1, a_2, a_3 и a_4 соответственно равнялась 4,5; 5; 7,2 и 4,5 *см*.

С середины февраля 1937 г. до конца апреля того же года вся установка $Б_5$ стояла неизменно. В конце апреля начал оседать столб b_3, а в середине мая — столб b_4.

Тот факт, что столб b_1 с сопротивлением выдергиванию в 120 *кг* на 1 *пог. см* периметра не был увлечен пучением, дал основание в целях проверки довести до тех же размеров сопротивление выдергиванию и нагрузку на столбы b_3 и b_4. В связи с этим 10 — 15 октября 1937 г., т. е. перед началом пучения, столбы b_3 и b_4 были нагружены до сопротивления выдергивающим напряжениям в 120 *кг/пог. см* периметра. В результате ни один из столбов в зимний сезон 1937/38 г. не пучило, только у двух свай наблюдалось вертикальное перемещение

вверх под действием выдергивающих сил, но и то в значительно меньшем масштабе, чем в сезон 1936/37 г.

Из этих наблюдений по установке $Б_5$ и из других, приведенных выше, вытекают следующие выводы:

1) пучение призматического тела, находящегося в пределах деятельного слоя, уменьшается по мере увеличения нагрузки на него (столбы b_3 и b_4 в сезон 1936 / 37 г.); выше мы видели, что уменьшение пучения может быть достигнуто также заделкой в вечную мерзлоту (см. фиг. 86 и соответствующий текст);

2) пучения призматического тела вовсе не происходит при нагрузке, рассчитанной на сопротивление выдергивающим напряжениям в 120 *кг/пог. см* периметра, что, конечно, относится к грунтам, по влажности и гранулометрическому составу аналогичным грунтам Сковородинской станции;

3) надо полагать, что в грунтах с меньшим содержанием пылеватых и глинистых частиц и с меньшим содержанием влаги по сравнению с грунтами на территории Сковородинской станции величина выдергивающих сил, развивающихся при пучении, будет меньше;

4) 120 *кг* на 1 *пог. см* периметра и есть приблизительно та прочность смерзания, или, как иногда говорят, сила смерзания, которая развивается в реальных условиях пучения и развития выдергивающих сил, конечно, при указанных выше составе и влажности грунтов.

Из рассмотрения графика фиг. 86 мы видим, что пучение столбов, заглубленных на 4 и 3,5 *м*, происходит не каждый год, из чего и выводим заключение, что выдергивающие силы пучения не являются в различные годы одними и теми же. Поэтому ввиду краткости исследования нельзя на выдергивающее напряжение в 120 *кг* на 1 *пог. см* периметра смотреть, как на максимальное, и ради осторожности лучше при расчете, например, фундаментов принимать его равным 150 *кг* на 1 *пог. см* периметра, что будет для условий, аналогичных условиям Сковородинской станции, весьма близким к истине.

Во всяком случае на описанные выше исследования нужно смотреть, как на начальные, далеко не законченные, а на полученные результаты. — как на первое приближение. Другие грунты и другие условия могут дать другие цифры.

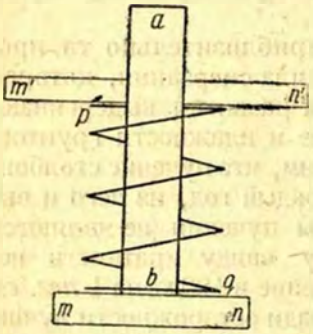
Допустим для примера, что рассматриваемые нами столбы поверх деятельного слоя залиты слоем воды в 10 — 15 *см*. В этих условиях картина пучения и развития выдергивающих сил может совсем измениться. В самом деле, в этом случае прежде всего замерзнет и примерзнет к столбам этот слой воды, причем никакого пучения не будет. Далее начнет замерзать находящийся под слоем льда грунт, который в процессе пучения будет стремиться оторвать от столбов этот прочно примерзший к ним слой льда. При этом выдергивающие силы могут значительно возрасти по сравнению с определенными выше.

Все это, как видим, требует дальнейших исследований и применения более совершенных приборов, о которых будет сказано ниже, но которых в то время, когда велись описанные выше исследования,

в распоряжении Сковородинской станции не было. При помощи этих приборов максимальная интенсивность пучения будет определяться автоматически, тогда как в установке $Б_5$ максимальное выдергивающее напряжения искалось ощупью при помощи различной загрузки столбов в сезон 1936/37 г.

Заякоривание столба или фундамента. Выше было выяснено, что когда с наступлением заморозков сверху образуется слой зимнего промерзания, то нижележащий, еще не замерзший грунт при замерзании действует, как пружина, или, правильнее, как домкрат, который стремится приподнять замерзший верхний слой. Давя на этот слой, он с равной силой давит и на нижележащий слой. Когда в деятельном слое нет никакого постороннего тела, то эта приподнимающая сила как раз равна весу слоя того грунта, который она приподнимает, и при этом никаких особых вертикальных напряжений, как утверждают некоторые авторы, не возникает.

Если же в деятельный слой погружено постороннее тело (например, столб), то к этой силе прибавляется еще сила, необходимая для выдергивания этого примерзшего к грунту столба. Таким образом, мы видим, что возле столбов и фундаментов должны образоваться поля большего напряжения. Всякое устройство, препятствующее выдергиванию столба, увеличивает напряжение в поле. Если устроить заякоривание так, что этим устройством будет уловлена вся реактивная сила пружинящего грунта, то выдергивания столба и его пучения совсем не будет. То, что при этом будет происходить в грунте и со столбом, схематически изображено на фиг. 107. Здесь *ab* — столб; роль якоря играет прочно приделанная к нему пластинка *mn*; слой зимнего промерзания, примерзший к столбу, осуществлен в виде прикрепленной к столбу пластинки *m'n'*. Роль расширяющегося и пучащего грунта играет пружина *pq*, которая стремится оторвать от столба пластинку *mn* и пластинку *m'n'* и разорвать столб *ab*. Вообразим теперь, что напряжение пружины растет. В результате могут произойти следующие явления: либо разорвется столб *ab* либо будет оторвана от столба одна из пластинок. Возможен еще третий случай, когда отрываются сразу обе пластинки, но этот случай так мало вероятен, что о нем не стоит и говорить. Как мы видели раньше, деревянные столбы, заглубленные в землю на 4,5 *м* и более, не пучат, деревянные столбы, работающие при этом на растяжение, не разрываются; отрывается лишь слой зимнего промерзания, который и скользит при этом вверх вдоль столба. На нашей модели, приведенной на фиг. 107, это будет соответствовать отрыву и скольжению вверх пластинки *m'n'*. Вот эта кажущаяся возможность принять давление расширяющегося при замерзании грунта на достаточно развитый



Фиг. 107

якорь и служила предпосылкой при устройстве опытной ограды вокруг территории станции. Хотелось найти наименьшие размеры якоря *mn* и наименьшее заглубление столба, при котором не происходило бы пучения, так как зарываться в землю на 4,5 *м* и более в условиях вечно мерзлых грунтов — дело дорогое.

Конечно, если бы роль пружины играли вода или сильно переувлажненный грунт, который иногда называют плывунной массой, то ни о каком заякоривании в такой среде не могло бы быть и речи, и возможность уловить реактивное давление или его часть верхней поверхностью якоря *mn* (фиг. 107) явилась бы лишь в том случае, если вода или плывунная масса не смогли проникнуть под якорь *mn*; последнее могло бы получиться, например, в том случае, если бы якорь находился, хотя только нижней своей частью, в пределах вечной мерзлоты.

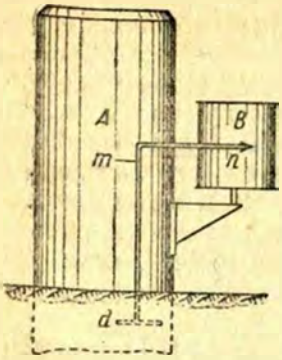
Здесь надо оговориться и указать, что схема фиг. 107 является вообще лишь грубым приближением, не дающим динамики процесса пучения. Дело в том, что в действительности пластинка *m'n'* не является в буквальном смысле слова прикрепленной к столбу *ab*, что толщина этой пластинки по мере промерзания постепенно растет и что в случае прочного заякоривания, когда столб *ab* не пучит, эта пластинка, или, что то же, постепенно промерзающая часть грунта, находится все время в движении, перемещаясь вверх вдоль столба. Поэтому, говоря о смерзании незыблемо заякоренного столба *ab* со слоем грунта, нужно не забывать, что это смерзание (если оставить этот термин) происходит с телом, находящимся в непрерывном движении, в чем, повидимому, и заключается главнейшее отличие только что описанного смерзания в процессе пучения от смерзания, так сказать, статического, которое изучалось Цытовичем и Сумгиным в лабораториях.

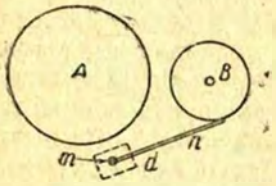
Нужно также предполагать, что кроме этого своеобразного смерзания в движении, только что описанного, известную роль играет еще и трение. Однако отделить силу смерзания от силы трения мы пока не можем, и величина напряжения 120 *кг/пог. см* периметра, которой мы оценивали выдергивающие силы, слагается, конечно, из двух сил: собственно силы смерзания в движении и трения.

Для того чтобы убедиться в непрерывности скольжения грунта вдоль незыблемо заякоренного столба, на Сковородинской станции был проделан следующий опыт. На одном из незыблемо стоящих в течение нескольких лет столбов оголенной площадки (фиг. 70) был укреплен на кронштейне барабан *B* самописца (делавший один оборот в 7 дней), как это схематически показано на фиг. 108. В непосредственной близости от столба *A* был укреплен вертикальный металлический стержень *m*, кончающийся внизу пластинкой *d*, зарытой на несколько сантиметров (3 — 5 *см*) в землю.

С началом зимнего промерзания грунта эта пластинка прочно с ним смерзлась, и если приподнимался или опускался грунт у столба *A*, то приподнималась или опускалась и эта пластинка, заставляя перемещаться стержень *m*. К стержню *m* вверху было прикреплено перо *n*,

которое, следуя за движением стержня m, чертило на поверхности вращающегося барабана B линию, характеризующую пучение грунта. Бумага на барабане менялась с каждым его оборотом и отдельные куски последовательно склеивались для получения общего графика пучения. Полученная таким образом лента имела в длину несколько метров. Судя по этому графику, пучение у столба A в 1937 г. началось 14 октября и кончилось 14—15 декабря того же года, так как с этого числа до конца апреля 1938 г. перо на самописце чертило горизонтальную линию.

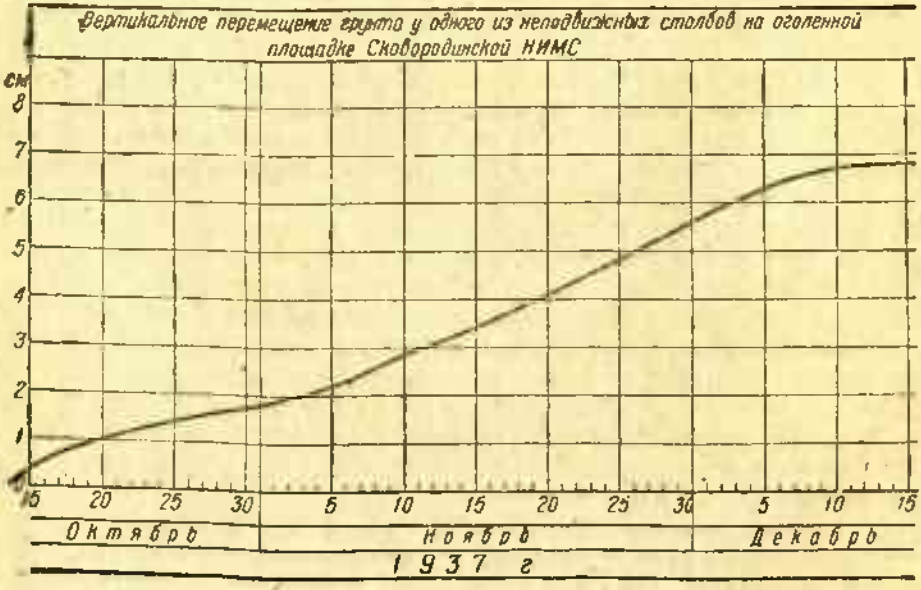




Фиг. 108. Установка для записи пучения грунта у неподвижного столба A

На фиг. 109 дан этот график в сжатом по времени масштабе сравнительно с оригиналом, снятым с самописца. Из него мы видим, что скольжение пучащего грунта вдоль столба происходило без всяких перерывов и почти равномерно. Повторный опыт в сезон 1938/39 г. дал аналогичные результаты.

Сделав это уточнение, вернемся к нашей примитивной схеме пучения (фиг. 107), которая в свое время, т. е. перед установкой ограды вокруг территории мерзлотной станции, служила предпосылкой для испытания различных способов заякоривания столбов этой ограды.



Фиг. 109. Ординаты кривой представляют постепенное поднятие грунта вдоль столба

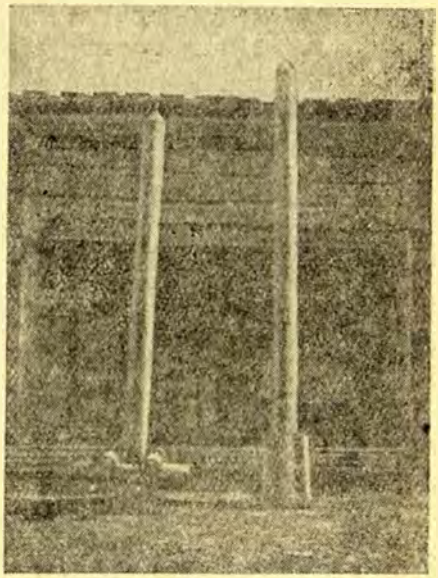
Опытная ограда вокруг территории станции и результаты наблюдений над ней

Осенью 1934 г. вдоль границы станции было установлено для устройства ограды 169 столбов. Все эти столбы было решено использовать для исследования пучения. Для этого все столбы были разделены на три типа.

Первый тип представляли столбы, у которых внизу просто-напросто были сделаны зарубки. Предполагалось, что эти зарубки увеличат силу трения при выдергивании и таким образом смогут уменьшить пучение.

Второй тип представляли столбы, на которых приболчивались две накладки, как это показано на фиг. 110.

Третий тип столбов имел внизу парные крестообразно расположенные схватки, как видно на той же фотографии. О детальном устройстве таких схваток будет сказано ниже.



Фиг. 110

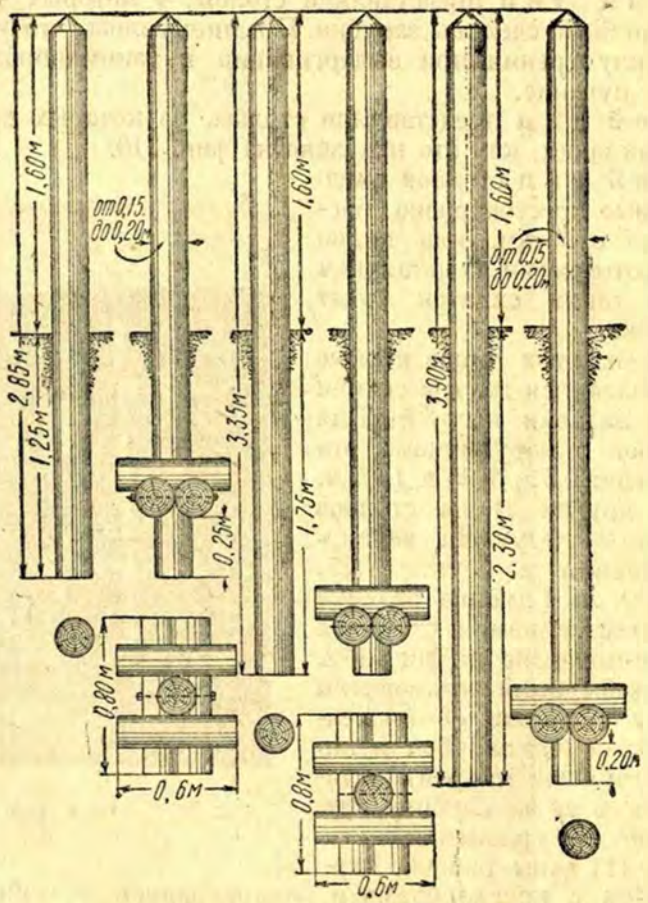
Каждый из этих типов в свою очередь разделялся на три секции по глубине заделки в грунт. Для типа столбов с зарубинками эти глубины были: 0,75; 1,25 и 1,75 *м*. Для двух других типов столбов были приняты следующие величины заглубления в грунт: 1,25; 1,75 и 2,30 *м*. Глубина заделки столбов с крестовинами и столбов с накладками показана на фиг. 112. Все эти столбы были установлены вперемежку с самыми обыкновенными столбами (без зарубок и каких-бы то ни было якорей), установленными на ту же глубину, что было нужно для сравнения.

На фиг. 111 даны рабочие чертежи столбов с крестообразным заякориванием — единственных, давших при опыте более или менее ощутительные результаты, как это будет видно ниже.

Выборки из этих наблюдений представлены в виде графиков фиг. 112. Пучение остальных столбов по сравнению с пучением обыкновенных нового ничего не вносит, почему и графики их пучения не приведены. Все 169 столбов были расположены по границе *defa* (фиг. 10) нового, прирезанного к старому, участка станции. Все они были установлены с 23 августа по 15 сентября 1934 г., но нивелировка не производилась до 21 ноября. К этому времени во все эти столбы были забиты железные штыри из квадратного железа для по-

становки реек, после чего произведена первая нивелировка. Случайные отметки, которые были получены при этой нивелировке, были условно приняты за нули, относительно которых и определялось дальнейшее пучение этих столбов.

Летом 1935 г. столбы вдоль линии *ef* в связи с ремонтом лежащей рядом водопроводной линии были вырыты. Они были заменены столбами иной конструкции, по-другому зарытыми и отнесенными в глубь



Фиг. 111. Крестообразно закрепленные столбы ограды Сковородинской НИМС (1934 г.)

станционной территории на 6 *м* от старой линии. Установка этой линии была закончена в июле 1935 г., в конце июля была произведена и первая нивелировка. Отметки этой нивелировки условно были приняты за нули, от которых и отсчитывались дальнейшие перемещения этих столбов в вертикальном направлении.

Таким образом, графики *I*, *II* и *III* на фиг. 112 представляют результаты нивелировки нетронутых столбов на границах *af* и *ed*

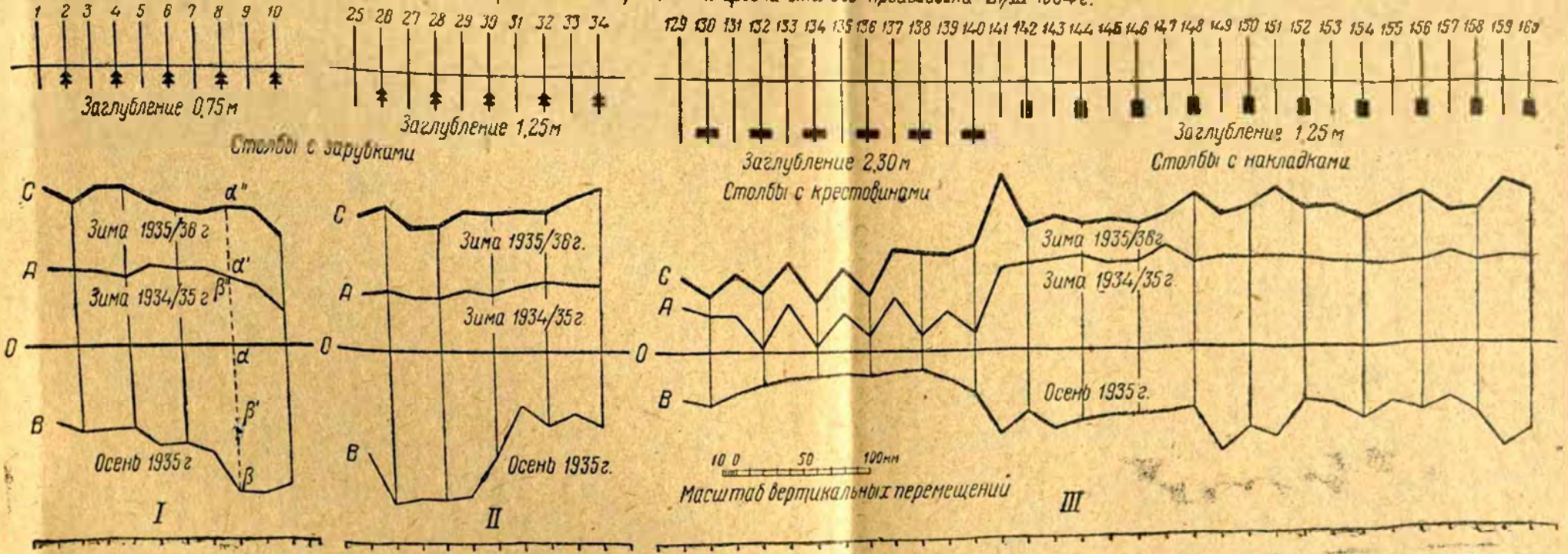
график *IV* — результаты нивелировки части ограды на участке *ef* в зиму 1934/35 г. и, наконец, график *V* — результаты нивелировки ограды, установленной взамен разобранной на том же протяжении *ef*. На этом последнем графике даны результаты нивелировки осенью 1935 г. и зимы 1935/36 г. Чтобы объяснить, как построены графики, рассмотрим график *I* фиг. 112.

Ординаты линии *A* представляют максимальные величины пучения в зиму 1934/35 г. Внизу даны в миллиметрах величины этих ординат и даты, когда пучение достигло этой величины. Из этих данных видим, что пучение столбов достигает своего максимума в марте. Ординаты линии *B* представляют последующему осадку тех же столбов, считая от точки наивысшего пучения. Величины этих осадок откладываются опять-таки от нулевой линии, а не от ломаной линии *A*, так что если бы мы пожелали узнать истинное положение какого-либо столба в результате пучения и последующего оседания, то должны бы были ординату линии *B* вычесть из ординаты линии *A*. Так, для столба № 8 ординату $\alpha\beta$ мы должны были бы отложить от точки α_1 так, чтобы $\alpha_1\beta_1$ равнялось $\alpha\beta$; тогда было бы ясно, что в результате пучения и последовавшего затем оседания столб № 8 опустился против положения, зафиксированного первой нивелировкой, на величину $\alpha\beta_1$. Внизу в соответственных строках даны даты максимального оседания и величина его в миллиметрах. Из рассмотрения дат мы заключаем, что оседание достигает максимальной величины в сентябре—октябре. После максимального оседания с наступлением морозов начинается новое пучение. Размер максимального пучения в зимний сезон 1935/36 г. дают ординаты линии *C*, опять-таки от нулевой линии. Внизу эти ординаты даны в миллиметрах; там же отмечено время наблюдения максимального пучения. Если бы мы пожелали узнать теперь, каков результат всех этих перемещений, то должны были бы ординату $\alpha\alpha''$ отложить вверх от точки β', чтобы получить $\beta'\beta'' = \alpha\alpha''$. Результирующая ордината $\alpha\beta''$ показывает, насколько столб поднялся относительно первоначального положения, принятого за исходное, которому соответствует нулевая линия.

Рассмотрение приведенных графиков *I*, *II*, *III* и *IV* показывает, что ни зарубки, ни двойные накладки, ни глубина, на которую они зарываются, ничего существенного в дело пучения этих столбов не вносят, т. е. последние пучит так, как если бы этих зарубок и накладок не было. Что же касается крестообразного заякоривания, то таковое, несомненно, уменьшило величину пучения, что и видно из графиков *III* и *IV*. Таким образом, реактивная сила пучения, хотя и частично, но была уловлена крестообразным заякориванием.

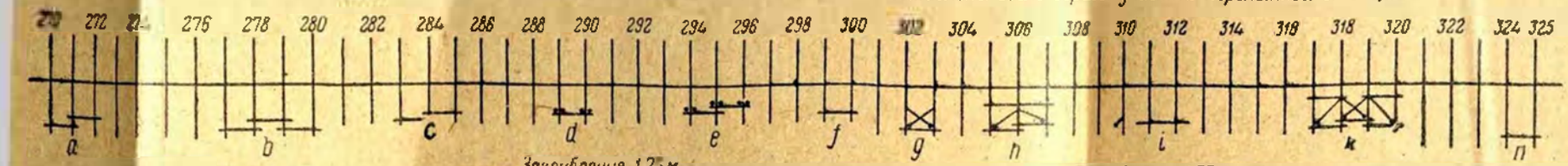
Здесь сказалось также и влияние глубины. Заглубление на 1,25 *м* (см. график *IV*) не дало почти никакого эффекта. При заглублении на 1,75 *м* эффект заякоривания виден гораздо яснее; на еще большей глубине, равной 2,3 *м* (график *III*), мы видим, что в 1934/35 г. столбы № 132 и 134 совсем не пучило. В следующем году, однако, пучение этих столбов уже наблюдалось.

Установка столбов начата 23/VIII, закончена 15/IX 1934 г. Первая нивелировка столбов произведена 21/XI 1934 г.



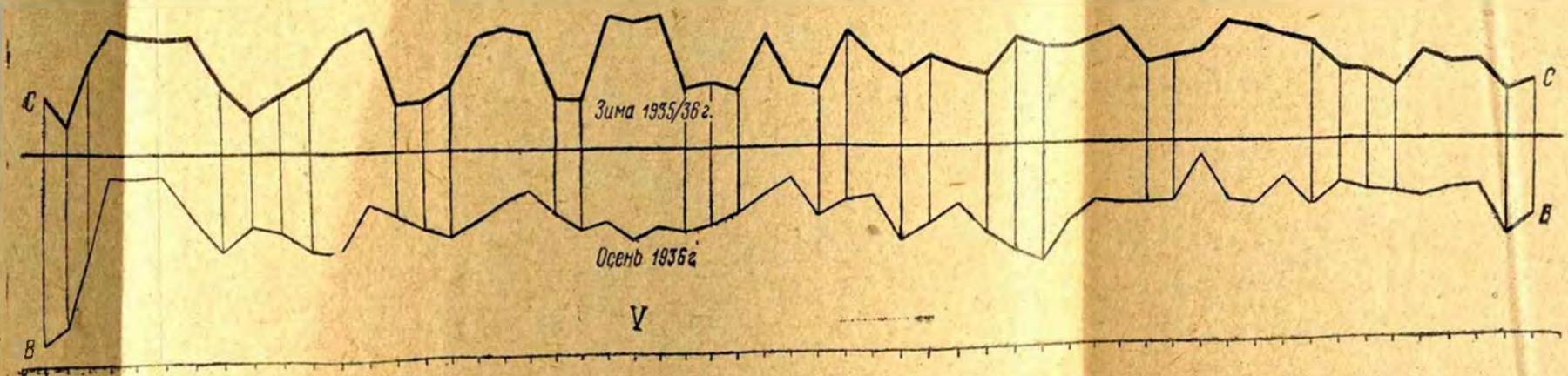
| | | |

Установка столбов №№ 270–325 закончена 25 июля 1935 г. Столбы эти были поставлены вдоль ограды участка мерзлотной станции



Заглубление 1,75 м — Заглубление 1,25 м — Заглубление 1,75 м — Заглубление 2,30 м

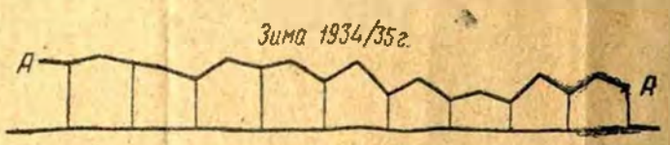
Первая нивелировка с 25 по 29 июля 1935 г.

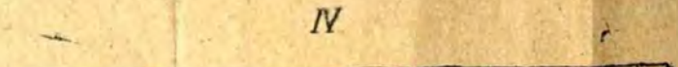


Масштаб 1:2

Заглубление 1,25 м — Заглубление 1,75 м

Столбы с крестовинами





V	IV	A	B	C
3/XI	30/I	44	126	20/I
3/XI	20/I	40	114	3/I
3/XI	30/I	45	71	20/I
3/XI	30/I	40	16	3/I
3/XI	30/I	37	16	3/II
3/XI	30/I	30	15	20/I
3/XI	30/I	43	41	20/I
3/XI	30/I	39	69	20/I
3/XI	30/I	42	49	20/I
3/XI	30/I	30	52	3/II
3/XI	30/I	41	66	20/I
3/XI	30/I	22	68	20/I
3/XI	30/I	32	37	3/I
3/XI	20/I	18	43	3/I
3/XI	20/I	32	53	14/II
3/XI	20/I	24	59	20/I
3/XI	20/I	19	49	20/II
3/XI	30/I	35	30	20/I
3/XI	20/I	25	25	15/I
15/XI	30/I	35	44	20/I
15/XI	30/I	25	55	20/I
3/XI	1935		50	20/I
3/XI			61	20/I
3/XI			52	3/II
3/XI			56	20/I
15/XI			52	20/I
3/XI			45	20/I
23/X			32	20/I
3/XI			21	20/I
15/XI			47	20/I
15/XI			37	20/I
3/XI			33	3/II
3/XI			65	22/II
15/XI			53	3/II
3/XI			40	3/II
15/XI			61	20/I
3/XI			73	20/I
3/XI			81	20/I
3/XI			54	3/II
3/XI			40	3/II
3/XI			42	22/II
3/XI			42	3/II
3/XI			41	3/II
15/XI			10	22/II
3/XI			41	22/II
3/XI			44	22/II
23/X			26	22/II
3/XI			47	22/II
23/X			30	22/II
3/XI			36	22/II
23/X			37	22/II
3/XI			41	3/II
3/XI			35	3/II
3/XI			33	22/II
3/XI			69	15/I
3/IX			55	15/I
1935				1936

A — дата и величина в мм наибольшего выпучивания за зиму 1934/35 г.;
B — дата и величина в мм наибольшей осадки за лето 1935 г.;
C — дата и величина в мм наибольшего выпучивания за зиму 1935/36 г.

ного участка Сковородинской НИМС при различном заглублении столбов и различной конструкции их заглубленной части

Когда вследствие ремонта водопровода линию ограды *ef* (фиг. 10) пришлось переносить, то вырытые столбы внимательно осматривались. Откопка этих столбов происходила в июне, когда оттаивание не превышало 1 *м* и кресты заякоривания находились еще в мерзлом грунте. Осмотр обнаружил как под отдельными столбами без заякоривания, так и под крестами якорей слои льда. Кресты были как бы подостланы льдом на толщину 2 — 3 *см*. Ясно было, что во время пучения столб вместе с крестом выдергивало из земли, грунт над крестом сминался, а в образовавшуюся под крестом пустоту набиралась, а может быть, и засасывалась вода, которая потом замерзала; наблюдались следы смятия приблизительно до 1 *мм* (не более) на брусках крестовины, свидетельствуя о том, что процесс пучения происходил именно так и что крест - якорь мешал выдергиванию.

Врубки и элементы крестов при этом совершенно не пострадали, из чего вытекало, что напряжения не достигали размеров временного сопротивления. Два столба—№ 132 и 134—совсем не выпучило. Отсюда следует, что если развить площадь якоря так, чтобы напряжение смятия грунта над якорем было бы малым, то можно прекратить пучение.

Ввиду незначительности пучения промежуточных столбов возникло предположение, не является ли это следствием тормозящего влияния заякоренных незыблемо стоящих соседних столбов. В то же время инж. А. Ф. Михайловым, много работавшим в районах распространения вечной мерзлоты, было сообщено, что подкосные сваи деревянных мостов не выпучивает.

В связи с изложенным, когда ограда на участке *ef* была разобрана, новая ограда была устроена по-иному, между прочим, с целью проверки указаний инж. Михайлова. Заякоренные столбы были объединены в группы по два, по три и по четыре. Внизу они соединялись парными схватками; кроме того, перпендикулярно этим схваткам в некоторых группах у столбов были уложены коротыши, а в некоторых группах были устроены раскосы (фиг. 112). Контрольные столбы без заякоривания были также объединены в группы.

Наблюдение над этими системами столбов начались немедленно после установки их (в июне 1935 г.). К концу осени наблюдения показали, что все без исключения столбы осели, причем максимальное оседание для большинства столбов было отмечено 3 ноября. Максимальное оседание было неравномерным и колебалось в пределах от 1 до 12 *см*. Что касается влияния схваток, подкосов и коротышей, а также глубины заземления на величину оседания, то установить какую-нибудь зависимость от всех этих установок, как показывает график, совершенно нельзя.

Влияние заякоривания при пучении видно ясно. На графике *V* видны провалы под группами *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *i* (фиг. 12), отчасти под группами *k* и *n*. Что же касается групп *f*, *g*, *h*, то, несмотря на наличие в последних двух группах и коротышей и подкосов, никакого заметного влияния их на пучение здесь обнаружить нельзя.

Оседание столбов можно приписать двум причинам: оседанию нижележащего вспученного и мерзлого грунта при его оттаивании (так

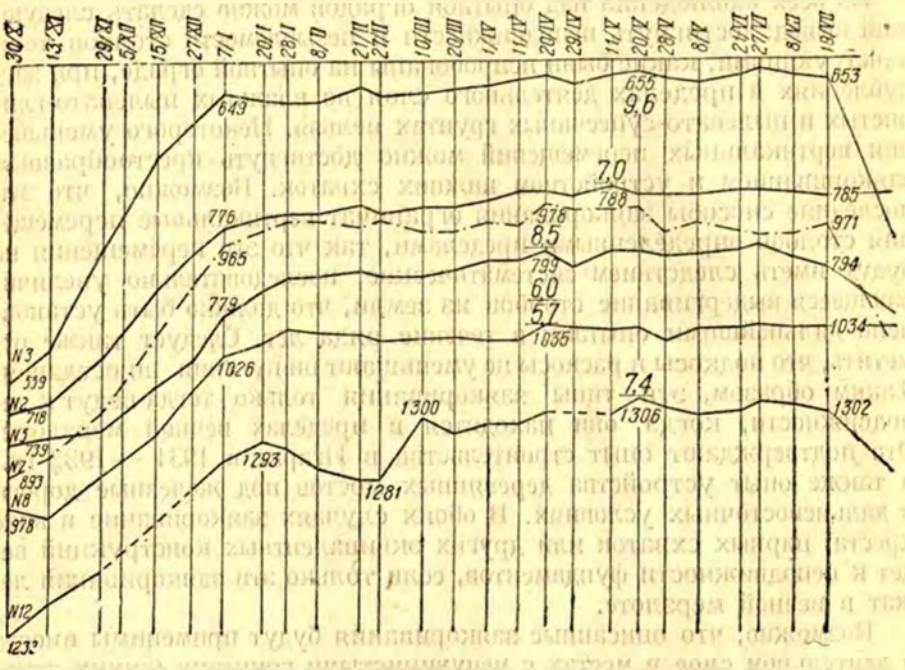
как столбы и схватки ставились на мерзлый грунт) и вдавливанию столбов грунтом обратной засыпки при ее оседании. Несмотря на очень тщательную трамбовку, грунт, которым засыпались столбы, оседал и, по всей вероятности, развивающейся силой трения вдавливал столбы в нижележащий грунт. Вторую причину оседания приходится допустить потому, что величина осадки от оттаивания мерзлого грунта вряд ли может объяснить столь большую величину осадки, которая наблюдалась.

Из всех наблюдений над опытной оградой можно сделать следующий вывод: достигнуть неподвижности и незыблемости столбов теми конструкциями, какие были испробованы на опытной ограде, при заглублениях в пределах деятельного слоя во влажных пылевато-глинистых и пылевато-супесчаных грунтах нельзя. Некоторого уменьшения вертикальных перемещений можно достигнуть крестообразным заякориванием и устройством нижних схваток. Возможно, что эти последние способы заякоривания ограничат вертикальные перемещения столбов определенными пределами, так что эти перемещения не будут иметь следствием систематическое, последовательно увеличивающееся выдергивание столбов из земли, что должно быть установлено дальнейшими опытами в течение ряда лет. Следует также отметить, что подкосы и раскосы не уменьшают ни пучения ни оседания. Таким образом, эти типы заякоривания только тогда ведут к неподвижности, когда они находятся в пределах вечной мерзлоты. Это подтверждают опыт строительства в Игарке в 1931 —1932 гг., а также опыт устройства деревянных мостов под железные дороги в дальневосточных условиях. В обоих случаях заякоривание в виде креста, парных схваток или других эквивалентных конструкций ведет к неподвижности фундаментов, если только эти заякоривания лежат в вечной мерзлоте.

Возможно, что описанные заякоривания будут применимы иногда в деятельном слое в местах с непучинистыми грунтами (сухих грунтов, часто сложенных из щебенистых кусков выветрившихся пород, сцементированных пылеватыми суглинистыми, супесчаными заполнениями, но насыщенными водой до полной влагоемкости). В таких грунтах, в сущности говоря, вопрос о заякоривании отпадает, ибо оно вследствие отсутствия пучения является излишним. Заякоривание здесь может быть применено лишь в виде известного запаса надежности, так как иногда в данной местности не имеется достаточных и длительных наблюдений. Между тем, как сказано выше, отсутствие пучения грунта в каком-нибудь одном году не может быть трактовано как отсутствие пучения вообще. В том же Сковородине к югу и юго-востоку от территории станции, изображенной на фиг. 10, несколько ближе к сопкам есть участки, которые совершенно не пучат. Приборы типа, примененного на установке $Б_3$ (фиг. 93), и диференциальные пучиномеры, установленные в этих грунтах (они будут описаны ниже), не показали никаких перемещений. В этих случаях надо определить нагрузку, которую выдерживает такой грунт в талом состоянии. Однако в районах с вечной мерзлотой вопрос этот ставится несколько

иначе, чем в районах, где вечной мерзлоты нет. В последних фундаменты ответственных сооружений покоятся на незамерзающих пластах, тогда как в первых, если фундамент не доведен до вечной мерзлоты, грунт, подстилающий фундамент, может регулярно в течение года быть то в мерзлом,то в талом состоянии, а это для прочности и несущей способности грунта небезразлично.

Рассмотрим теперь пучение каменных массивов. На фиг. 113 даны графики пучения массивов и штампов. Массивы представляют собой



Фиг. 113. График пучения на площадке станции

2—столб бутовой кладки заглублен на 3,1 *м*; *3*—железобетонный штамп заглублен на 1,7 *м*; *5*—бетонный столб с изоляционной прослойкой заглублен на 3,1 *м*; *7*—железобетонный штамп заглублен на 1,7 *м*; *8*—столб деревянный заглублен на 1,7 *м*; *12*—бетонный столб с внешней изоляцией заглублен на 3 *м*.

бетонные и бутовые прямоугольные параллелепипеды с квадратным основанием размерами 1,2 × 1,2 *м*, которые заглублялись в землю примерно на 3 *м* и возвышались над землей на 0,5 *м*. Приблизительно вес одного массива около 11 *т*. Штампы представляют собой железобетонную плиту размерами 1,1 × 1,1 *м*, толщиной около 15 *см*, соединенную в центре с железобетонной стойкой размерами 30 × 30 *см*. Общая длина этой стойки от нижней грани плиты равна 1,7 *м*. В землю стойка заглублена на 1,5 *м*. Вес штампа около 780 *кг*.

Кроме того, графики показывают, что пучение этих массивов и штампов происходит так же, как и пучение отдельных столбов. Сила, противостоящая пучению (т. е. вес массива), равна 23 *кг* на погонный периметр поперечного сечения, а мы уже видели (см. пучение стол-

бов под нагрузкой), что силы такого порядка крайне недостаточны и противостоять пучению не могут. Аналогичным образом может происходить и пучение мостовых устоев, быков и т. п. Это и случается в действительности, причем массивы быков либо поднимаются, как одно целое, либо в известных условиях их верхняя часть при выдергивании отрывается от нижней.

Все рассмотренные случаи пучения относятся к пучению грунтов, происходящему за счет содержащейся в них ко времени замерзания влаги. Это значит, что при этих пучениях никакого подтока к пучащим местам извне не происходит, т. е., иначе говоря, нет стороннего источника воды, откуда бы она притекала к пучащим местам, питая пучину. Но это не значит, что в самом грунте не происходит миграции влаги, так что если мы мысленно разделим грунт на ряд вертикальных, соприкасающихся между собой, призм, то возможны как перемещение влаги вдоль призмы, так и известный переход влаги от одной призмы к другой, но так, что общая сумма влаги всех призм остается неизменной или почти неизменной.

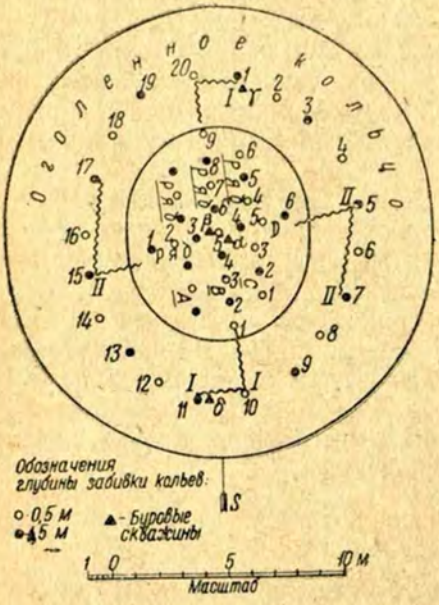
Это пучение грунтов, происходящее за счет содержащейся в них влаги, следует отличать от пучин, происходящих от притекания воды в грунтовых потоках. Эти потоки тоже могут вызывать вертикальное перемещение грунта, образуя подземные наледные бугры; кроме того, они могут быть и причиной образования надземных наледей. Сумгин образно называет братьями (52, стр. 89 и 97) и многометровые бугры наледей и небольшие пучинные бугры в Европейской части СССР. Однако, поскольку происхождение этих пучинообразований разное, было бы правильнее уменьшить их степень родства, назвав их по крайней мере двоюродными братьями.

Утепленный бугор и новая теория пучения Сумгина

Рассмотрим теперь новую теорию образования пучин, предложенную Сумгиным (52, стр. 89 и 97). Эта теория была подробно изложена выше (см. фиг. 44 и соответствующие объяснения) и теоретически как будто не представляет ничего невероятного. Однако наблюдения говорят о том, что если приведенные Сумгиным случаи пучинообразования и возможны, то они далеко не являются распространенными или типовыми. Характер происхождения таких пучин особый, родственный наледям и наледным буграм, а не обыкновенным пучинам. Наконец, пучины эти могут образоваться лишь в период соединения зимнего промерзания с вечной мерзлотой, что тоже сильно отличает их от обыкновенных пучин, начинающих образоваться с начала зимнего промерзания.

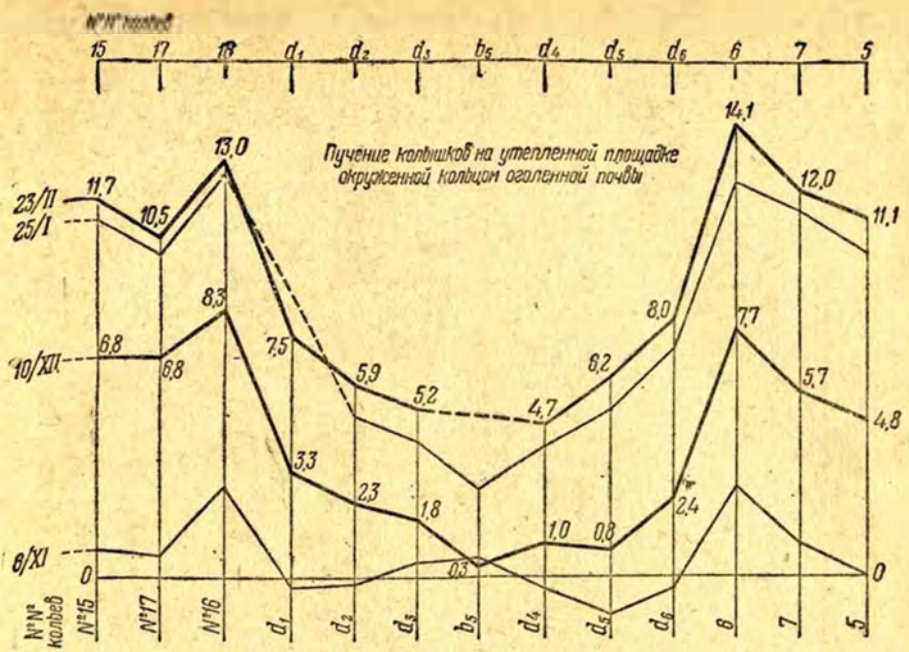
В подкрепление этих соображений можно привести следующий эксперимент, проведенный на Сковородинской станции. Во время одного из очередных прощупываний для определения величины протаивания на территории Сковородинской станции осенью 1934 г. было обнаружено место, где глубина протаивания была на 40 *см* больше, чем в окружающей местности. Это место и было выбрано для экспе-

римента. Как раз над местом наибольшего протаивания было устроено утепление из стружек, строительного мусора, дерна и т. п., образовавшее небольшой бугор овальной формы, как это показано на фиг. 114. Вокруг этого же бугра земля была обнажена от дерна, так что образовалось оголенное кольцо шириной около 5 *м*. Предполагалось, что грунт под оголенным кольцом является как бы мерзлотным поясом, скорее промерзает и зимнее промерзание по этому поясу быстрее соединяется с вечной мерзлотой, замыкая таким образом в мерзлую оболочку не успевший промерзнуть талый грунт под утепленным центром (бугром). В результате дальнейшего промерзания как будто бы можно было ожидать целый ряд любопытных явлений вроде интенсивного пучения (согласно теории Сумгина), трещин, излития плывунных масс и т. п. Ничего подобного, однако, не случилось. Нивелировка показала, что наибольшее пучение наблюдалось на оголенном кольце, пучение же утепляемого бугра было значительно меньше. Для наблюдения за пучением были забиты, как показано на фиг. 114, колья — один на глубину 0,5 *м*, другие на глубину 1,5 *м*,—которые и нивелировались.

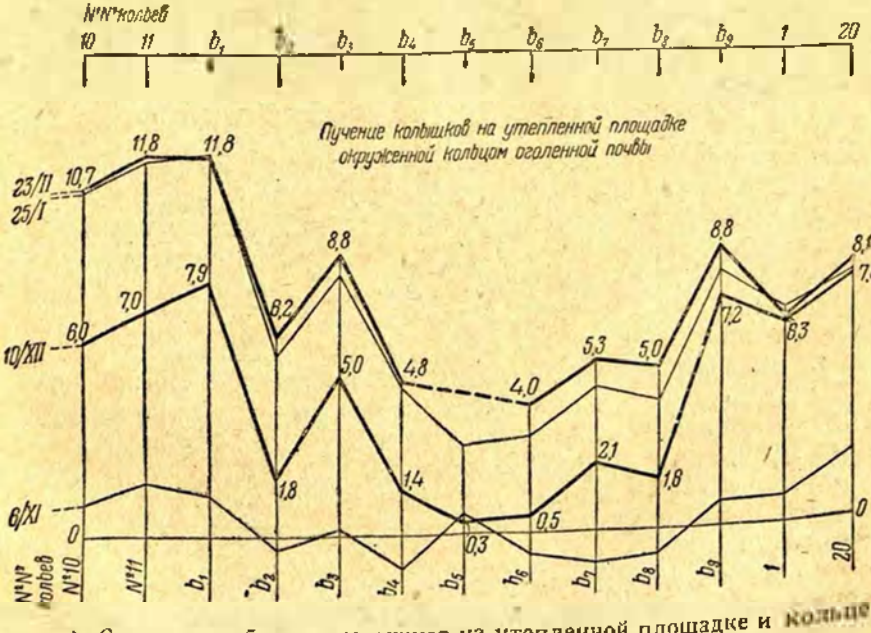


Фиг. 114

На фиг. 115 и 116 даны графики этих нивелировок по линиям *I—I*, *II—II*, показанным на фиг. 114 волнистыми линиями; на этом же чертеже показаны в плане и четыре буровые скважины α, β, γ и δ. Первая скважина — α — пробурена 13 октября в центре бугра, а остальные — β, γ и δ — 7 декабря, когда на оголенной площадке можно было уже ожидать смыкания отрицательных температур. Две из этих скважин — γ и δ — были пробурены на оголенном кольце, скважина β — в середине бугра, рядом со скважиной α. Результаты бурения представлены на фиг. 117. Никаких заметных следов миграции влаги обнаружить не удалось, но зато отчетливо видно влияние оголенного кольца, с которого сметался снег, на глубину промерзания; на оголенном кольце промерзание на 0,5 *м* глубже. В конце февраля 1935 г., как видно из фиг. 115 и 116, пучение прекратилось как на утепленном бугре, так и на кольце. В феврале же произошло смыкание зимнего промерзания вечной мерзлотой по кольцу. Таким образом, соединение зимнего промерзания с вечной мерзлотой по замкнутому контуру еще недостаточно не только для образо-



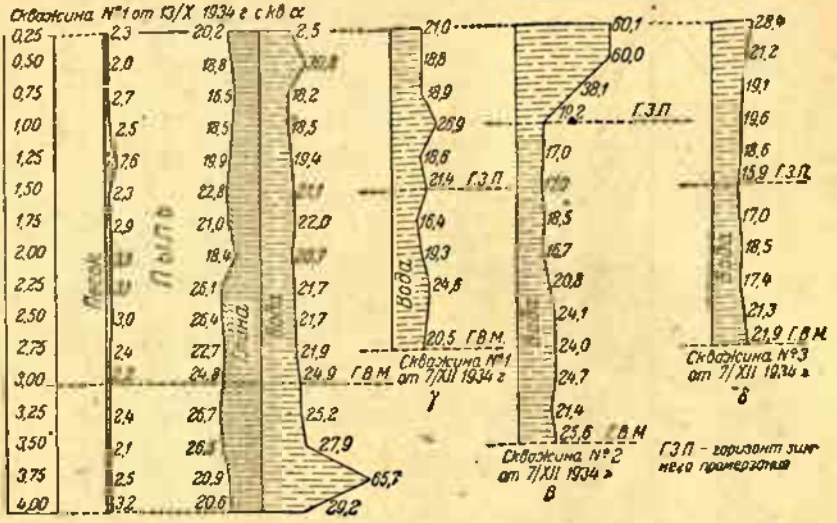
Фиг. 115. Схема заглубления колышков на утепленной площадке и кольце оголенной почвы



Фиг. 116. Схема заглубления колышков на утепленной площадке и кольце оголенной почвы

вания бугров, но даже для создания внутри контура интенсивного пучения.

Зимой в мерзлотных районах можно в изобилии видеть вспоруженные крыльца у домов, из чего можно заключить, что явления, от-



Фиг. 117

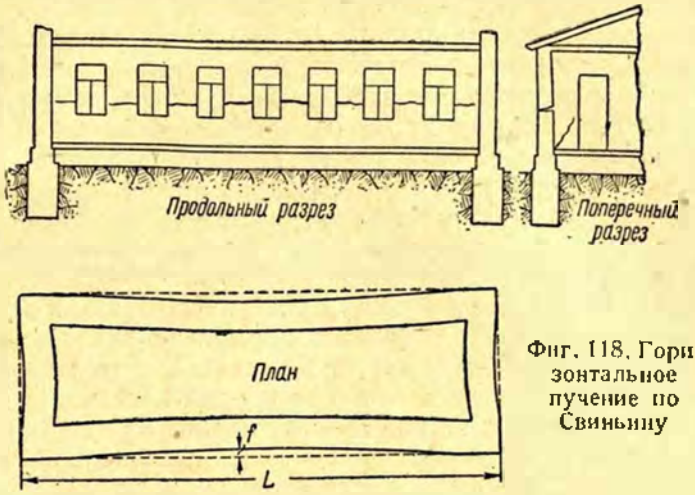
меченные на утепленном бугре, имеют широкое распространение в условиях примитивного строительства.

§ 22. Горизонтальное перемещение грунтов

Выше мы рассматривали пучение и связанное с ним исключительно вертикальное перемещение грунтов и включенных в них тел. Между тем в литературе существуют указания, что грунты могут пучить и вызывать деформации и в горизонтальном направлении. Впервые более или менее полно это явление было описано в статье Свиньина, помещенной в «Инженерном журнале» за октябрь 1912 г. Статья касается главным образом казарменных построек во Владивостоке, где, как известно, вечной мерзлоты нет, а наблюдается глубокое промерзание. Свиньин начинает с описания горизонтальных трещин, которые появляются главным образом в больших зданиях с малым числом поперечных стен. Трещины эти, по свидетельству Свиньина, появляются в начале декабря, достигают максимума в марте, а в мае исчезают, чтобы в следующем году повторить весь цикл раскрытия и закрытия снова.

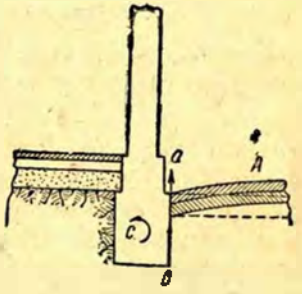
Эти горизонтальные трещины идут по простенкам между окнами и видны изнутри здания, где раскрытие их достигает 3 *см*. Не приводя описания других трещин, остановимся лишь на рассмотрении только что описанных горизонтальных, чего для наших целей вполне

достаточно. Схематический чертеж, приведенный на фиг. 118, аналогичный тем, которые приводит Свиньин, объясняет, по его мнению, сущность дела: грунт при замерзании вдавливает и деформирует фундамент, как показано на плане фиг. 118, а с фундаментом вдавливаются



Фиг. 118. Горизонтальное пучение по Свиньину

внизу и стены; такой деформации стен вверху мешает потолок, отчего стены изламываются, как показано на поперечном разрезе, образуя продольную трещину, наиболее раскрытую у центральных окон и сходящую на-нет у поперечных стен. Периодичность явления, как полагает Свиньин, указывает на связь с замерзанием, а все явление, по его мнению, объясняется действием давящих сил, развивающихся при пучении, не на подошву, а на боковую поверхность фундамента. При этом Свиньин добавляет, что увеличение глубины заложения до 1,1 саж. (2,35 *м*) вместо применявшихся 0,66 саж. (1,4 *м*) делу не помогло, что пучение весьма влажного глинистого грунта достигало у описываемых зданий 25 *см* и имело характер, показанный на фиг. 119, где буквой *A* обозначен вспученный грунт, а пунктиром—его первоначальное положение. Далее он отмечает, что описанный выше грунт, в котором был устроен фундамент, сильно смерзается с кладкой. Необходимо здесь же отметить, что, судя по чертежам, холодного подполья не было и пол был устроен непосредственно на земле, так что во время зимнего промерзания, когда вздымался бугор *A*, с другой стороны фундамента грунт был талый.

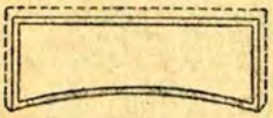


Фиг. 119. Вращающий момент при пучении грунта с одной стороны фундамента

Против такого взгляда на описанные деформации некоторые авторы возражали (13, стр. 99), приписывая деформации фундамента

и стен не боковому давлению, а скручивающему моменту, возникающему при пучении вместе с усилиями, развивающимися на поверхности фундамента *ab* (фиг. 119) по направлению, указанному стрелкой. Эти усилия стремятся повернуть фундамент против часовой стрелки, как показано на фигуре стрелкой *c*.

Критика взглядов Свиньина имеет большие основания. Если вникнуть в смысл утверждения о пучении в горизонтальном направлении грунта, то дело представляется не столь простым, как это кажется с первого взгляда. Пучащий грунт—это грунт расширяющийся. Если мы представим две совершенно тождественные сложенные вместе пластинки и затем представим, что одна из них равномерно расширяется во все стороны, то нетрудно видеть, как последняя будет при этом скользить по первой. Исключение будет составлять лишь одна точка, и в рассматриваемом случае выбор этой точки зависит от нас. Если мы закрепим предварительно пластинки в середине, то только эта центральная точка расширяющейся пластинки не будет перемещаться относительно другой пластинки; все же остальные точки будут скользить и тем больше, чем дальше эта точка расположена от точки закрепления. Но мы можем закрепить пластинки и не в середине, а возле края; тогда только эта точка сохранит свое положение относительно другой пластинки, все же остальные точки сместятся. Назовем эту точку расширяющейся пластинки, которая не смещается относительно другой, центром расширения. Заметим кстати, что четырехугольник и всякая другая фигура, вырезанная в расширяющейся пластинке или начерченная на ней, увеличится, оставаясь себе подобной.

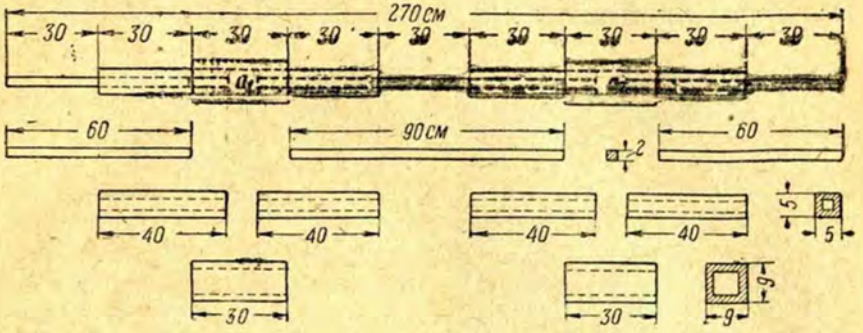


Фиг. 120. Случай одностороннего давления

Нечто похожее должно происходить и с пластом замерзающего и расширяющегося в горизонтальном направлении грунта. Этот грунт должен скользить по незамерзшему грунту. Что же касается неподвижного центра, о котором сказано выше, то такового здесь быть не может; вернее, здесь благодаря огромному протяжению замерзающего пласта и огромному трению, которое развивается при скольжении, должно образоваться много центров; между ними пласт замерзающего грунта должен как-то деформироваться, изгибаясь в причудливые складки. Если в замерзающем грунте находится постороннее тело, например столб, то расширяющийся грунт должен отделится от него и между столбом и грунтом должна образоваться кольцевая щель, если этот столб находится случайно в центре расширения. Если же столб зарыт глубоко и находится далеко от центра расширения, то грунт со стороны этого центра будет давить на столб, тогда как с другой стороны должна образоваться щель. В этом случае возможно вдавливание фундамента, но оно не может быть таким, как это изображено на фиг. 118, а может быть лишь односторонним, как схематически показано на фиг. 120, причем с противоположной стороны грунт может или отстать от фундамента (как показано на фигуре

пунктиром) или — в случае сильного смерзания с фундаментом — увлечь последний за собой.

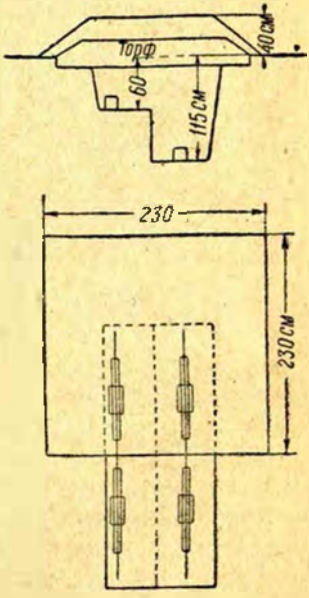
Таковы следствия, вытекающие из предположения, что грунт при замерзании расширяется в горизонтальном направлении. Но ничего



Фиг. 121. Горизонтальный пучиномер

подобного в действительности не происходит, так что более вероятной является схема роста грунта при замерзании только в вертикальном направлении, о чем сказано выше и пояснено на фиг. 61.

С целью экспериментальной проверки существования горизонтальных перемещений грунта в конце октября в грунт были заложены горизонтальные пучиномеры, изображенные на фиг. 121. Эти пучиномеры сделаны из дерева, обильно смазаны вазелином и сконструированы так, что могут сжиматься и расширяться в продольном направлении совершенно свободно. Таких пучиномеров было сделано пять. Все они были зарыты в землю в горизонтальном положении в начале октября. Два из них были зарыты вынутым из котлована грунтом, причем один из приборов был уложен на глубине 0,6 *м*, а другой — на глубине 1,15 *м*. Два других пучиномера были уложены и зарыты аналогичным способом, но на половину длины утеплены торфом. Толщина слоя торфа составляла 25 *см*, а покрывающий сверх торфа слой талого грунта имел толщину 20 *см*. Таким образом, на одном конце зарытых пучиномеров был образован утепляющий бугор высотой около 40 *см*, который имел в плане размеры 2,3 × 2,3 *м*, как это схематически изображено на фиг. 122. Пятый пучиномер был уложен подобным же образом на глубину около 0,6 *м*, но половина его была подостлана и засыпана гравием. Все они были вскрыты в мае



Фиг. 122. Укладка горизонтальных пучиномеров с утеплением

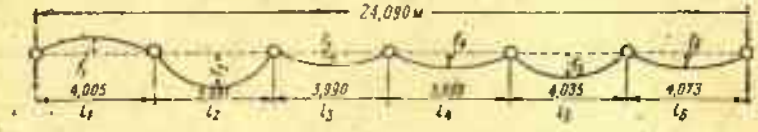
и в начале июня следующего года. Никаких перемещений одних элементов относительно других нигде не обнаружено. Во внутренних полостях a_1 и a_2 (фиг. 121) был лед и все пучиномеры были подостланы внизу тонким слоем льда. Особенно тщательно осматривались пучиномеры, утепленные с одного конца торфом, так как здесь вследствие неодновременного замерзания скорее всего можно было опасаться горизонтальных перемещений; но и в этом случае никаких заметных на-глаз перемещений обнаружено не было.

Фиг. 123

Между тем вертикальные дифференциальные пучиномеры, устроенные аналогичным способом и состоящие из муфт, смазанных вазелином (подробное описание их будет дано ниже), действовали вполне исправно, обнаруживая вертикальное пучение, так что вряд ли можно отсутствие горизонтальных смещений в пучиномере, изображенном на фиг. 121, приписать несовершенству прибора и метода. Все же этот опыт нельзя считать решающим и нужно произвести еще целый ряд исследований, пользуясь другими методами; проделанный же опыт приводится как известный пройденный этап по пути исследования горизонтальных перемещений, к которому в дальнейшем уже не нужно возвращаться.

Дальнейшее исследование горизонтальных деформаций необходимо не только вследствие фактов, описанных Свиньиным. Осенью того же 1935 г. на площадке опытной станции была устроена возле одного из участков легкая ограда, состоящая из стоек, заглубленных на 1 *м*, к которым были прибиты деревянные рейки (фиг. 123). На этой же фигуре видно, как деформировались эти рейки в декабре, когда на это явление было обращено внимание. Деформация, получившаяся при замерзании, указывала на то, что грунт сжался. Данные, характеризующие это явление, показаны на фиг. 124. Если допустить, что рейки изогнулись по дуге круга, то по величине стрелок прогиба f_1, f_2, f_3... и по хордам l_1, l_2, l_3... нетрудно подсчитать длины дуг, стягиваемых этими хордами, и разницы между дугами и хордами Δl_1, Δl_2, Δl_3... Для этих последних найдем величины, данные на фиг. 124. Сумма $\Delta l = 2{,}64$ *см*. Это, как будто, указывает на то, что раньше, до замерзания грунта, общее расстояние между крайними столбами было равно не 24,09, а 24,116 *м*.

Нечто аналогичное пришлось наблюдать в начале ноября 1933 г. в г. Свободном. Красноармейская улица города, шириной около 30 *м*, делится в продольном направлении канавами на три части: среднюю — проезжую — шириной около 15 *м* и две боковые, поросшие дерном, а иногда и деревьями. Средняя часть, довольно укатанная, повидимому, супесчаная и лишенная растительности, была почти вся покрыта довольно правильными поперечными трещинами, которые были отлично видны, так как снега не было. Расстояние между этими трещинами колебалось от 10 до 35 *м*, что дает в среднем 22 *м*. Мороз в это время достигал 25 —30°. Ширина трещин колебалось от 1 до 3 *см*. Продольных трещин на дороге не наблюдалось вовсе. Глубина трещин, насколько ее можно было определить самыми примитивными



Дата	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
14/XII 35	5,1 см	11,5 см	2,7 см	6,1 см	9,0 см	5,4 см
5/I 36	4,0 "	12,6 "	3,4 "	7,5 "	10,5 "	5,9 "
1/II 36	4,0 "	11,0 "	3,3 "	7,0 "	10,0 "	5,0 "
[illegible] 35	3,0 "	8,0 "	2,0 "	5,0 "	7,0 "	3,0 "
10/VII 36	0,0 "	0,0 "	0,0 "	0,0	0,0 "	0,0 "
	Δl_1=0,14 см	Δl_2=1,05 см	Δl_3=0,08	Δl_4=0,57	Δl_5=0,74	Δl_6=0,26

Фиг. 124. Деформации ограды

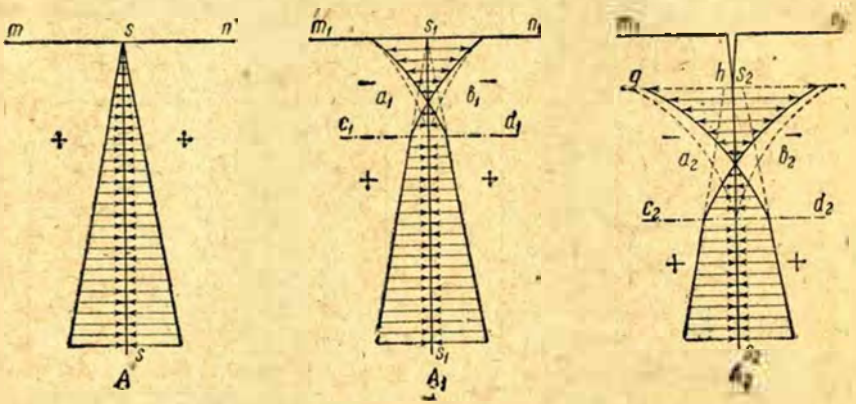
способами, доходила иногда до 40 — 50 *см*; на самом же деле она была, конечно, больше. Эти явления, скорее, свидетельствуют о сжатии мерзлого грунта, чем о расширении его.

Принимая все это во внимание, замерзание однородного грунта следует, повидимому, представлять так. В начале грунт при замерзании расширяется, причем это расширение идет по линии наименьшего сопротивления вверх, о чем уже сказано выше. Горизонтальные напряжения, аналогичные гидростатическому давлению внутри воды, не превышают, должно быть, при этом напряжений, вызываемых давлением слоев грунта, лежащих над рассматриваемой точкой; иначе говоря, напряжения в момент замерзания и расширения грунтов, вероятно, очень близки к тем, которые имеются в незамерзшем грунте. Далее, с понижением температуры развиваются в грунте растягивающие напряжения, которые вызывают сначала уменьшение напряжения сжатия в вертикальных плоскостях, потом переход этих напряжений в растягивающие и, наконец, появление трещин. Эти растягивающие напряжения развиваются в результате

стремления огромного пласта замерзшего грунта под влиянием охлаждения сжаться, чему препятствует связь с нижележащим грунтом. На фиг. 125 представлены схематически три стадии напряжений в грунте.

Схема A — грунт еще не замерз — по вертикальному сечению ss действуют сжимающие напряжения так, как и указано на эпюре стрелками. Предполагается, что напряжения эти растут с глубиной по закону прямой.

Схема A_1 дает напряжения, когда слой грунта между горизонтами m_1n_1 и $c_1\ d_1$ замерз, что и отмечено на чертеже знаком минус. Ниже c_1d_1 грунт талый, и напряжения в нем по сечению s_1s_1 соответственно те же, что и на схеме A. Выше c_1d_1 напряжения слагаются из тех сжимающих напряжений, которые существовали до замерзания (их эпюра дана пунктиром), и из растягивающих, появившихся при охлаждении



Фиг. 125. Различные стадии горизонтальных направлений, развивающихся в грунте при его замерзании

после замерзания. Эпюра этих последних тоже дана пунктиром, но так как они не пропорциональны абсолютным значениям отрицательных температур, то и закон их распределения будет иной. Экспоненциальная зависимость, пожалуй, может быть принята как первое приближение; на чертеже эпюре дано некоторое криволинейное очертание. Толстая сплошная линия получена как результат сложения растягивающих и сжимающих напряжений, показанных пунктиром. Из этой результирующей эпюры мы видим, что нулевые напряжения в плоскости a_1b_1 получаются в мерзлом слое.

На схеме A_2 дана эпюра напряжений при дальнейшем промерзании, когда растягивающие усилия стали столь большими, что появилась трещина. Ниже этой трещины напряжения распределяются в плоскости s_2s_2 примерно так, как и на схеме A. Граница промерзания лежит в плоскости c_2d_2; горизонт a_2b_2 является горизонтом нулевых напряжений; hg — максимальное растягивающее напряжение, близкое к временному сопротивлению мерзлого грунта на разрыв. Из рассмотрения этих схем мы видим, что напряжения в мерзлом

грунте похожи на распределения напряжений в изогнутом стержне или, еще лучше, пластинке, ибо эпюра напряжений по плоскости, например s_1s_1, справедлива (caeteris paribus) для всех вертикальных плоскостей, проходящих через эту ось. Из этих предпосылок вытекает целый ряд любопытных выводов относительно погруженных в замерзающий грунт посторонних тел: столб в мерзлом грунте может быть растянут силами, приложенными нормально к цилиндрической поверхности, если в грунте не образовалось еще трещин, и может быть сжат, если вокруг (как это часто бывает) образовались трещины или если вообще создались условия, при которых грунт может сжаться.

За неимением цифровых данных, необходимых для подсчета всех этих напряжений, мы этим примером и ограничимся и перейдем опять к вопросу о сжатии грунта при замерзании, поставив вопрос о том, насколько предположение об образовании трещин при сокращении мерзлого грунта с понижением температуры может соответствовать действительности. Коэфициенты расширения мерзлого грунта нам неизвестны, но известны коэфициенты расширения таких тел, между которыми должны лежать коэфициенты расширения мерзлых грунтов. К этим телам принадлежат лед, кварц и кальцит. Из таблиц физических констант в обработке Дорфмана (изд. 1928 г., стр. 92 и 93) взяты следующие коэфициенты расширения:

Для кварца:

$\parallel$ оси — 0,0000078; $\perp$ оси — 0,0000142; среднее $\alpha = 0{,}000011$.

Для кальцита:

$\parallel$ оси — 0,000026; $\perp$ оси — 0,0000054; среднее $\alpha' = 0{,}000015$.

Для льда у Комаровского (15):

$$\alpha'' = 0{,}000055.$$

Коэфициент расширения мерзлого грунта должен быть больше α и α' и меньше α''. Для 22 *м* (в среднем), на расстоянии которых находились трещины на улице г. Свободного, находим для —30° (что приблизительно и имело место во время наблюдения) температурные изменения для льда:

$$\Delta l' = 30 \cdot 0{,}000055 \cdot 2\,200 = 3{,}63\ см;$$

то же для кальцита:

$$\Delta l'' = 30 \cdot 0{,}000015 \cdot 2\,200 = 0{,}99\ см;$$

то же для кварца:

$$\Delta l''' = 30 \cdot 0{,}000011 \cdot 2\,200 = 0{,}73\ см.$$

Положив, что твердая часть грунта состоит наполовину из кварца, наполовину из кальцита, мы имели бы расширение

$$\frac{\Delta l'' + \Delta l'''}{2} = \frac{1}{2}(0{,}99 + 0{,}73) = 0{,}86,$$

но так как в грунте содержится около 40% льда, то сокращение такой смеси приблизительно можно положить равным

$$0{,}1 \cdot (3{,}63 \cdot 4 + 0{,}86 \cdot 6) = 2 \text{ см}.$$

Отсюда видим, что порядок размера наблюдавшихся трещин, которые должны характеризовать сжатие грунта, а также порядок сжатия ограды на опытной площадке очень близки к только что подсчитанному сокращению условного грунта, состоящего из кварца, кальцита и льда. Конечно, на это следует смотреть как на грубое приближение, так как температурное расширение или сжатие смеси различных зерен, сцементированных веществом с другим коэфициентом расширения, вероятно, не определяется по правилу смешения, а совершается по более сложному закону.

В заключение остановимся еще на горизонтальных пучиномерах, о которых речь была выше и которые никаких деформаций не обнаружили. Их длина равнялась 2,7 *м*. Общее сокращение грунта на такой длине, даже при охлаждении до —30°, будет равно

$$\frac{2 \text{ см}}{22 \text{ м}} \, 2{,}7 \text{ м} = 0{,}24 \text{ см},$$

а на длине, равной одному звену пучиномера, будем иметь

$$2{,}4 : 9 = 0{,}27 \text{ мм},$$

чего, конечно, обнаружить столь примитивными способами, которые были применены, нельзя.

§ 23. О влажности деятельного слоя и вечно мерзлых грунтов

Выше мы уже говорили о распределении влажности в деятельном слое и в вечно мерзлых грунтах. Мы не сомневаемся (хотя бы уже на основе лабораторных опытов, проведенных на Сковородинской станции), что при замерзании и оттаивании да и вообще при изменениях температуры и других факторов влага перемещается — мигрирует, — но детальной картины того, как это происходит, можно сказать, совершенно нет.

Если мы просмотрим графики буровых скважин, которые даны выше, то не заметим на них следов отжатия влаги во время промерзания, так же как и следов обратного явления. Точно так же определенной закономерности мы не найдем и в период оттаивания. Но это, конечно, совершенно не означает, что никаких закономерных передвижений не совершается, а означает лишь, что явление миграции настолько сложно, что к нему надо подойти с более тонкими методами исследования, чем применяемые до сих пор. Ниже мы попытаемся разобраться в этом сложном явлении.

Если мы мысленно выделим в деятельном слое призму на всю высоту с возможно большим основанием и, поставив ее в лабораторные условия, попробуем насытить водой до полной влагоемкости и, допустив, что нам это удается выполнить, подвергнем ее испы-

танию на влажность, то последнее покажет, что влажность ее не будет однородной, несмотря на то, что эта влага будет находиться во вполне устойчивом равновесии и не будет иметь никакого стремления к перемещению. Эта неоднородность будет зависеть от целого ряда причин и в первую очередь от неоднородности его гранулометрического состава, а при одинаковом гранулометрическом составе — от неоднородности упаковки его частиц (плотности). То же надо сказать и о других степенях влажности, например меньших полной влагоемкости. Если мы естественному грунту деятельного слоя сообщим известное количество влаги, то через некоторое количество она распределится так, что наступит равновесие. Но это равновесие наступит не при равномерном распределении, а наоборот: песчаные грунты будут содержать меньше воды, глинистые — больше, а торфяные — еще больше. Так будет при равновесии; но в природе статического равновесия не существует, а динамическая картина распределения влаги будет, конечно, гораздо сложнее.

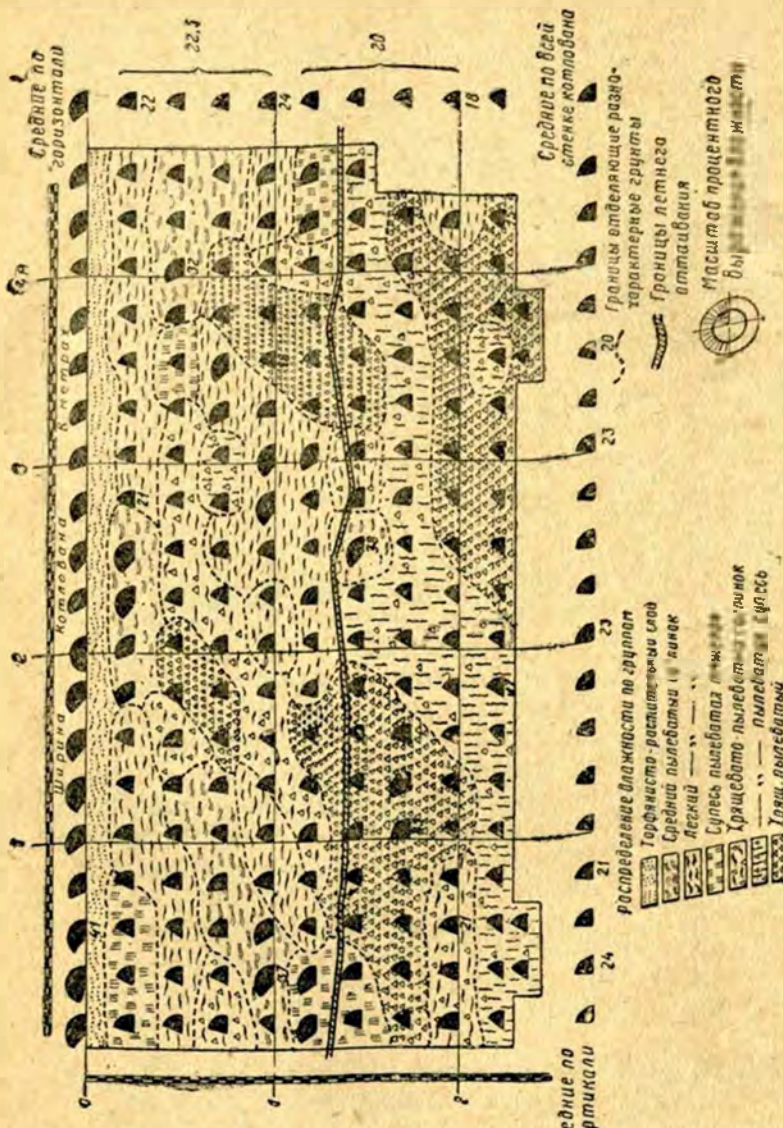
Нередко можно обнаружить изменения влаги на несколько процентов даже при однородном грунте в пробах, взятых на расстоянии 25 *см*, при анализе по методу Рутковского. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно просмотреть графики фиг. 41, 42, 43 и др. Ясно, что если какая-либо миграция и происходит в пределах перераспределения влаги (например, до 2%), то вряд ли такая миграция будет отчетливо видна на том пестром фоне, какой представляет естественное распределение влаги. Ошибкой некоторых упомянутых выше авторов было то, что они не учитывали динамики явления и какое-либо одно, замеченное, может быть, совершенно правильно, явление распространяли на другие грунты, районы и т. д.

«Характернейшей особенностью распределения влажности в грунтах большинства районов вечной мерзлоты является наличие переувлажненных горизонтов у верхней границы мерзлоты», — утверждает один из авторов. Ничего подобного мы на приведенных выше графиках не видим, а таких графиков в распоряжении Сковородинской станции имеется большое количество. Это не значит, что из этих графиков нельзя выбрать значительного числа таких, которые как бы подтверждали приведенное выше положение: это говорит только о том, что на основании этих графиков нельзя высказывать общего положения о переувлажненности грунтов у вечной мерзлоты, так как имеется столько же, а может быть и больше данных, противоречащих подобному утверждению.

Дальнейшее изучение должно пойти по линии установления нормального распределения влаги (т. е. такого, какое должно быть в условиях статического равновесия) и изучения тех нарушений этого распределения, которые появляются в результате перемещения влаги в период увлажнения вследствие выпадения из атмосферных осадков, в период засухи, в период промерзания, оттаивания и т. д. Здесь, вероятно, будет найдена какая-нибудь закономерность. Весьма вероятно, что в пылеватых и суглинистых грунтах влага будет во время промерзания подтягиваться кверху, а во время оттаивания опускаться

вниз; в песчаных грунтах в период промерзания можно ожидать отжатия влаги вниз и т. п.

Первые шаги, как мы видим, в этом направлении уже сделаны, но остается сделать, конечно, неизмеримо больше. По установлении



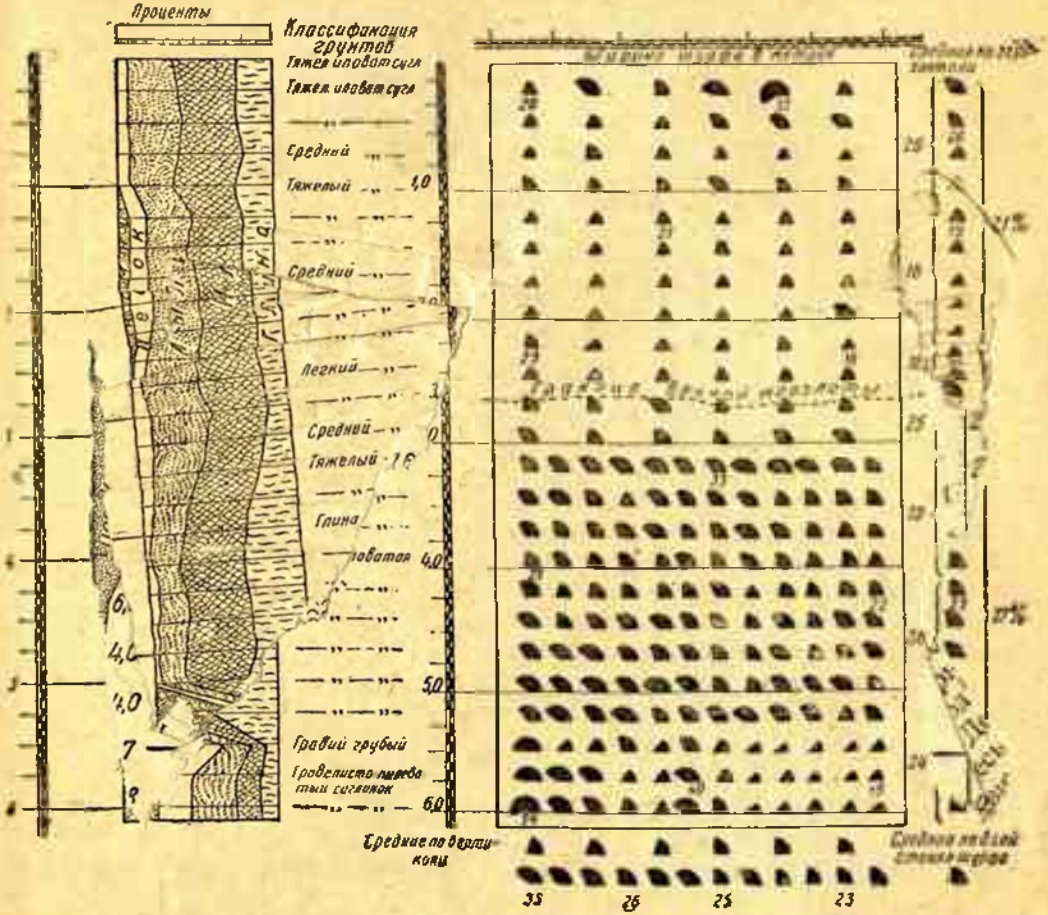
Фиг. 126. Геологический разрез и естественная влажность грунта южной стенки под столбы опытной ограды

(Котлован № 3, глубина 2,35 м; образцы взяты 13—17 июля 1935 г., дождей не было).

этих законов и строителю и агроному будет ясно, что делать, чтобы управлять распределением влаги. Строитель, например, будет знать, как делать дренаж и что от дренажа можно получить; в настоящее же время строитель часто идет ощупью и часто тратит большие деньги на

устройство дренажей, которые не действуют и не приносят никакой пользы.

Для иллюстрации пестроты гранулометрического состава и пестроты распределения влаги приводятся две фотографии с графиков, характеризующих и то и другое (фиг. 126 и 127).



Фиг. 127. Геологический разрез и влажность по шурфу № 1

Гранулометрический состав грунта по Робинзону. Распределение влажности в грунте в южной стенке шурфа, влажность в весовых процентах по отношению к сырому образцу.

На фиг. 126 дан график распределения влаги в стенке котлована под столбы ограды по линии *ef* (фиг. 10), о которой сказано выше. Из южной стенки котлована через каждые 25 *см* по горизонтали и по вертикали были взяты образцы. Грунты были классифицированы по Охотину. Все остальное ясно из чертежа.

На фиг 127 дан аналогичный график распределения влаги в стенке шурфа глубиной 6 *м*. Все образцы взяты в мерзлом состоянии. Здесь

обращает на себя внимание то обстоятельство, что влажность вечно мерзлых грунтов в общем значительно больше влажности деятельного слоя.

Это не случайное явление: на Сковородинской площадке все скважины дают приблизительно такую же картину. Но так как причин, объясняющих это явление, пока не найдено, то весьма возможно и вполне вероятно, что это только частный случай. Городков (8, стр. 54), например, указывает: что «нужно ожидать, что никогда не растаивающий слой вечно мерзлой почвы должен содержать меньше влажности по сравнению с расположенным над ним пропитанным водой талым слоем. Наши таблицы, как будто, это подтверждают». Очень возможно, что для того района, где производил свои наблюдения Городков, верно это положение, тогда как для Сковородина верно обратное.

Кроме того, для вечно мерзлых грунтов как весьма характерное явление нужно отметить наличие ледяных включений весьма неправильной формы и весьма различных размеров — от включений, измеряемых десятыми долями метра, до включений, измеряемых метрами по высоте и десятками, а может быть и сотнями метров в горизонтальном направлении, о чем подробно сказано выше.

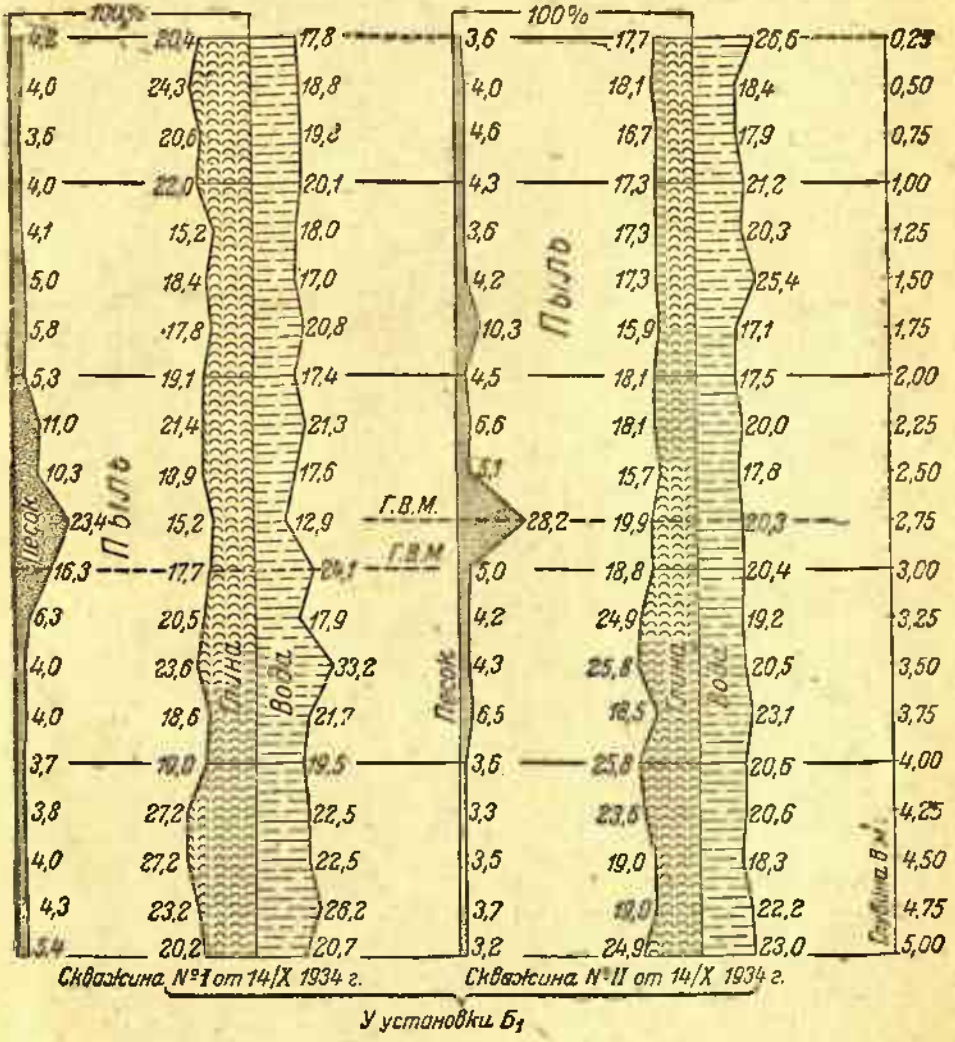
Остается сказать еще несколько слов о насыщенности грунтов деятельного слоя водой. В этом отношении картина недостаточна ясна, так как исследования еще не доведены до конца. То же, что в этом направлении сделано, показывает, что грунты деятельного слоя насыщены водой до полной или почти полной влагоемкости. Пустот мало, и если таковые обнаруживаются, то количество их не превышает 2—3%. В более редких случаях количество пустот доходит до 6%. Есть некоторые основания считать, что количество пустот и размер пучения находятся, грубо говоря, в обратной зависимости.

Дело будущего проверить высказанные соображения. Отметим здесь только, что при такой насыщенности вряд ли возможно передвижение воды в виде пара.

§ 24. Сопротивление вечно мерзлых грунтов сжимающим усилиям

Рассмотрим вопрос сопротивления наиболее слабых мерзлых грунтов в невыгодных условиях. Наиболее слабыми грунтами являются переувлажненные пылеватые грунты. Наличие избыточной влаги приближает их ко льду с возможными явлениями пластических деформаций. Появление же положительных температур превращает такие грунты в весьма слабые, не выдерживающие даже напряжений около 1 *кг/см*^{2}. Даже при отрицательных температурах, близких к нулю, эти грунты вызывают сомнение. Весьма возможно, что сам лед при отрицательных температурах, близких к нулю, более пластичен, чем при низких; возможно и другое,— что при небольших отрицательных температурах значительная часть воды не замерзает или что обе эти причины существуют одновременно, понижая стойкость мерзлого грунта.

Характеристика грунтов, над которыми поставлены были опыты на Сковородинской станции, даны на графиках фиг. 128, где показаны гранулометрический состав и влажность грунтов в скважинах *I* и *II* (см. план установки на фиг. 129).

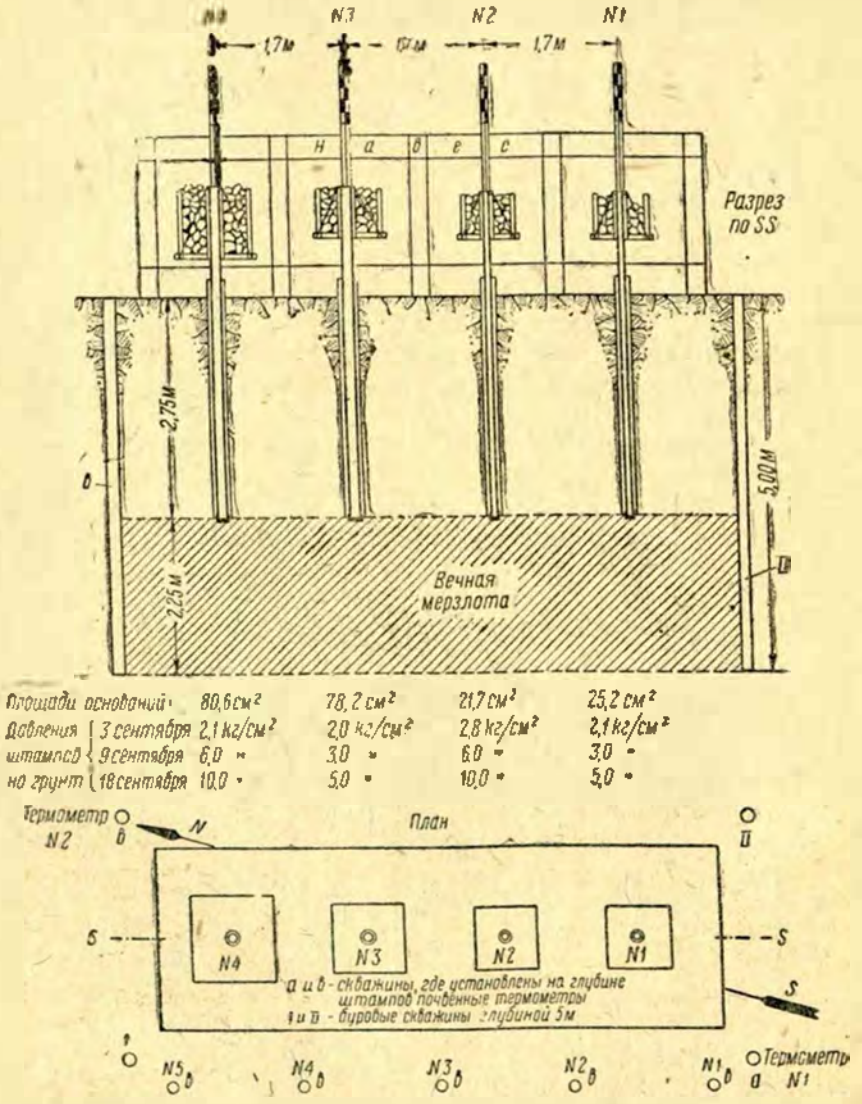


Фиг. 128. Геологический разрез по скважинам у установки $Б_1$

Для полной характеристики необходимо добавить, что вечно мерзлые грунты в выбранном месте в значительной мере пронизаны прослойками чистого льда.

Место на территории станции, где были заложены скважины, указано на плане станции (фиг. 10). Сама установка для определения со-

противления вечно мерзлых грунтов давлению называлась для краткости установкой $Б_1$. Это была одна из первых установок на станции и поэтому сопровождалась и рядом неудач и установлением ряда



Фиг. 129. Установка $Б_1$ для исследования сопротивления ледяных грунтов сжатию

новых фактов, предварительное знание которых, конечно, изменило бы в известной степени методику намеченного исследования. Но так как проторенных тропинок в деле изучения вечной мерзлоты тогда не было, а также не было и сколько-нибудь испытанной методики, то приходи-

лось итти в этом направлении часто ощупью, и различные неожиданности в проведении намеченного опыта являлись неизбежными.

Однако и самые ошибки в проведении опыта и те новые факты, с которыми при этом пришлось встречаться, являются настолько поучительными, что целесообразно осветить их подробно хотя бы для того, чтобы предотвратить возможный ряд ошибок других исследователей, которые будут заниматься изучением вечной мерзлоты.

Итак, установка $Б_1$ имела целью, во-первых, определить сопротивляемость вечно мерзлого грунта указанных выше свойств давлению при температурах, близких к нулю, а во-вторых, обнаружить пластические свойства этого грунта, если они проявятся при длительном действии этих нагрузок.

По имевшим место предварительным наблюдениям было установлено, что граница вечной мерзлоты на выбранном месте лежит на глубине 2,5 — 2,6 *м*; поэтому для исследования сопротивляемости грунта давлению была намечена глубина 2,75 *м*, так как на этой глубине температура грунта в период наибольшего протаивания деятельного слоя близка к нулю.

Испытание прочности решено было вести при помощи нагруженных штампов. Нагрузку на штампы предполагалось довести до 10 *кг/см*² из тех соображений, что если грунт выдержит давление 10 *кг/см*² без разрушения, значит нагрузка на грунт интенсивностью, например, 5 *кг/см*², будучи допущена в сооружении, будет соответствовать двойному запасу прочности. В соответствии с этим на глубине 2,75 *м* на расстоянии 1,7 *м* один от другого были установлены четыре штампа, которые и передавали давление на грунт. В качестве штампов использовались выбранные из случайно имевшегося запаса железные трубы, концы которых, опирающиеся на грунт, были наглухо заделаны и выровнены. Площади этих заделанных концов соответственно равнялись 25,2; 21,7; 78,2 и 80,6 *см*², что отмечено и на фиг. 129. Заблаговременно на глубину 2,75 *м* были пробурены четыре отверстия, в которые опустили четыре обсадные трубы так, чтобы они перекрывали активный слой и врезывались в вечную мерзлоту, не доходя в то же время на небольшую величину до низа скважины. Практически это расстояние от низа обсадной трубы до дна скважины колебалось после неизбежных подчисток и выравниваний дна от 1 до 3 *см*.

Обсадные трубы были установлены так, чтобы предохранить штампы от трения и примерзания к ним окружающего грунта, а также для предохранения скважин от затопления их грунтовыми водами. Дно скважин было тщательно высушено, выровнено и покрыто в целях равномерного распределения давления слоем песка толщиной около 2 — 3 *см*. Взаимное расположение обсадных труб и штампов, каким оно оказалось в результате описанных операций, показано на фиг 131, *б*. Вследствие подчисток и выравниваний первоначально намеченная глубина заложения штампов, равная 2,75 *см*, изменилась, так что фактически они были заложены на глубине 2,80 — 2,82 *м*, а штамп № 3 — даже на глубине 2,89 *м* от поверхности земли. Почти одновременно были пробурены скважины *а* и *б* (одна с северной, а другая с южной

стороны) на глубину 2,75 *м* и установлены термометрические трубки для измерения на этой глубине температуры грунта. Все это было сделано в середине августа 1934 г., после чего начались ежедневные наблюдения за состоянием скважин и температурой на их дне, а также в термометрических трубках. Установить заготовленные штампы предполагалось тогда, когда температура во всех шести скважинах сравняется. Это, казалось, должно было определить и время восстановления нарушенного бурением и установкой обсадных труб термического режима, однако дождаться равных температур во всех скважинах не пришлось, и это была первая неожиданность. Приведенная ниже выборка из многочисленных наблюдений дает понятие о том, какие температуры наблюдались в пробуренных скважинах.

Таблица 26

Температуры в четырех скважинах, приготовленных для установки штампов, и в двух термометрических трубках на глубине 2,75 *м* в °С (фиг. 129)

Дата	Термометрическая трубка *a*		Скважины для термометра				
			штамп № 1	штамп № 2	штамп № 3	штамп № 4	трубка *b*
15/VIII	1934 г.	—0,3	—0,2	—0,3	—0,05	+0,1	0,0
22/VIII	1934 г.	—	—0,25	—0,15	—0,25	—0,3	—
27/VIII	1934 г.	—0,4	—0,25	—0,3	—0,3	—0,3	—0,1
31/VIII	1934 г.	—0,4	—0,2	—0,25	—0,25	—0,2	—0,3
31/VIII	1934 г.	В 3—4 часа дня были установлены штампы при безоблачном небе, температуре воздуха +22° и сильном ветре					
3/IX	1934 г.	—0,35	—0,2	—0,1	—0,2	—0,1	—0,35
30/IX	1934 г.	—0,15	0,0	0,0	—	—	—0,15

Примечание. До 3 сентября температуры измерялись в скважинах штампов, когда штампы еще не были установлены. 3 и 30 сентября температура измерялась в самих штампах, опущенных на места, причем 30 сентября на дне штампов № 1 и № 2 были обнаружены вода и кусочки льда.

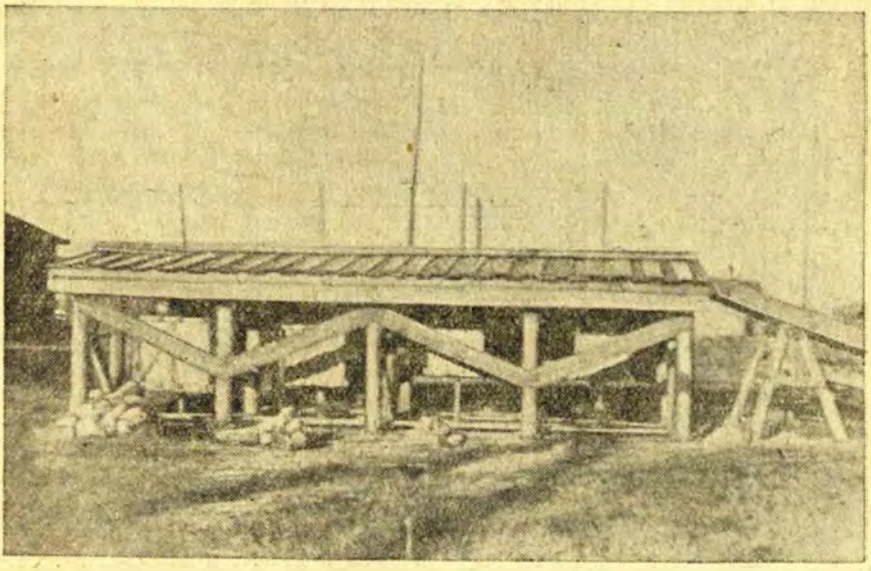
Как видно из табл. 26, штампы были установлены 31 августа. 3 сентября после измерения температур были навешены, как показано на фиг. 129 и 130, ящики и давление доведено до величины около 2 *кг/см*². Точная величина давления показана на чертеже. Величина давления осуществлялась соответственной нагрузкой ящиков камнями.

9 сентября давление на штампы № 1 и № 3 было доведено до 3 *кг/см*², а давление на штампы № 2 и № 4—до 6 *кг/см*². 18 сентября давление на нечетные штампы было доведено до 5 *кг/см*², а на четные — до 10 *кг/см*².

Ввиду того что в ряде скважин, расположенных близко одна от другой (не дальше 2 *м*), нельзя было найти равных температур,

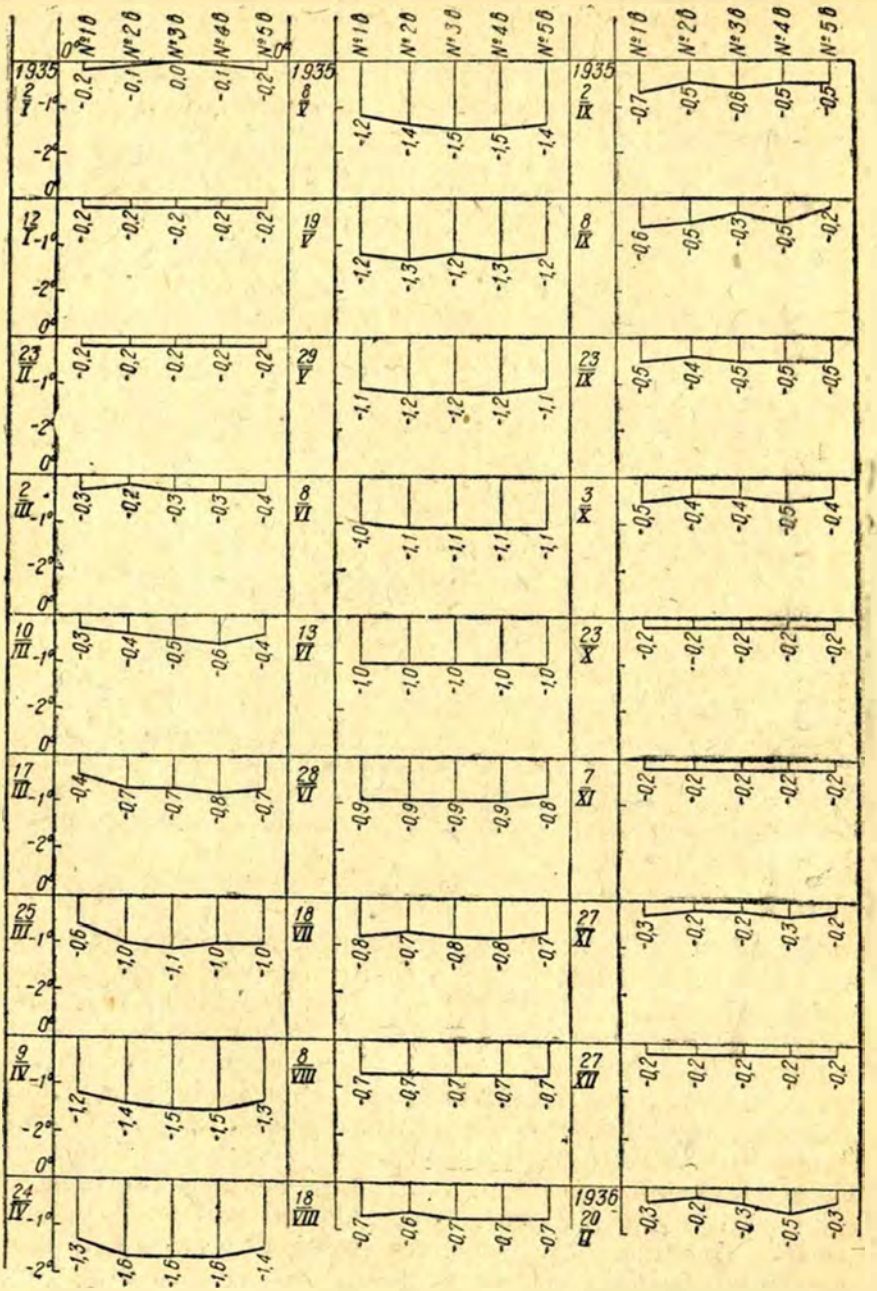
пришлось произвести более обстоятельное изучение этого явления. Для этого у установок $Б_1$ и $Б_2$ на территории, не превышающей 80 $м^2$, было пробурено пятнадцать скважин, в которых и велись на разных глубинах одновременные наблюдения температур. Эти наблюдения, как уже сказано выше, показали, что на одной и той же глубине в одно и то же время равных температур почти никогда не бывает. Иначе говоря, изотермические поверхности — не плоскости, а какие-то волнообразные поверхности.

С наступлением заморозков волнующаяся изотермическая поверхность, соответствующая, например, —1°, начинает постепенно опускаться, причем амплитуда волн с глубиной уменьшается.



Фиг. 130

В табл. 27 даны графики одновременных температур на глубине 2,75 *м*, в пяти скважинах — с № 1 до № 5, —расположенных вдоль установки $Б_1$, недалеко от штампов (см. фиг. 129). Как видно из этих графиков, наибольшая разница температур, равная 0,5°, наблюдалась 25 марта 1935 г. Если же взять наблюдения по всем пятнадцати скважинам, то наибольшая разность температур на глубине 2,75 *м* доходила до 1,0°, что наблюдалось 2 апреля 1935 г. К сожалению, этот интересный с теоретической и практической сторон вопрос более подробно не изучен. Надо было бы выяснить причины, которые вызывают эти неравенства, и таким образом иметь указания на методы искусственной регулировки температур грунта. В приведенной табл. 28 даны сведения о наблюдавшихся неравенствах одновременных температур по упомянутым пятнадцати скважинам на глубинах 1; 1,5 и 1,75 *м*. Эти данные показывают, с какой осторожно-


N°1 0
N°2 0
N°3 0
N°4 0
N°5 0
1935
1 I -1°
-2°
0°
-0.2 -0.1 0.0 -0.1 -0.2
12 I -1°
-2°
0°
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
23 II -1°
-2°
0°
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
2 III -1°
-2°
0°
-0.3 -0.2 -0.3 -0.3 -0.4
10 III -1°
-2°
0°
-0.3 -0.4 -0.5 -0.6 -0.4
17 III -1°
-2°
0°
-0.4 -0.7 -0.7 -0.8 -0.7
25 III -1°
-2°
0°
-0.6 -1.0 -1.1 -1.0 -1.0
9 IV -1°
-2°
0°
-1.2 -1.4 -1.5 -1.5 -1.3
24 IV -1°
-2°
-1.3 -1.6 -1.6 -1.6 -1.4
1935
8 V
-1.2 -1.4 -1.5 -1.5 -1.4
19 V
-1.2 -1.3 -1.2 -1.3 -1.2
29 V
-1.1 -1.2 -1.2 -1.2 -1.1
8 VI
-1.0 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1
13 VI
-1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0
28 VI
-0.9 -0.9 -0.9 -0.9 -0.8
18 VII
-0.8 -0.7 -0.8 -0.8 -0.7
8 VIII
-0.7 -0.7 -0.7 -0.7 -0.7
18 VIII
-0.7 -0.6 -0.7 -0.7 -0.7
1935
2 IX
-0.7 -0.5 -0.6 -0.5 -0.5
8 IX
-0.6 -0.5 -0.3 -0.5 -0.2
23 IX
-0.5 -0.4 -0.5 -0.5 -0.5
3 X
-0.5 -0.4 -0.4 -0.5 -0.4
23 X
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
7 XI
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
27 XI
-0.3 -0.2 -0.2 -0.3 -0.2
27 XII
-0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2
1936
20 II
-0.3 -0.2 -0.3 -0.5 -0.3

стью нужно производить экстраполяцию по единичным наблюдениям температур и насколько условным является определение температур грунта в одной какой-нибудь точке данной территории, в особенности на небольших глубинах.

Таблица 28

Глубина в м	Наибольшая разность температур в °С	Между какими градусами (в °С)	Время наблюдения	Наименьшая разность температур в °С	Между какими градусами (в °С)	Время наблюдения
1,0	3,7	—7,2 и —3,5	23 декабря 1934 г.	0,2	—1,2 —1,0	20/V 1935 г.
1,5	2,9	—6,9 и —4,0	21 января 1935 г.	0,2	—0,9 —0,7	15/VI 1935 г.
2,75	1,0	—1,8 и —0,8	2 апреля 1935 г.	0,0	—0,2 —0,2	Февраль 1935 г.

Примечание. Эти разницы температур определены для периода конца 1934 г. и первой половины 1935 г.

Рассмотрим теперь процесс и результаты наблюдений над установкой $Б_1$ за срок с 18 сентября 1934 г. по 27 июля 1935 г.

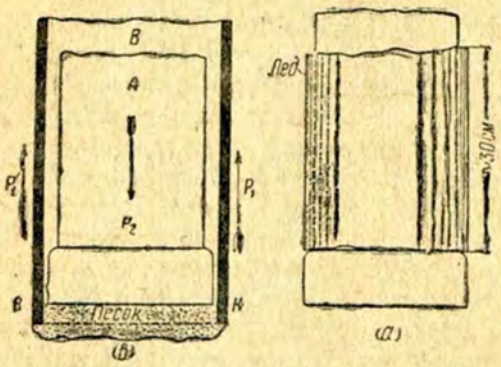
В общем для всех четырех штампов нивелировкой реек, непосредственно установленных в трубках штампов, было отмечено оседание. Наибольшее оседание наблюдалось у штампов № 2 и № 4, т. е. передающих напряжение на грунт 10 *кг/см*². Для штампа № 2 это оседание доходило до 32 *мм*, а у штампа № 4 — только до 17 *мм*, т. е. примерно оседание этих штампов было обратно пропорционально их радиусам. Оседание этих штампов происходило довольно равномерно, но в конце указанного выше срока (примерно за один — полтора месяца), повидимому, совершенно прекратилось. Что касается температуры грунта в ближайших к штампам скважинах *a* и *b*, то на глубине установки штампов наблюдались температуры в пределах от —0,1 до —1,5° С. Однако установить какую бы то ни было связь между оседанием штампов и температурой грунта не представлялось возможным. Так, похолодание грунта в период с 20 марта 1935 г. по июнь того же года, когда можно было ожидать уменьшения оседания штампов, никакого влияния на оседание не оказывало. Что касается нечетных штампов с напряжением на грунт 5 *кг/см*², то здесь как раз в период похолодания грунта наблюдались как будто некоторое оседание штампа № 1 в пределах, не превышающих 3 *мм*, и некоторое поднятие (тоже не превышающее 3 *мм*) штампа № 3, который с 15 декабря 1934 г. до апреля 1935 г. стоял неподвижно.

Все эти перемещения штампов, характеризующие поведение мерзлого грунта под ними, весьма мало вероятны. В самом деле, трудно ожидать, чтобы понижение температуры грунта, который при этом делается более прочным, способствовало оседанию штампа и чтобы в апреле, когда наблюдается некоторое поднятие штампа № 3, возможно было какое-либо пучение.

Грубость наблюдений из-за отсутствия более точных инструментов ставит под сомнение многие из этих перемещений штампов.

Все же не все изменения высот штампов можно отнести за счет недостаточной точности инструментов и отсчетов по ним, и есть целый ряд соображений, указывающих на другие вероятные причины наблюдавшихся перемещений. Одной из таких причин могло быть повторявшееся время от времени поворачивание на 360° штампов, что было вызвано обнаружившимся примерзанием штампов к обсадочным трубам. Оказалось, что несмотря на небольшой зазор между трубами штампов и обсадными трубами, все же там конденсируется значительное количество влаги, которая, замерзая, соединяет ледяной прослойкой трубы штампов с обсадными. Ясно также, что при таком соединении установка $Б_1$ теряла свое значение и поворачивание являлось необходимой мерой для нарушения связи между обсадными трубами и штампами.

Чтобы учесть влияние такого поворачивания на высоту штампа, нивелировку штампов производили и до их поворачивания и непосредственно после. Можно было констатировать, что нивелировка никакого изменения высоты штампа при этом не обнаруживала, но нужно также помнить, что изменение высоты (например, на 1 *мм*) легко могло быть не замечено, так как такое изменение лежало в пределах доступной точности отсчетов при употреблявшихся инструментах. Однако эти возможные небольшие изменения высоты штампов, незаметные при одном повороте, могли с увеличением числа поворотов накопляться и дать в конце концов заметную величину. Увлажнение конденсационной влагой совершенно сухого песка, насыпанного под штампы, тоже могло быть причиной осадки последних.



Фиг. 131

Не учтено было, наконец, и пучение обсадных труб, нижние концы которых были заделаны в вечную мерзлоту. При пучении эти трубы выдергивались из вечной мерзлоты, причем кроме силы P_2, сжимающей нижележащий грунт (фиг. 131, *б*), действовали еще силы P_1, возникавшие при выдергивании, которые могли осложнить условия опыта.

Кроме того, при пучении и выдергивании обсадных труб (что имело место в действительности) песок под штампами должен был частично перемещаться в те кольцевые пространства, которые освобождали выдергиваемые пучением обсадные трубы, что легко могло отразиться на положении штампов, особенно при их поворачивании.

Все эти обстоятельства заставили ремонтировать и отчасти реконструировать установку $Б_1$, к чему и было приступлено 27 июля 1935 г

При этом оказалось, что внутри труб всех штампов оказалась вода, а под водой — лед, иногда смешанный с песком, который там был. Толщина водяного слоя колебалась от 2 до 20 *см*, толщина слоя льда — от 2 до 40 *см*. Штампы № 1 и № 3 можно было вынуть лишь после вливания горячей воды в трубки штампов. Вынутые штампы имели вид, показанный на фиг. 131, *а*; над железной муфтой находился полый ледяной цилиндр высотой около 30 *см*. В скважинах с обсадными трубами была обнаружена вода слоем до 20 *см*.

После того как штампы были вынуты, они были испытаны на водонепроницаемость, так как было подозрение, что конденсационная вода из трубок штампов вследствие недостаточно тщательной заделки низа этих трубок могла проникать в кольцевое пространство между обсадными трубами и трубками штампов. Для этого вынутые штампы были поставлены вертикально, в их трубы была доверху налита вода и велись наблюдения над тем, не просачивается ли вода наружу. Скважины были высушены. Обсадные трубы оставлены без всякого изменения в выдернутом при пучении состоянии. К моменту вторичной установки величина выдергивания составляла 4,8 *см* для штампа № 1; 8 *см* для штампа № 2; 6,7 *см* для штампа № 3 и 5,4 *см* для штампа № 4.

С 1 августа 1935 г. и до дня обратной установки штампов — 1 ноября того же года — в скважинах измерялась температура. Наблюдения показали, что в этот период одновременные температуры на дне этих скважин были равны или почти равны между собой. В редких случаях разница доходила до 0,1°. Минимальные температуры — от 0,7 до 0.6° — наблюдались в августе, максимальные — от —0,4 до —0,5° — в октябре. Эти температуры были иногда на 0,1 — 0,2° ниже, чем в соседних скважинах № 1 *в* до № 5 *в* и в скважинах *b* с термометром № 2, и очень близки к температурам, даваемым термометром в скважине *а*.

В табл. 29 приведены выборки из наблюдений над температурой в скважинах штампов.

1 ноября штампы были установлены на старые места в совершенно сухие скважины; кольцевое же пространство у верха обсадных труб было заложено паклей, пропитанной техническим вазелином.

За исходное положение, с которым решено было сравнивать все последующие, было принято положение, данное нивелировочными отметками 5 ноября, так как к этому времени можно было считать термический режим, нарушенный опусканием в скважины штампов, в достаточной мере восстановившимся. Если внимательно рассмотреть данные вертикальных перемещений штампов после этого числа, то увидим незначительные колебания в высоте штампов. В самом деле, в то время как менее нагруженный штамп № 1, несколько осев, остается до мая неподвижным, а потом немного поднимается, более нагруженный штамп № 2 совсем не оседает. Некоторые необъяснимые поднятия его происходят в начале января и в начале июля. Точно так же наблюдается незначительное постепенное поднятие штампа № 3, тогда как штамп № 4 не уклоняется от первоначального положения, за исключением совершенно необъяснимого поднятия в декабре и оседа-

Таблица 29

Числа августа 1935 г.	Температура °С в скважинах штампов			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
2	—0,7	—0,6	—0,6	—0,7
7	—0,7	—0,6	—0,6	—0,6
12	—0,6	—0,6	—0,6	—0,6
17	—0,6	—0,6	—0,6	—0,6
22	—0,6	—0,6	—0,6	—0,6
27	—0,6	—0,6	—0,6	—0,6

Числа сентября 1935 г.	Температура в °С в скважинах штампов			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
2	—0,6	—0,6	—0,6	—0,6
7	—0,6	—0,6	—0,6	—0,6
12	—0,55	—0,55	—0,55	—0,55
17	—0,55	—0,55	—0,55	—0,55
22	—0,55	—0,55	—0,55	—0,55
27	—0,55	—0,55	—0,55	—0,55

Числа октября 1935 г.	Температура в °С в скважинах штампов			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
3	—0,5	—0,5	—0,5	—0,5
7	—0,5	—0,5	—0,5	—0,5
13	—0,45	—0,5	—0,5	—0,5
17	—0,4	—0,5	—0,5	—0,5
22	—0,4	—0,5	—0,5	—0,45
27	—0,4	—0,45	—0,4	—0,4

ния в середине апреля на небольшую величину (около 5 *мм*). Ни одно из этих изменений никак не увязывается с изменениями температуры грунта, и, в то время как перед наступлением наиболее низких температур грунта штамп № 4 понижается, в других штампах ничего подобного не происходит. Все изменения за второй период наблюдений — с 5 ноября 1935 г. по 5 ноября 1936 г. — настолько незначительны, нехарактерны и незакономерны, что даже самое наличие всех этих изменений является сомнительным и их можно отнести на счет неиз-

бежных (в пределах точности инструментов) ошибок наблюдений. Более точные наблюдения, которые предполагается провести в дальнейшем, по всей вероятности, дадут возможность сказать, что при температурах мерзлых грунтов не свыше —0,2° никаких вертикальных перемещений при нагрузках до 10 *кг/см*² не происходит.

В настоящее время даже на основании того несовершенного в отношении длительности испытания опыта, который был проделан, можно сказать, что давление в пределах до 10 *кг/см*² при температурах, не превышающих —0,2°, не нарушает механической прочности мерзлых грунтов, соответствующих указанной выше характеристике, так как ни при доведении нагрузки до указанной нормы ни в ближайшие после нагрузки отрезки времени никаких явлений, указывающих на разрушение грунта, не наблюдалось. Что же касается перемещений, которые имели место в результате годичных наблюдений, то их можно объяснить либо теми дефектами самой установки $Б_1$, о которых сказано выше, либо отчасти (что все же мало вероятно) деформациями грунта пластического характера. О последних можно сказать, что если они и существуют, то величина их незначительна. Несмотря на это, вопрос о пластических деформациях все же нужно считать открытым, так как непрерывность опыта в течение длительного времени не была осуществлена.

Теперь возникает вопрос о том, насколько высказанные выше заключения можно экстраполировать на штампы больших по площади размеров.

Для того чтобы вполне определенно и уверенно ответить на этот вопрос, на Сковородинской мерзлотной станции ставятся опыты со штампами размером 50×50 *см*; 25×25 *см*; 12,5×12,5 *см* и с приборами, лишенными тех дефектов, которые имелись в установке *Б*. Об этих приборах будет сказано ниже. Здесь же остается отметить, что опыт благополучного существования многих устоев и быков, заложенных на вечной мерзлоте и грунтах, аналогичных сковородинским, позволяет думать, что при указанных выше условиях температуры и влажности гранулометрического состава грунта никаких деформаций при нагрузках интенсивностью по крайней мере до 3 *кг/см*² наблюдаться не будет.

В заключение небезынтересно дать характеристику термического состояния грунта ниже заглубления штампов. В начале исследования температуры эти соответственно были:

На глубине 3,0 *м*	—0,2°	На глубине 4,5 *м*	—0,5°
» » 3,5 »	—0,3°	» » 5,0 »	—0,5°
» » 4,0 »	—0,4°		

Наиболее низкие температуры, наблюдавшиеся на этих глубинах на оголенной площадке, были соответственно равны:

На глубине 3,0 *м*	—4°	На глубине 4,5 *м*	—2,3°
» » 3,5 »	—3°	» » 5,0 »	—1,9°
» » 5,0 »	—2,5°		

ГЛАВА IV

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЧНУЮ МЕРЗЛОТУ

§ 25. Постановка задачи

Если дать подробный геологический разрез слоя земли любой толщины (например, 20 — 25 *м*), подробный анализ грунтов и их влажности, анализ грунтовых вод, полную метеорологическую характеристику данной местности и поставить перед мерзлотоведами вопрос о том, какова должна быть при этих условиях толщина деятельного слоя и каков будет термический режим этого слоя и слоя вечной мерзлоты, то ни один мерзлотовед на такой вопрос, конечно, не ответит, а если и ответит, то только по аналогии, на основании сравнений с известными ему из практики фактами, но не на основании теоретических соображений. Иначе говоря, как количественно влияют на быт (в частности на термический режим) вечной мерзлоты отдельные факторы, например, содержание влаги, гранулометрический состав и т. д., мы не знаем. Это и понятно, если вспомнить хотя бы ту скудность знаний о теплопроводности грунтов, о которой говорилось в главе II, и те затруднения, которые встречаются в применении законов Фурье к замерзающим грунтам, как вследствие незнания той же теплопроводности грунтов, так и вследствие чисто математических трудностей при учете, например, скрытой теплоты плавления и т. д.

В особенности мало мы знаем о физико-химических процессах, происходящих при замерзании грунтов в естественных условиях, а также о том, какое влияние может производить на процесс замерзания и на быт вечной мерзлоты введение в грунт тех или иных химических агентов (солей, кислот, щелочей и т. д.). По крайней мере, в мерзлотоведческой литературе данных об этом почти нет, несмотря на то, что в этой области перед исследователями стоят большие задачи.

Мы знаем, что при замерзании растворов в первую очередь замерзает чистая вода, а незамерзшая жидкая фаза получает большую концентрацию. Нечто подобное, как мы уже говорили, получается и при замерзании взвесей: мелкие частицы механически удаляются из превращающейся в лед массы. Если аналогичные явления происходят и в естественных условиях при зимнем промерзании, то при повторяющемся из года в год замерзании грунта сверху вниз (например, в условиях Сковородина на глубину около 2,5 *м*) должны бы наблюдаться у границы вечной мерзлоты повышенная концентрация

солей и кислот и замерзание при более низких температурах. Начатые в этом направлении работы Сковородинской станции, к сожалению, далеко не доведены до конца. Если бы такая повышенная концентрация солей и кислот была наблюдена, то это дало бы средство определить более или менее уверенно границу вечной мерзлоты после соединения зимнего промерзания с вечной мерзлотой. Проникая же с анализом вглубь, в толщу вечной мерзлоты, можно было бы, пожалуй, установить, в каком направлении шел рост вечной мерзлоты. Если бы такой концентрации найдено не было, то возник бы вопрос, почему этого не наблюдается и т. д.

Что касается влияния введения в толщу деятельного слоя каких-либо веществ, то Сковородинской станции известна только одна (и то неудачная) попытка воспользоваться, по всей вероятности, химическими свойствами грунтов. Сковородинская водоудержательная плотина сильно фильтровала. В наиболее фильтрующем месте в теле плотины была устроена перемычка («зуб»), пылевато-глинистый грунт которой строители решили в процессе возведения засолить обыкновенной поваренной солью. По всей вероятности, строители имели в виду разбухание коллоидальных частиц грунта под влиянием соли и увеличение его водонепроницаемости; так, по крайней мере, можно было заключить из бесед с некоторыми лицами, которые были при устройстве этой перемычки.

Неизвестно, уменьшило ли это фильтрацию в первый год, но на второй год существования перемычки фильтрация в этом месте, по утверждению наблюдателей, знавших эту плотину с момента ее возникновения, была ничуть не меньше той фильтрации, которая наблюдалась раньше.

Весьма возможно все-таки, что введением в деятельный слой солей или иных химических агентов можно влиять как на увеличение и уменьшение водонепроницаемости, так и на другие явления, например на пучение, на прочность смерзания и т. д. Однако, какие бы прекрасные результаты ни сулило на первых порах введение в деятельный слой различных веществ, не надо забывать, что раз эти вещества переходят в раствор, то последний с течением времени под влиянием всевозможных метеорологических и физических причин, конечно, будет изменяться и по концентрации и по составу. Поэтому при применении таких методов всегда возникает вопрос о сроке действия принимаемых мер. Опыты в этом направлении, конечно, надо ставить и чем скорее, тем лучше, так как и самые опыты будут носить длительный характер. Учитывая это, Сковородинская мерзлотная станция в связи с предъявлявшимися к ней требованиями в первую очередь начала изучать влияние на вечную мерзлоту тех искусственных факторов, которые, вообще говоря, не изменяются во времени, понимая под искусственными факторами те условия, которые создаются или могут быть созданы человеком. К факторам, не изменяющимся во времени, можно отнести насыпи, выемки, устройство в толще земляного слоя или на его дневной поверхности всевозможных щитов из дерева, торфа, шлака, камня и т. д. К ним же можно отнести искусственные сооружения, дома

и другие здания, которые, перекрывая определенные площадки земной поверхности, создают в пределах этих площадок, а иногда и возле них особые условия, всегда так или иначе влияющие на вечную мерзлоту.

Относительно этих искусственно создаваемых условий нужно сказать то же, что и относительно естественных, а именно: пока совершенно невозможно теоретически оценить в количественном отношении их влияния на вечную мерзлоту и приходится руководствоваться лишь данными опыта.

Искусственные факторы могут быть двух родов: факторы, которые сохраняют вечную мерзлоту, поднимают ее уровень, и факторы, которые частично уничтожают вечную мерзлоту, понижают ее уровень. Знание этих факторов и умелое пользование ими — одно из необходимейших условий для успешного проектирования сооружений в районах распространения вечной мерзлоты и для успешного строительства.

В связи со сказанным на Сковородинской мерзлотной станции намечен обширный ряд исследований для выяснения влияния искусственных факторов на вечную мерзлоту, причем предусмотрены более совершенные методы измерения температур, пучения, сил смерзания и т. д. Некоторые из этих исследований только начаты, другие только намечены.

Перед составлением плана этих исследований пришлось проделать целый ряд предварительных, так сказать черновых, опытов, чтобы хотя приблизительно узнать масштабы изменения мерзлотного режима под действием различных искусственных факторов и в связи с этим создать надлежащую аппаратуру и наметить план ее размещения в деятельном слое и в слое вечной мерзлоты.

Уже эти предварительные исследования, к описанию которых мы и приступим, дали настолько интересный и поучительный материал, что с ним небесполезно познакомиться.

§ 26. Влияние на теоретический режим изоляционных щитов, заложенных в деятельном слое

В указанных выше целях — найти порядок влияния искусственных факторов на термический режим грунтов, столь тесно связанный с режимом мерзлотных явлений, — в конце октября 1934 г. была осуществлена так называемая установка $Б_4$, показанная на фиг. 10 и детально — на фиг. 132. Установка эта заключалась в следующем. Недалеко от серии *В* почвенных термометров, установленных на естественной площадке еще в 1927 г., были вырыты три котлована размерами в плане 1,5 × 1,5 *м* каждый и глубиной 1,85 *м*, как показано на фигуре. На дне этих котлованов было уложено три изоляционных щита: два деревянных и один из торфа. Деревянные щиты были устроены из брусьев 20 × 20 *см* в котловане *III* и из брусьев 10 × 10 *см* в котловане *II*. В котловане *I* был устроен изоляционный слой из уплотненного торфа толщиной 20 *см*. Впрочем, слово «торф» не вполне соответствует действительности: это, скорее, старый болотный

мох, лишь отдаленно напоминающий торф; такого рода мох широко распространен в дальневосточной тайге и в лесотундре дальнего севера. Широкое распространение указанного торфа (как его в этих местах часто называют) делало желательным его исследование как изоляционного материала, который, что называется, всегда под рукой. В серединах деревянных щитов и сквозь торф были проделаны отверстия, а в пробуренные скважины были вставлены на глубину 2,5 *м* эбонитовые трубки. В эти трубки были опущены серии подвешенных на бечевках почвенных термометров. В каждой серии было по три термометра, расположенных на расстояниях, указанных на той же фигуре.

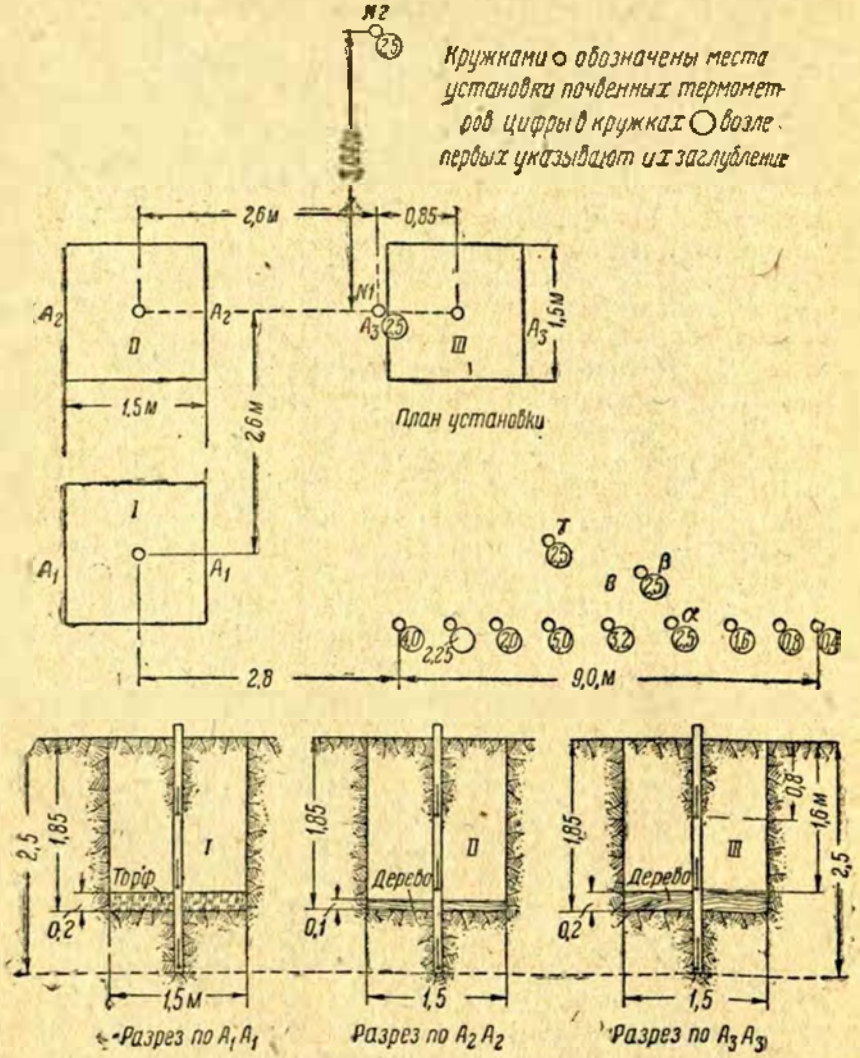
Цель исследования заключалась в определении влияния этих изоляционных щитов на режим замерзания и оттаивания. В частности надо было определить, поднимается ли под этими щитами вечная мерзлота. К сожалению, аппаратура, состоящая из заленивленных почвенных термометров, не позволяла решать эту задачу так и с такой точностью, как это хотелось.

В главе II уже достаточно перечислялись недостатки заленивленных термометров и указывалось, что они являются инструментами грубыми, могущими давать неверные показания, значительно превышающие ту точность отсчетов, с которой производятся наблюдения (т. е. 0,1°), и что причиной этих ошибок является главным образом металлическая оправа термометров, достигающая 45 *см* длины.

Даже средние изоплеты (фиг. 27 и 28), которые вычерчены в результате наблюдений почвенных температур за много лет на естественной и оголенной площадках, носят явные следы влияния длинной металлической оправы термометров. Эти следы видны в волнообразном очертании хотя бы линии нулевых температур с выпуклостями как раз в горизонтах нахождения термометров. Напомнив об этом недостатке применявшихся термометров (что нужно для дальнейшего) и возвращаясь к установке $Б_4$, мы укажем на то, чем руководствовалась Сковородинская НИМС при выборе места для установки $Б_4$ и при выработке схемы расположения щитов и термометров.

С одной стороны, хотелось в целях сравнения расположить самую установку в таких же условиях вблизи того места, где уже много лет велись наблюдения над температурой грунтов. В тех же целях сравнения хотелось и самые термометры в эбонитовых трубках расположить на тех глубинах, на которых имелись термометры в существующей термометрической установке. Как видно из чертежа, все это и было выполнено. Котлованы для щитов *I*, *II* и *III* (см. план установки) вырыты вблизи места расположения *В* термометров, установленных еще при основании мерзлотной станции. Глубины, на которых были установлены термометры, соответственно равнялись 0,8; 1,6 и 2, 5 *м*. Оставалось еще определить глубину заложения щитов. Ввиду изложенных выше дефектов почвенных термометров в металлических оправах щиты решено было расположить так, чтобы металлические оправы термометров не пересекали толщи щитов и не входили в эту толщу, а лежали целиком (включая и оправу) выше или ниже этих щитов. Щиты, представленные на фиг. 132, этому условию удовлетворяют.

Кроме термометров, установленных над и под щитами, были еще заложены на глубине 2,5 *м* термометры № 1 и № 2 — один у самого щита, а другой поодаль, как показано на той же фигуре. И тот и другой термометры имели контрольное значение. Контроль этот, конечно,



Фиг. 132. Установка $Б_1$ (октябрь 1934 г.)

является необходимым, несмотря на те разницы температур, которые наблюдаются на одинаковых глубинах в одно и то же время, о чем подробно говорилось в главе III.

Какие же результаты ожидались от этой установки? Можно было ожидать в период оттаивания и проникновения вглубь положительных температур, что эти температуры благодаря меньшей теплопро-

водности щитов пройдут в горизонты, лежащие ниже щитов, с запозданием во времени и будут менее высокими сравнительно с температурами в тех же горизонтах, где нет щитов. В случае значительного заглубления щитов при расположении их вблизи вечной мерзлоты казалось возможным, что положительные температуры вовсе не пройдут сквозь щиты и что вечная мерзлота, так сказать, поднимется. Аналогичное явление можно было ожидать и в период зимнего промерзания. Отрицательные температуры должны пройти с запозданием и не с той интенсивностью, как в случае отсутствия щитов.

Рассмотрим теперь, что получается в действительности. Для этого рассмотрим график фиг. 133 и отметим время наступления максимумов и минимумов и их величину и сравним с тем, что происходит при условии, когда щитов нет.

В табл. 30 даны величины минимальных температур на глубине 2,5 *м* и время их наступления. Для сравнения взяты термометры: три под щитами, два контрольных — № 1 у щита *III* и № 2, помещенный поодаль, — и, наконец, термометр β из группы *B*.

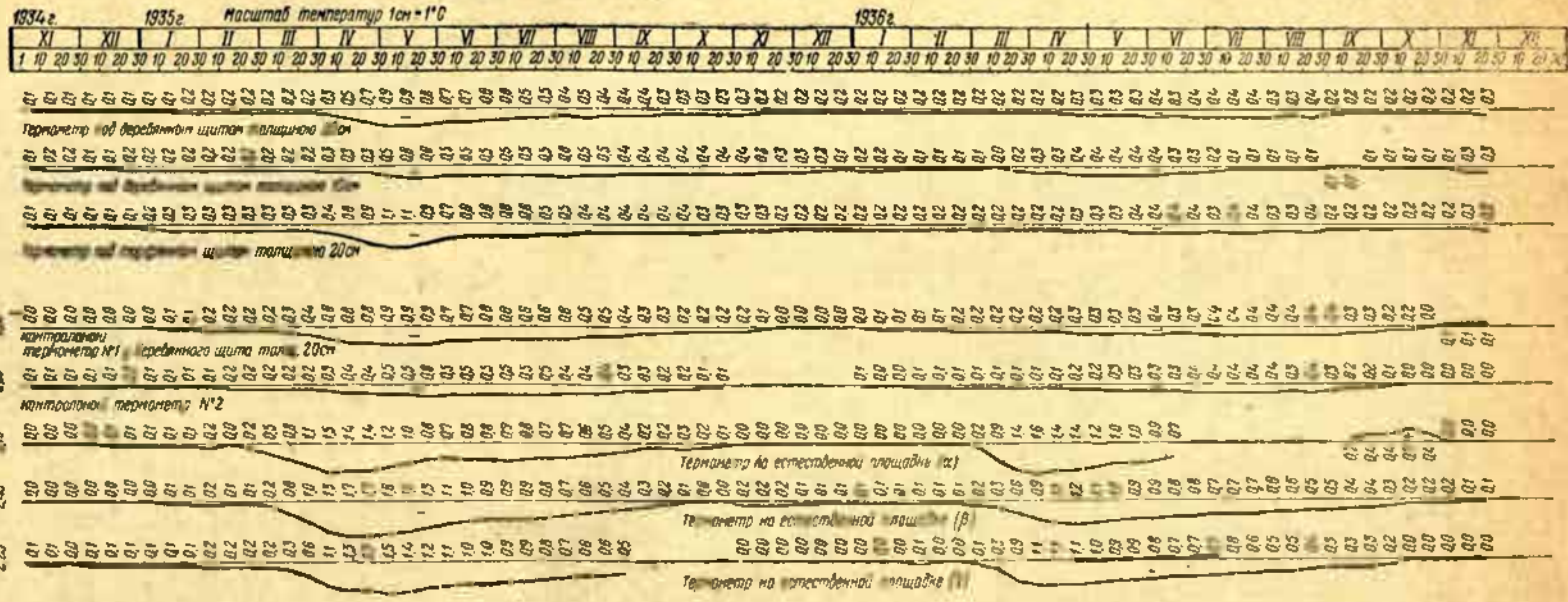
Таблица 30

Величина и время наступления минимальных температур на глубине 2,5 *м*

Место измерения	1935 г.		1936 г.	
	температура	время наступления	температура	время наступления
Под деревянным щитом толщиной 20 *см*	—0,9	5/V	—0,4	5/VI
То же, 10 *см*	—0,6	15/V	—0,4	25/IV
Под слоем торфа толщиной 20 *см*	—1,1	5/V	—0,4	25/V
В скважине № 1 у деревянного щита	—0,9	5/V	—0,4	5/VI
В скважине № 2	—0,6	25/V	—0,4	25/VI
» β группы *B*	—1,7	15/IV	—1,4	25/III
» α » *B*	—1,5	5/IV	—1,6	5/IV
» γ » *B*	—1,5	5 /V	—1,1	5/IV

Что касается других двух термометров группы *B*, установленных на глубине 2,5 *м*, то хотя данные о них и приведены в табл. 31, но к ним нужно относиться только как к ориентировочным, так как термометрическая трубка термометра α, как показали проверочные измерения, постепенно выдернута пучением из грунта на 35 *см*, а трубка термометра γ — на 25 *см*. Строго говоря, и трубка β не находится на глубине 2,5 *м*, а лишь на глубине 2,45 *м* благодаря тем же причинам, но эта разница столь незначительна, что ею можно пренебречь.

Из приведенных графиков, данных на фиг. 133, и табл. 30 и 31 видно, во-первых, что минимальные температуры по своей величине как будто никакой связи со щитами не имеют. Так, наивысшие из минимальных температур наблюдались в 1935 г. почему-то под дере-

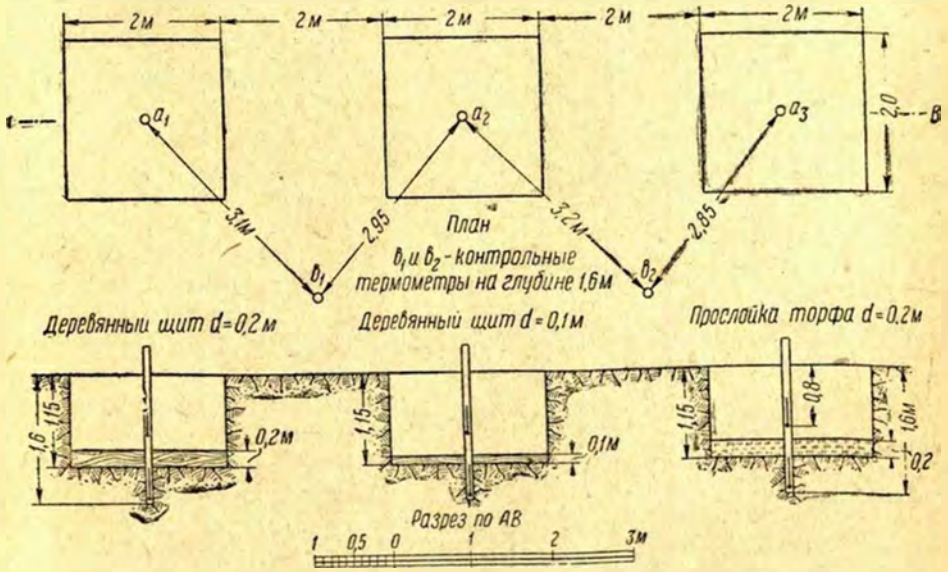


Фиг 133 Графики температур под щитами на глубине 2,5 *м* при различных внешних условиях

Таблица 31

Величина и время наступления максимальных температур

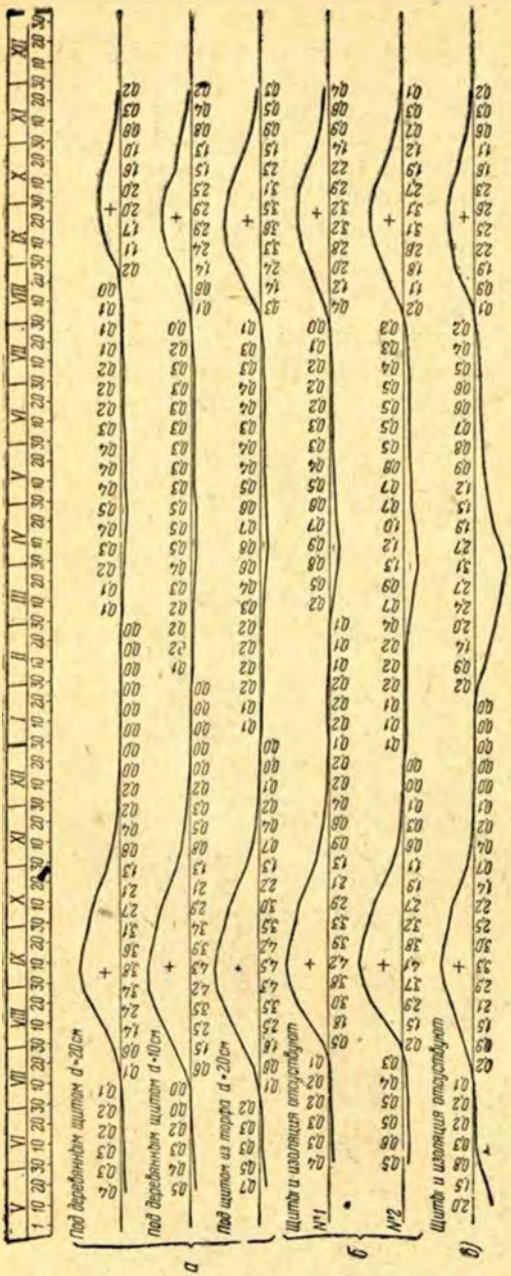
Место измерения	1935 г.	
	температура	время наступления
Под деревянным щитом толщиной 20 *см*	—0,2	15/XI
» » » » 10 »	—0,1	25/XII
Под слоем торфа толщиной 20 *см*	—0,2	25/XI
В скважине № 1 у деревянного щита	0,0	25/XI
» № 2	0,0	25/XII
» β группы *B*	0,0	15/X
» α » »	0,0	5/XI
» γ » »	0,0	5/XI



Фиг. 134. Установка $Б_1$ (продолжение)

вянным щитом толщиной 10 *см* и в скважине № 2, тогда как в другой скважине группы *B*, ничем по существу не отличающейся от скважины № 2, мы имеем наинизшую температуру, равную —1,7°. Температуры под наиболее солидными изоляциями (торф и дерево толщиной по 20 *см*) имеют промежуточное значение. Время наступления этих

температур тоже не подчиняется никакой закономерности. Минимальные температуры и их наступление в 1936 г. также не обнаруживают каких-либо закономерностей, связанных со щитами и их толщиной, и только максимальные температуры, развившиеся на глубине 2,5 *м*, в последнем квартале 1935 г. обнаруживают известное влияние щитов, под которыми мы наблюдаем отрицательные значения температур в пределах от — 0,1° под деревянным щитом толщиной в 10 *см* до —0,2° под другим деревянным щитом и торфом. К сожалению, из-за непригодности для этого дела заленивленных почвенных термометров нельзя было исследовать температуры, имевшиеся непосредственно под самыми щитами.



Фиг. 135. Графики температур под щитами на глубине 1,6 *м* при различных внешних условиях

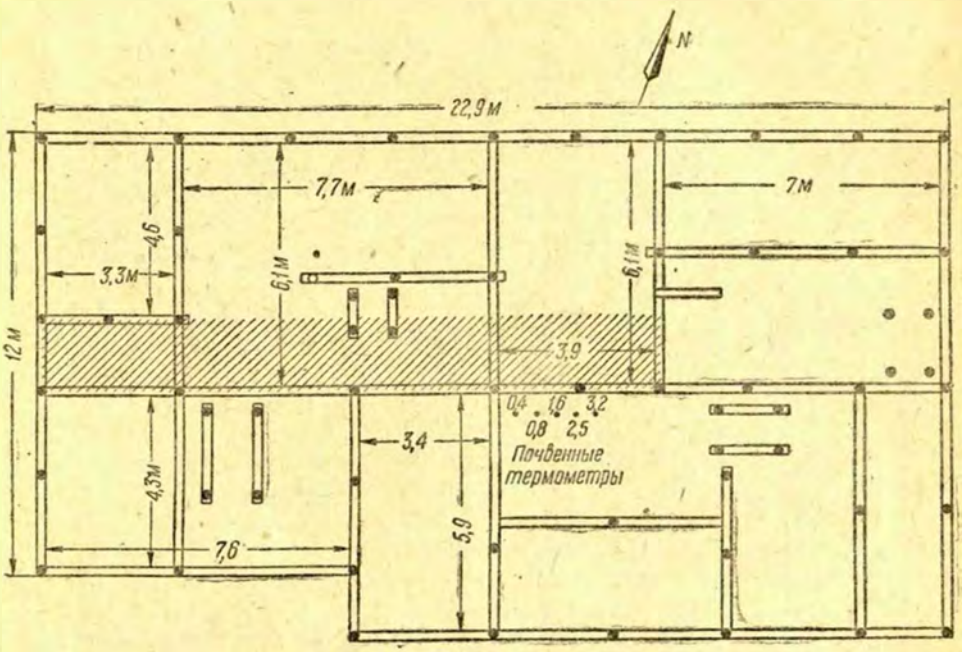
В мае 1935 г. в тех же целях были заложены еще три щита из тех же материалов и такой же толщины, как только что описанные, но размерами в плане 2 × 2 *м*, как показано на фиг. 134. Расположены они были вблизи только что описанных щитов, установленных в октябре 1934 г. Глубина заложения этих новых щитов составляла 1,15 *м*. Предполагалось, что вследствие более резких колебаний температур на этой глубине их влияние будет более заметно.

Прилагаемые графики температур (фиг. 135) под этими щитами на глубине 1,6 *м* указывают, что и здесь влияние щитов столь ничтожно, что это ускользает от анализа

§ 27. Температурный режим под жилыми домами и устойчивость их фундаментов

Дом *А*

Начнем с дома, отмеченного на плане станции (фиг. 10) литерой «А», представляющего здание мерзлотной станции. Дом *А* имеет площадь около 200 *м*² и срублен из лиственничных бревен диаметром 26 — 27 *см*. Дом основан на деревянных стульях диаметром 26 — 27 *см*, заглубленных в землю на 5 *м*, считая от поверхности земли. Эти стулья устанавливались до 16 октября 1931 г. на площадке, с которой был предва-



Фиг. 136. Дом лит. *А*. План фундамента

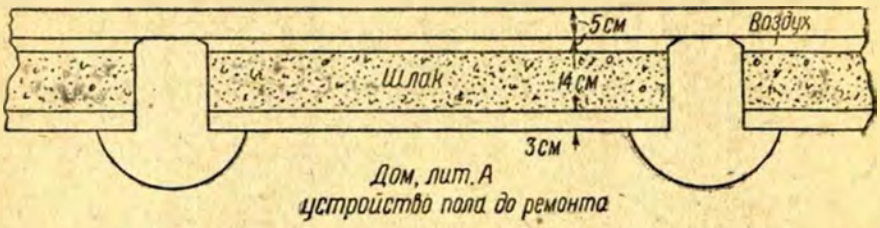
Заштрихована площадь коридора, где утепление полов произведено позднее, чем в остальных помещениях

рительно (еще в августе того же года) снят растительный покров; тогда же были установлены в эбонитовых трубках пять почвенных термометров на глубинах 0,4; 0,8; 1,6; 2,5 и 3,2 *м*. Таким образом, эти термометры после окончания постройки дома оказались в подполье, и дальнейшие наблюдения велись так, что наблюдатели спускались к ним через люк, устроенный в полу одной из комнат этого дома. Место расположения термометров показано на плане фиг. 136.

Стулья под стены дома и под некоторые печи устанавливались так: в деятельном слое до поверхности вечной мерзлоты предварительно выкапывались ямы (шурфы), а затем при помощи буровой ложки диаметром, равным диаметру стульев, высверливались круглые цилиндри-

ческие отверстия до глубины 5 *м*, считая от дневной поверхности, куда и загонялись затем стулья (деревянные цилиндры). Ямы после этого засыпались землей, которая по мере засыпки утрамбовывалась.

Устройство такого фундамента требовало много рабочей силы: шесть рабочих устанавливали в день не более одного стула.

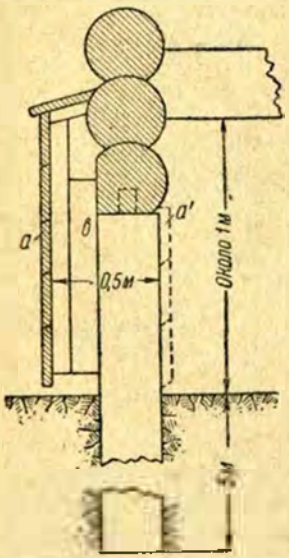


Дом, лит. А
устройство пола до ремонта

Фиг. 137

Всех стульев было установлено, как видно из той же фигуры, 66. По этим стульям на шипах был уложен первый венец; во второй венец были врублены половые балки.

Пол был сделан двойной на черепах, как указано на фиг. 137. Черный пол был устроен впритык из досок толщиной 3 *см* и засыпан слоем шлака толщиной около 12 *см*. Чистый пол был настлан из досок толщиной 5 *см* тоже впритык.



Дом лит. А
устройство цоколя

Фиг. 138

Стулья, как уже было сказано, заглублялись на 5 *м* в землю и выступали над землей так, что образовывали подполье высотой около 1 *м*, считая от земли до низа половых балок. К стульям по периметру здания на выступающей из земли части были прибиты бруски. Эти бруски были обшиты тесом для образования цоколя.

Схема устройства цоколя дана на фиг. 138 и видна на фотографии фиг. 139, где внешняя обшивка цоколя в процессе ремонта снята.

Постройка элементов дома была выполнена в следующие сроки:

1) установка деревянных стульев под стены и печи закончена 16 октября 1931 г.;

2) рубка стен начата 11 декабря 1931 г.;

3) настилка черного пола закончена 2 января 1932 г.;

4) настилка потолка закончена 25 января 1932 г.;

5) засыпка шлаком черного пола произведена 20 — 31/VIII 1932 г.;

6) вокруг дома полоса из шлака шириной 1,5 *м*, толщиной 20 *см* отсыпана в начале сентября 1932 г.;

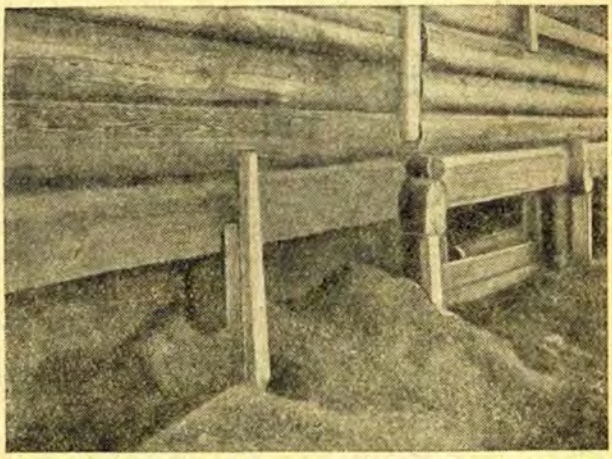
7) полоса из шлака, о которой сказано в п. 6, снята 27 /IX 1932 г.;

8) топка печей начата в октябре 1932 г.

Для устройства шлаковой засыпки цоколя толщиной 0,5 *м* была устроена обшивка *a'* изнутри подполья (фиг. 138 и 139) и в пространстве между обшивками *a* и *a'* был засыпан шлак (виден на фиг. 139). Устройство этой засыпки и закрытие отдушин в подполье было сделано во второй половине ноября (закончено к 27/XI 1934 г.).

Устройство засыпки шлаком и закрытие отдушин вызывалось тем, что в помещении станции было холодно, что и отмечено актами. В морозные дни в помещениях наблюдалась зачастую отрицательная температура, а на полу холод доходил до —19°. Таким образом, принцип подполья, проветриваемого зимою и закрываемого на лето, был нарушен.

Нужно сказать, что все эти меры мало помогли делу утепления, и помещение продолжало оставаться холодным и мало пригодным для работы, несмотря на усиленную топку печей, при которой температура у потолка поднималась до +40°. В наиболее теплой из комнат все же в большие морозы по утрам наблюдалась отрицательная температура, и вода в стаканах, колбах и других сосудах на лабораторных столах покрывалась тонким слоем льда.



Фиг. 139

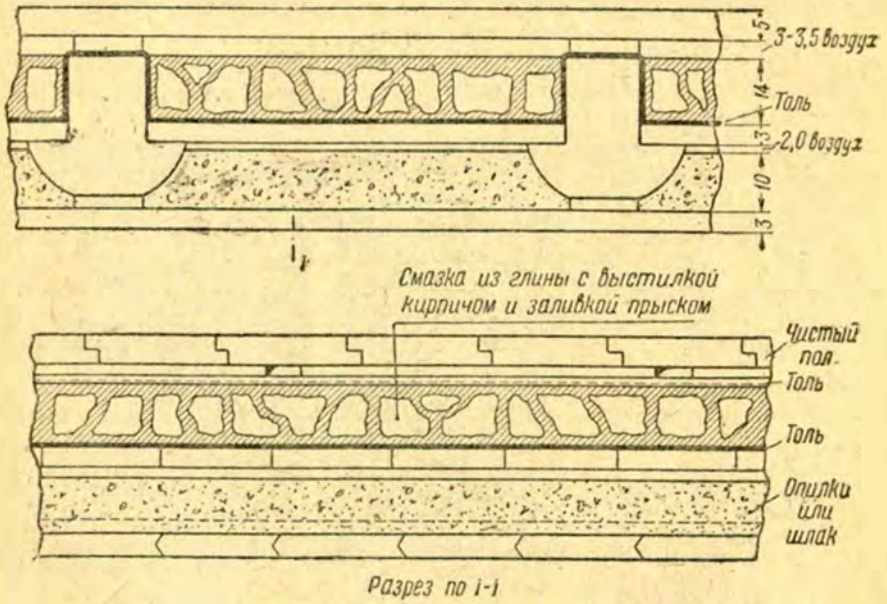
В 1934 г. с ноября приступили к утеплению полов, которое и было закончено к 20/XII того же года. Не был утеплен лишь пол в коридоре.

Устройство полов. Если применить теплотехнические расчеты, которые приводил, например, проф. А. А. Щелоков в своем докладе на IV конференции по изучению мерзлоты или Цытович при подсчетах необходимого термического сопротивления пола Якутской магнитной обсерватории, чтобы сохранить вечную мерзлоту от влияния комнатного тепла (60, стр. 396), то казалось бы, что при столь несовершенных полах, какие были сделаны в доме *A*, вечная мерзлота должна была бы уйти вглубь.

Однако ничего подобного не случилось и не потому, конечно, что теплотехнические формулы как таковые были неправильны, а потому, что, как это весьма часто случается, не вполне правильны были предпосылки к пользованию этими формулами. Дело в том, что холодный воздух проникал сквозь щели пола в более теплые помещения, что

легко было обнаружить, приближая руку к щелям пола. Более теплые, но, конечно, воздухопроницаемые помещения комнат действовали, как насос: подогретый в них воздух, выходя тем или иным способом наружу, засасывал сквозь щели пола холодный воздух. Это обстоятельство и было учтено при ремонте пола. Решено было сделать пол прежде всего воздухонепроницаемым, а затем и менее теплопроводным.

Первоначальный проект утепления изображен на фиг. 140 и в пояснениях не нуждается. Так как во время ремонта нельзя было рассчитывать на скорое высыхание глиняной смазки, а толя тоже не было, то приходилось конструкцию по возможности упростить.



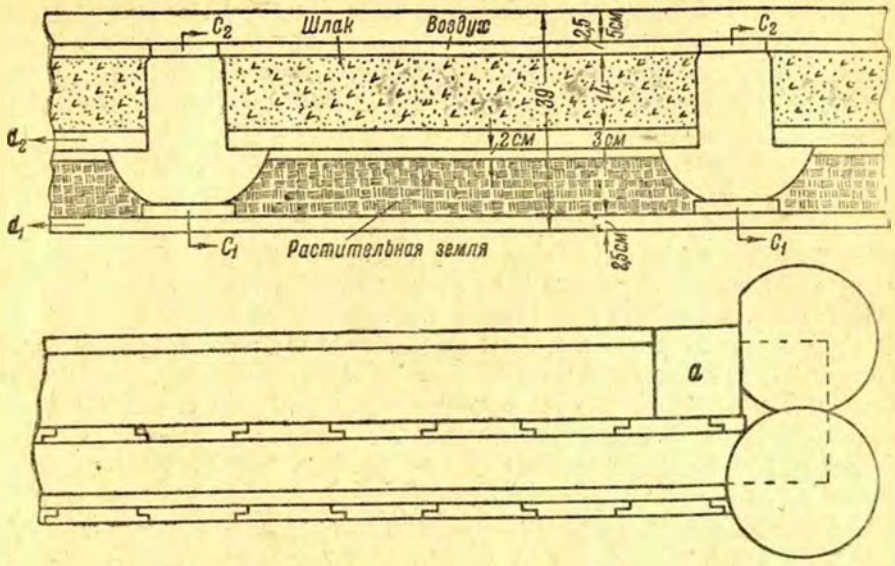
Разрез по i-i

Фиг. 140

Пол был отремонтирован так, как показано на фиг. 141. По тесинам c_1 был подшит из теса в четверть третий пол; соединения были тщательно промазаны глиной, а поверх был уложен 10-*см* слой сухой растительной земли, которая под некоторыми помещениями была смешана с сухими опилками.

Второй, черный, пол был также тщательно промазан глиной в стыках и засыпан шлаком. Кроме того, у наружных стен, если паз между венцами приходился между чистым и нижележащим черным полом, прокладывались тепловые брусья a, a, предварительно обвернутые просмоленным войлоком (фиг. 141 и 142). Поверх балок под чистым полом были набиты тесины c_2 с разрывами между ними, как показано на фиг. 142. Разрывы эти были сделаны в целях возможности вентиляции всего подполья. Чистый пол был сделан из досок впритык, а не в четверть, как предполагалось.

Результаты переустройства сказались немедленно: здание стало вполне обитаемым, и отрицательных температур при нормальной топке печей в помещении больше не обнаруживалось.



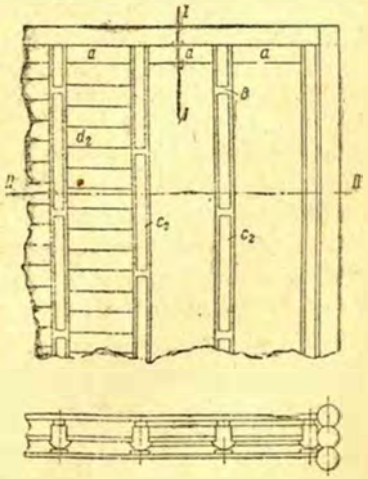
Фиг. 141. Устройство пола после ремонта

Выполненное утепление, конечно, далеко от совершенства. Наиболее уязвимым местом является глиняная смазка. Черные полы — как первый, так и второй — могут усохнуть и расстроить воздухонепроницаемость смазки, в связи с чем вновь появятся холодные течения и потребуется ремонт.

Было бы рациональнее перекрыть стыки досок или тесa черных полов просмоленными полосами брезента или, например, мешковиной.

По поводу конструкции, изображенной на фиг. 140, нужно сказать, что она является вполне надежной, но не лучшей. Она получилась в результате конструкции уже существовавшего пола. При устройстве заново, конечно, можно было бы достигнуть большей простоты и меньшей высоты этого перекрытия.

Здесь мы должны подчеркнуть необходимость в первую очередь устраивать воздухонепроницаемый пол, при необходимых изоляционных качествах.



Фиг. 142. Чистый пол снят (вид сверху)

Термический режим грунтов и влажность под домом *А*. Посмотрим теперь, как устройство дома и последующие реконструкции полов и цоколя отразились на вечной мерзлоте и ее режиме.

На фиг. 143 даны термоизоплеты под домом *А*. На этом чертеже вверху нанесены кривые температур наружного воздуха и кривые температур воздуха в подполье. Там же в кружках помещены данные о средних годовых температурах воздуха как наружного, так и в подполье.

Вертикальные штрихпунктирные линии показывают наиболее важные для нас моменты в строительстве дома *А*.

Так, линия $a_0 a_0$ соответствует снятию со строительной площадки растительного покрова: две линии $a_7 a_7$ ограничивают отрезок времени, в течение которого производились засыпки шлаком цоколя (о чем сказано выше), закрытие отдушин и т. п.

Дом *А* построен на тех пылеватых суглинистых грунтах, которые распространены по всей площадке мерзлотной станции. Глубина протаивания на этой площадке в среднем равна 2,5 *м* с небольшими отступлениями в ту и другую стороны.

Из рассмотрения представленных на фиг. 143 изоплет мы видим, что место, где начали строить дом *А*, ничем не отличалось от других мест территории мерзлотной станции и что максимальное протаивание в сентябре и октябре 1931 г. было очень близко к 2,5 *м*, как можно судить по нулевой изоплете, нанесенной более жирной линией.

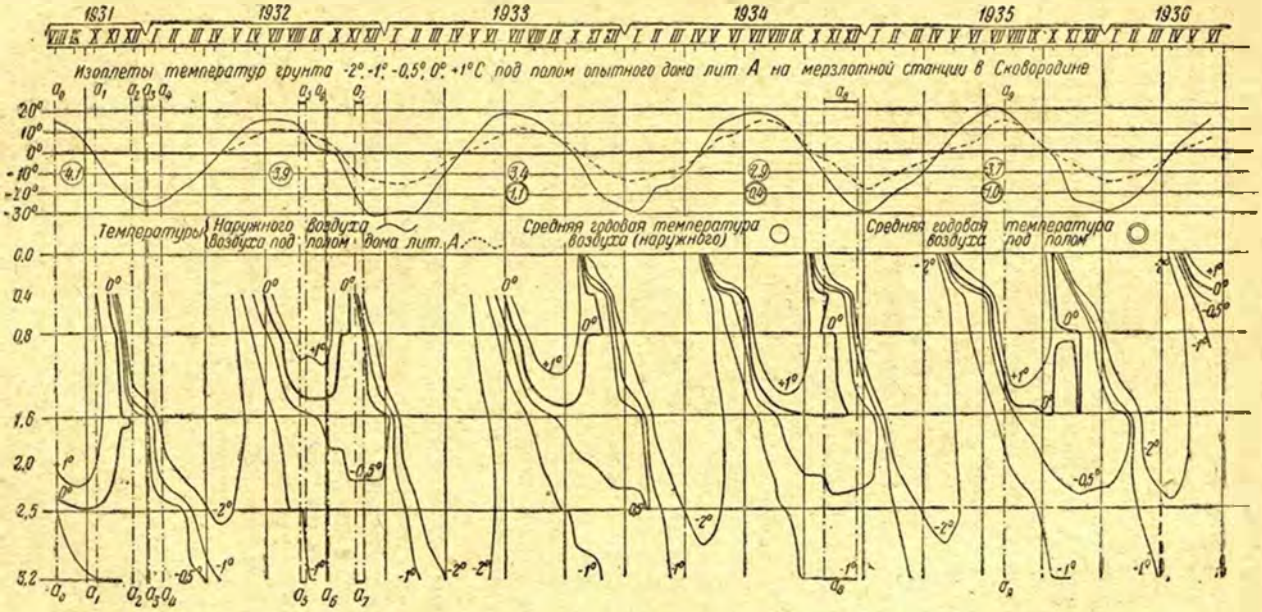
С момента этого наибольшего протаивания и до начала появления в следующем году положительных температур на глубине 0,4 *м* проходит около 8 месяцев, в течение которых настилаются полы и потолки в доме. Как видно из рассмотрения изоплет, это обстоятельство в режиме вечной мерзлоты производит резкое изменение, которое, повидимому, следует приписать исключительно прекращению солнечной инсоляции в подполье под зданием.

В самом деле, протаивание в 1932 г. не достигало и 1,6 *м*. Это, пожалуй, является также обстоятельством, которое при подсчетах было упущено Цытовичем и проф. Щелоковым. Этой убыли тепла, происшедшей от затенения территории, находящейся под зданием, они, конечно, не учитывали.

Некоторое увеличение протаивания (на 10 *см*) в сезоны 1934 — 1935 гг., по всей вероятности, следует приписать неучтенному выпучиванию эбонитовых трубок, в которые вставляются термометры. К началу 1937 г. это выпучивание доходит до следующих величин:

Для термометра, заглубленного на	3,2 *м*,	. . .	7 *см*
»	»	»	2.5 »	. . . 5 »
»	»	»	1,6 »	. . . 20 »
»	»	»	0,8 »	. . . 12 »

Между тем реконструкция полов, после которой они стали воздухонепроницаемыми, должна была бы отразиться на режиме подполья и увеличить глубину протаивания, так как при такой конструкции полов засасывание холодного воздуха извне через слой шлака, зало-



Фиг. 143. Термоизоплеты под домом лит. *А*

a_0—снятие растительного покрова; a_1—конец установки деревянных стульев; a_2—начало рубки стен; a_3—закончена настилка полов; a_4—закончена настилка потолков; a_5—засыпка шлаком черного пола; a_6—начало топки печей; a_7—засыпка шлаком цоколя и закрытие отдушин; a_8—переустройство полов; a_9—переустройство пола в коридоре

женного в цоколе, должно было уменьшиться. Но этого не произошло, вероятно, благодаря тому, что причин для образования конвекционных течений в подполье при этом не возникало, и верхние, более теплые слои воздуха, находящиеся вверху у пола, не перемешивались с более холодными слоями у земли, а передача тепла через лучеиспускание от пола или путем теплопроводности через воздух была крайне незначительна.

В августе 1936 г. была между прочим исследована и влажность под этим домом. Четыре скважины были сделаны под домом, а четыре — снаружи вблизи дома. Глубина скважин равнялась 3 *м*; образцы брались через 0,25 *м*. Отметим, кстати, что меры отвода поверхностных вод в виде канав и стоков при постройке дома были приняты.

Вот средние данные по четырем скважинам: на глубине 1 *м* влажность под домом 20,3%, вне дома 19,2%; на глубине от 1 до 2 *м* влажность под домом 21,3%, вне дома 20,4%. На глубине от 2 до 3 *м* влажность под домом 20,4%, вне дома 23,0%. Среднее по всей толщине в 3 *м*: под домом 20,7%, вне дома 20,8%. Влажность дана весовая по отношению к сырому образцу. Из этого заключаем, что никаких сколько-нибудь основательных данных к заключению, что влажность под домом изменилась, нет, и потому разница в теплопроводности грунтов под зданием и под открытым небом, которую устанавливает К. Фокин (40, стр. 200), нуждается в проверке.

Д е ф о р м а ц и я д о м а. К сожалению, первоначальные наблюдения над домом методически были поставлены неправильно и не дали возможности судить о деформациях. Дело в том, что рейки, разделенные на сантиметры, для определения нивелировкой вертикальных перемещений дома были прибиты к срубу, и потому совершенно не представлялось возможным определить, отчего изменялись нивелировочные отметки: от оседания сруба, от смятия врубок у фундамента или от оседания фундамента.

В дальнейшем этот дефект исправили: были установлены постоянные рейки, наглухо прикрепленные внизу к нижнему венцу; вверху эти рейки были прикреплены к срубу гвоздем, который в случае осадки или поднятия сруба мог свободно перемещаться в сделанном для этого в рейке специальном продольном прорезе.

После такого переустройства нивелировка показала, что дом стоит неизменно и никаких вертикальных перемещений не имеет; этого и следовало ожидать, если вспомнить то, что сказано в главе III о пучении столбов, установленных на оголенной площадке.

В доме *А* цоколь не везде устроен по схеме, изображенной на фиг. 138. В тех местах, где в нижний наружный венец врубаются нижние же венцы поперечных внутренних стен, устройство цоколя сделано по другой схеме, которая понятна из фиг. 139. В этих случаях вспомогательные бруски *b* (фиг. 105), к которым пришивается наружная обшивка цоколя, подходят под венцы, что и видно на фотографии фиг. 139 у двух стульев направо.

Однажды наблюдатели были встревожены тем, что дом начало пучить; поверочная нивелировка подтвердила правильность наблюде-

ний. Был вскрыт цоколь. Оказалось, что при пучении земля, находившаяся под пришитым к стулу бруском *b*, приподняла этот брусок, который в свою очередь приподнял целый угол дома, так что стала видна часть шипа, на который был насажен этот венец. Брусок был подпилен; угол с шумом сел на место. Нивелировочные отметки приняли прежнюю величину.

В другой раз роль бруска *b* сыграл засыпанный в цоколь шлак. Влажность его, несмотря на то, что он был уложен сухим, оказалась в этом месте настолько велика (30%), что он смерзся и пучащий внизу грунт через посредство этого смерзшегося шлака приподнял в этом месте часть здания. Возможно, что увлажнение шлака произошло вследствие случайно попавшей дождевой воды.

Эти примеры приведены подробно для того, чтобы предупредить проектировщиков и строителей, насколько осторожно и внимательно надо в условиях пучащих грунтов подходить при проектировании и строительстве даже к таким маловажным деталям, как вспомогательные бруски, засыпка цоколя шлаком и т. п.

Проветривание подполья. Летом в подполье вследствие конденсации паров воздуха появляется сильная влага, так что балки делаются совершенно мокрыми, а психрометры показывают полное насыщение воздуха паром. Это указывает на необходимость открывать подполье летом для его проветривания и покрывать смолой или какими-либо другими противогнилостными веществами деревянные части, обращенные своей поверхностью к подполью. Такое проветривание и производилось из года в год, начиная с 1933 г., под домом *А*.

Из сказанного ясно, какие поправки надо внести в утверждения Цытовича (60, стр. 392) о необходимости применения подполья, проветриваемого зимой и закрываемого на летнее время, и в те предпосылки, на которых эти утверждения основываются.

Эти поправки следующие. Непроветриваемым подпольем, как увидим далее, надо признавать лишь совершенно воздухонепроницаемые и мало теплопроводные подполья; подполья же, засыпанные шлаком даже без всяких отдушин, не являются закрытыми. Проветривание подполья летом является в описанных выше условиях необходимым и неблагоприятно на мерзлотном режиме не отражается.

По этим же соображениям мы рекомендуем с большой осторожностью относиться к дорогим, а иногда и чрезвычайно сложным конструкциям, например, фундаментов печей, которые предлагались в трудах Евдокимова-Рокотовского, а также в статье Кринсберга, напечатанной в январском номере журнала «Строитель» за 1936 г. Насколько нам известно, эти конструкции, кажется, нигде не применялись.

Дом «Б»

По-иному построен другой опытный дом на территории станции, под литерой «Б», план и устройство фундамента которого показаны на фиг. 144 и 145. Этот дом также был срублен из лиственничных бревен и имел пол такого же устройства, как и дом *А*, что показано на фиг. 137.

Дом был поставлен на спланированной поверхности, на так называемых городках, без всякого заглубления. В первую весну на мерзлый грунт в подполье под домом был насыпан шлак и вокруг дома была сделана широкая шлаковая отсыпка. Толщина слоя шлака равнялась 0,7 *м*.

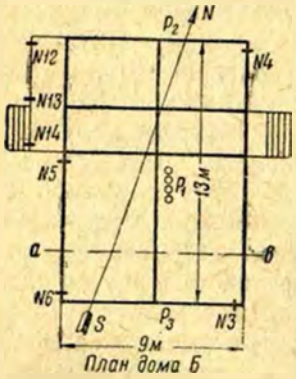
Что же касается фундаментов под печи, то таковые были сделаны в виде стульев с заглублением до 5 *м*, как под домом *А*.

Последовательность строительства дома *Б* протекала в следующем порядке:

1) установка термометров:

а) На глубину 0,4; 0,8; 1,6; 2,5 и 3,2 *м*		11/IX 1931 г.
б) » » 0,0 *м* внутри периметра дома . .		23/XI 1931 г.
в) » » 2,5 » с северной и южной сторон .		30/XII 1931 г.
г) » » 0,0 » с северной и южной сторон дома		17/V 1932 г.

все термометры, перечисленные в пп. «а» и «б», оказались после постройки под домом в месте P_1, как показано на фиг. 144, а перечисленные в пп. «в» и «г» — снаружи у южной и северной границ дома, как это видно на той же фиг. 144 в точках P_2 и P_3;



2) рубка стен начата 19 октября и закончена 16 ноября 1931 г.;

3) настилка полов начата 18 октября и закончена 7 ноября 1931 г.,

Фиг. 144, 145. Дом лит. *Б* Сковородинской НИМС. $P_1P_2P_3$ — места установки термометров, № *3, 4, 5, 6* и № *12, 13, 14* — места укрепления реек. Дом построен в 1931 г.

4) в половине ноября 1931 г. в доме поселились люди; были затоплены печи, но и в помещении и на полу зимой было чрезвычайно холодно;

5) засыпка подполья, которая производилась извне, без вскрытия полов, протекала в период с 3 по 10 марта 1932 г.; точная дата конца засыпки неизвестна.

Столь поздняя засыпка подполья шлаком и столь позднее устройство отсыпки объясняются тем, что строители не хотели засыпать подполья шлаком осенью и даже зимой, опасаясь, что не вся почва под домом промерзла, и отложили это дело до весны, т. е. до времени наибольшего промерзания.

Несмотря на значительные размеры отсыпки вокруг дома, улучшению температурного режима внутри дома это помогло мало: даже при

интенсивной топке печей температура на полу в большие морозы доходила в некоторых комнатах до —15°, поэтому и решено было в этом доме переделать полы так, как они были переделаны в доме *А*;

6) начало ремонта полов в доме *Б* относится к 17 декабря 1934 г., а конец ремонта — к 25 апреля 1935 г.; ремонт полов производился с перерывом с 17 января до 20 апреля: сначала были отремонтированы полы в одной половине дома, затем в другой. Переделка полов в этом доме произвела такой же эффект, как и в доме *А*, и дом стал нормально обитаемым.

Термический режим под домом *Б*. На фиг. 146 даны термоизоплеты под домом *Б*. Как и раньше, штрихпунктирными линиями отмечены различные этапы строительства дома *Б*. Так, линия $a_0\ a_0$ соответствует установке термометров, две линии $a_1 a_1$ соответствуют периоду рубки стены и т. д.

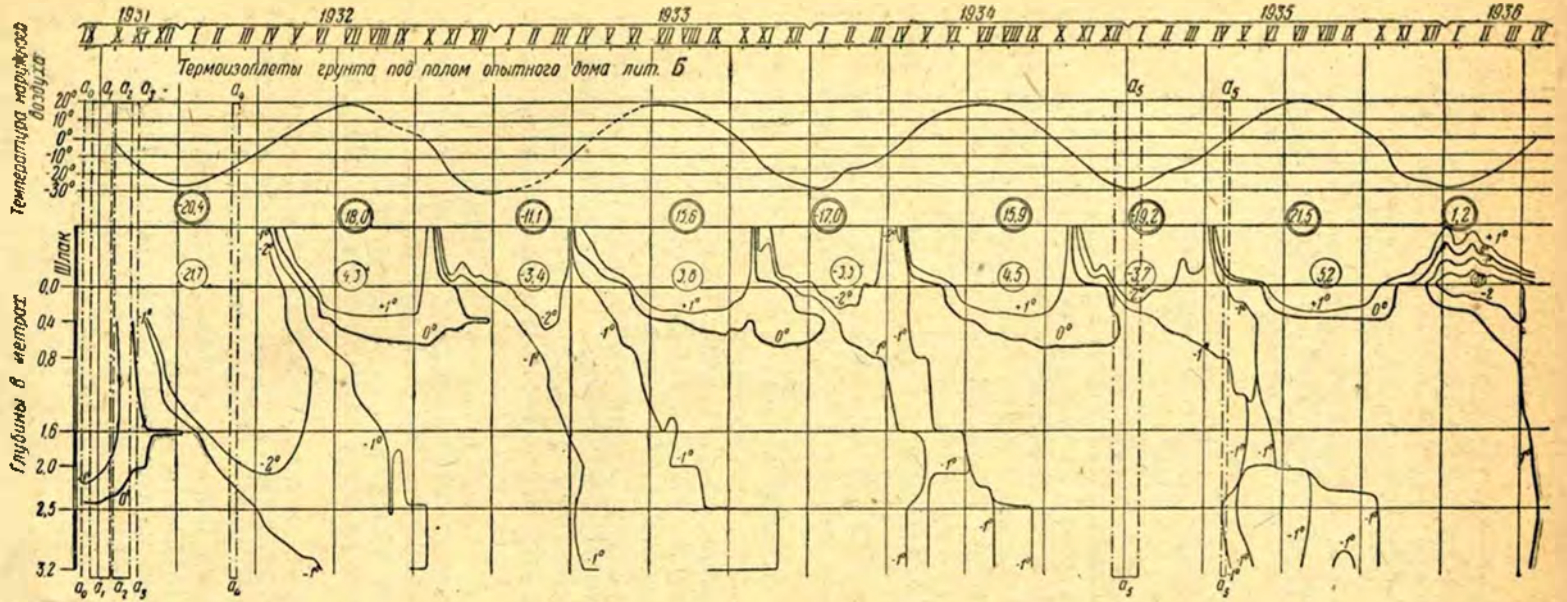
Как и в доме *А*, переустройство полов и подсыпка сразу изменили термический режим грунтов под домом. Это обстоятельство наводит мысль о том, что шлак, даже слежавшийся, прекрасно пропускает воздух. В самом деле, для того чтобы воздух мог проходить через щели пола в домах *А* и *Б*, он должен в первом случае пройти через шлаковую засыпку толщиной 0,5 *м*, а во втором — через отсыпку, которая была сделана вокруг дома *Б*. Из этого заключаем, что хорошие изоляционные свойства шлака проявляются тогда, когда воздух в его порах не перемещается, т. е. когда шлак находится в воздухонепроницаемой оболочке.

Изменение в режиме промораживания грунтов под домом *Б* произошло, конечно, после устройства засыпки шлаком под полом и возле дома, что имело место в марте 1932 г. В самом деле, изоплета —2° в период начала 1932 г. опускается до 2,1 *м*, тогда как в последующие годы она находится на глубине около 0,4 *м*.

Протаивание, которое доходило при постановке термометра до 2,5 *м*, в последующие годы не доходит и до 0,8 *м*, считая от поверхности грунта; если же считать от поверхности шлака, толщина слоя которого равна 0,7 *м*, то от этой поверхности глубина протаивания не доходит до 1,5 *м*.

Нарушение термического режима после реконструкции полов, которое мы видим при рассмотрении термоизоплет, требует дальнейших наблюдений и, возможно, не будет иметь постоянного характера. Очень возможно, что это было следствием того, что переустройство полов затянулось на длительный период и что полы долгое время находились во вскрытом состоянии.

Деформация дома *Б* под влиянием оттаивания и замерзания грунта под ним. В отношении деформации дом *Б* оказался гораздо менее устойчивым, чем дом *А*. К сожалению, в первоначальных наблюдениях над деформациями имелись такие же дефекты, как и в доме *А*, возникшие по той же причине, т. е. вследствие прикрепления реек, при помощи которых производилась нивелировка, к срубу дома, а не к фундаменту или нижнему венцу.

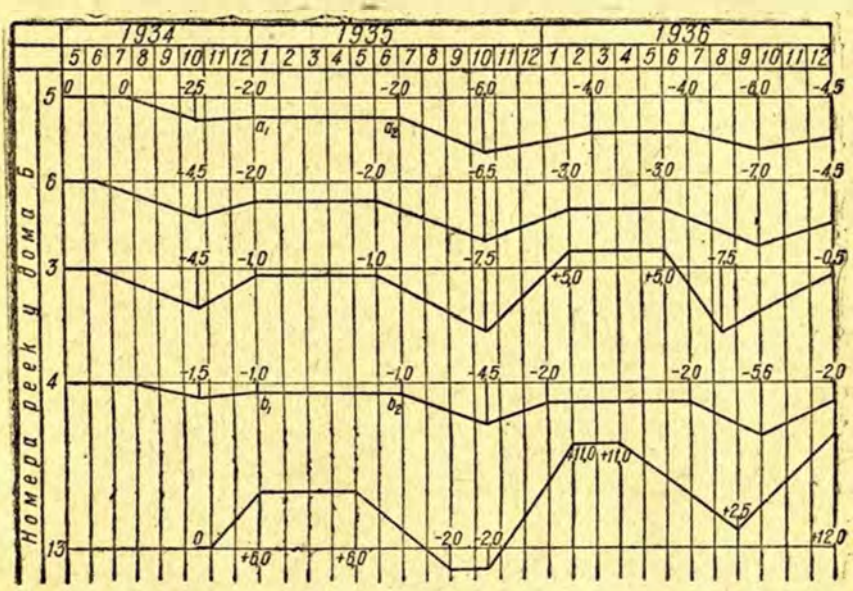


Фиг. 146. Термоизоплеты под домом Б

На графике нанесены изоплеты температур +1°, −0°, −1° и −2° С. Температурные наблюдения начались: на поверхности шлаковой засыпки—со второй декады апреля 1932 г., на поверхности грунта—с третьей декады ноября 1931 г., на глубине 2 м—с ноября 1931 г., на прочих глубинах—со второй декады сентября 1931 г. Пунктирные линии на графике движения температуры наружного воздуха означают отсутствие данных максимальной и минимальной температуры: 0—на поверхности шлака; 0—на поверхности грунта. a_0a_0—установка термометров на глубинах 0,4; 0,8; 0,6; 2,5 и 3,2 *м*; a_1a_1—рубка стен; a_2a_2—настилка полов; a_3a_3—начало топки печей и вселение людей; a_4a_4—засыпка пола шлаком; a_5a_5—ремонт полов, происходивший в два срока

После установки реек, прикрепленных к нижнему венцу, как и в доме *А*, нивелировка показала деформации, данные на графике фиг. 147. Из графика видно, как перемещались с течением времени четыре точки дома, где установлены рейки *3*, *4*, *5* и *6* (на графике нанесены только относительные максимумы и минимумы). Если же какая-нибудь из точек некоторое время не перемещалась, то на графике даются ординаты, характеризующие начало и конец этого периода покоя; таковы на фиг. 147 точки a_1 a_2, b_1 b_2 и т. д.

Из этих графиков мы видим, что точки *5*, *6* и *4* в конечном результате постепенно перемещаются вниз, что из них точки 5 и *6* имеют большее



Фиг. 147. Графики вертикальных перемещений различных точек дома лит. *Б*

оседание, а точка *4*, находящаяся у северной части дома, — меньшее. Наибольшие амплитуды тоже принадлежат южным точкам. Несколько не согласуются с характером деформаций остальных точек деформации точки *3*, где в 1935 г. наблюдалось пучение выше первоначального уровня. Внешних причин для этого, повидимому, не имелось.

Ломаная линия *13* на фиг. 147 представляет деформации фундамента тамбура, устроенного на трех стульях, к которым и прикреплены рейки *12*, *13* и *14* (фиг. 144). Деформации всех трех стульев совершенно одинакового характера. На фиг. 147 приведены деформации одного из них, амплитуды перемещений которого несколько превосходят амплитуды деформаций других столбов.

Тамбур был пристроен к дому значительно позже. Фундамент для него закладывался к концу сентября 1934 г. Фундаменты в виде стол-

бов с крестообразно установленными парными схватками для заякоривания были установлены на глубину 1 *м*. Такое заякоривание имелось и у многих столбов опытной ограды и описано в главе III. Когда рыли ямы для столбов, то на глубине около 1 *м* был обнаружен большой подток воды из соседней, никогда почти не пересыхающей, лужи, чему способствовала засыпанная шлаком канава, очевидно, сделанная когда-то для осушения территории дома. Таким образом, столбы были установлены в ямы, куда подток воды был более или менее обеспечен. Это обстоятельство давало полную уверенность в том, что процесс пучения возможен. Интересно было выяснить, сыграет ли заякоривание роль и какую именно. Как и следовало ожидать, заякоривание в переувлажненных грунтах никакого эффекта не дает.

Пучение столбов опытной ограды с аналогичным заякориванием, как мы уже видели, тоже осталось безрезультатным.

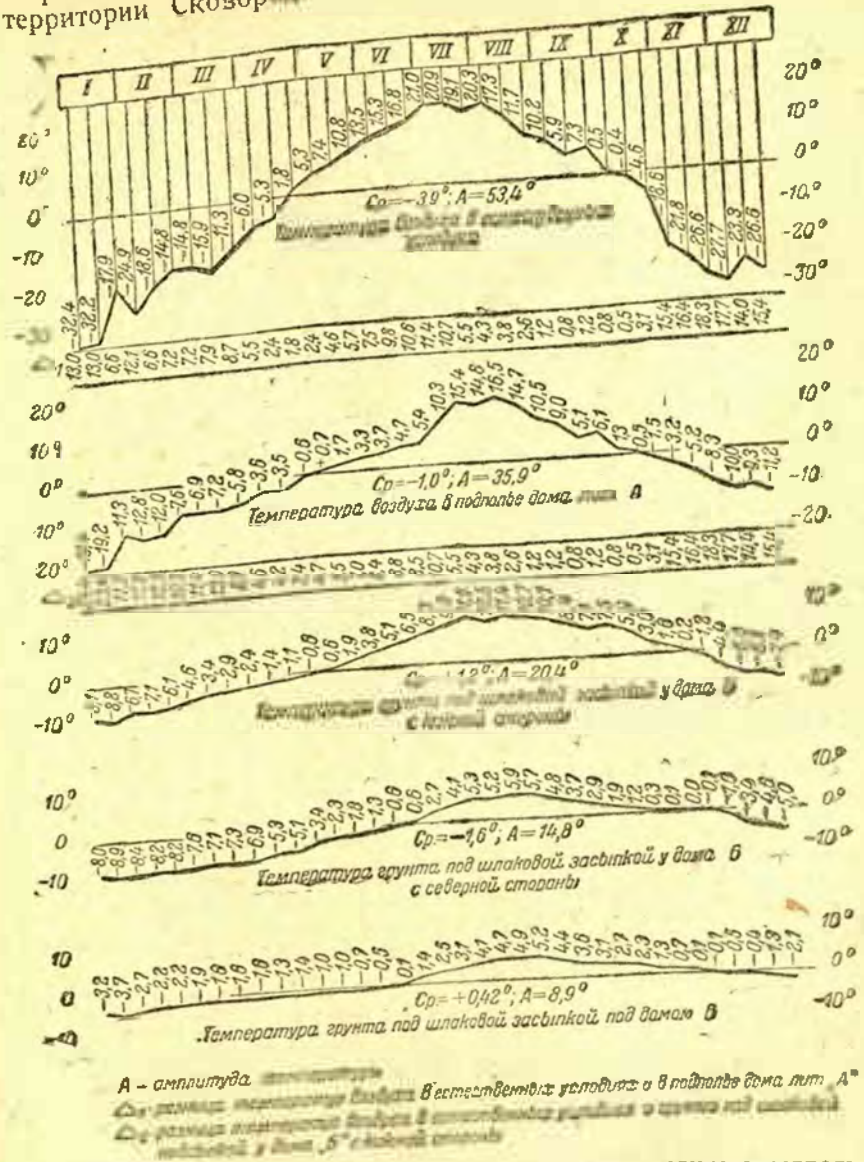
Термический режим под домами *А* и *Б*

Рассмотрим теперь термический режим в подпольях домов и под шлаковой подсыпкой у дома *Б*, так как эта шлаковая подсыпка неразрывно связана с подпольем. На графике фиг. 148 мы имеем подекадный ход температуры воздуха за 1935 г. и аналогичные графики хода температур в подполье дома *А*, под засыпкой из шлака с юга и севера дома, а также под домом.

Прежде всего необходимо отметить, что средняя годовая температура в подполье дома *А* выше средней годовой температуры наружного воздуха. Казалось бы, что вследствие этого верхняя граница вечной мерзлоты должна опуститься. Между тем в действительности наблюдается обратное, и это не случайное явление: Сковородинская станция располагает опытом 4 лет, в течение которых средние годовые температуры в подполье дома *А* все время остаются выше средних годовых температур наружного воздуха (фиг. 143 и 149). Однако это нисколько не помешало подняться верхнему горизонту вечной мерзлоты, как это видно по изоплетам. На чертеже фиг. 149 помещены данные о средних годовых температурах под шлаковой засыпкой на уровне земли. С южной стороны дома мы имеем исключительно положительные температуры, под домом — опять таки положительные, но значительно меньшие в 1936 г., даже переходившие в отрицательную, и, наконец, на северной стороне мы имеем исключительно отрицательные температуры.

Нет ничего невероятного в том, что столь значительная разница в режиме северной и южной сторон должна быть приписана инсоляции. К сожалению, отсутствие надлежащих опытов из-за отсутствия необходимых приборов не позволяет высказать это с большей уверенностью, подкрепляемой более убедительным цифровым материалом. То, что под домом — под шлаковой засыпкой — температуры ниже, чем под шлаком с южной стороны дома, еще раз убеждает нас в том, что влияние температуры жилого помещения, действующей через пол, вероятно, меньше влияния непосредственной инсоляции.

В деревянных домах, где нет подполья, протаивание мерзлого грунта идет гораздо глубже. Так, в одном из бараков и в кухне, находящихся на территории Сковородинской мерзлотной станции, протаивание



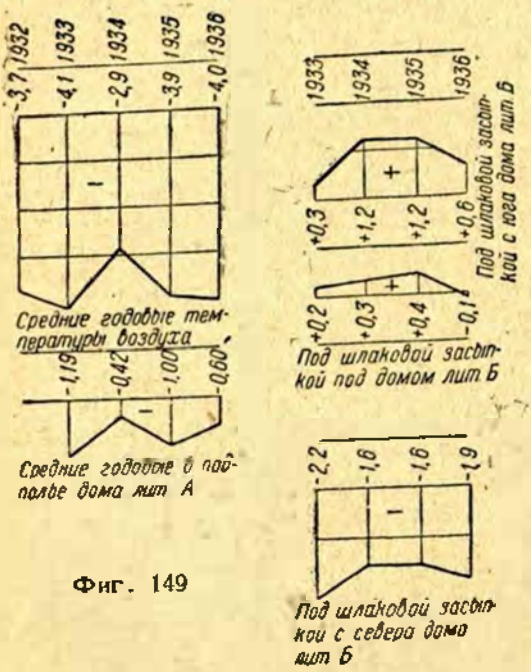
Фиг. 148. Сравнительные температуры наружного воздуха в подполье дома лит. А и под шлаковой засыпкой дома лит. Б

наблюдалось до глубины 4 — 4,5 *м*. Полы этих зданий устроены весьма примитивно: на спланированную землю уложены деревянные, отесанные на два канта, лежни и по ним непосредственно настлан чи-

стый пол. Расстояние между нижней поверхностью пола и поверхностью земли — от 5 до 15 *см*.

Наблюдения над протаиванием под каменными зданиями, к сожалению, весьма немногочисленны и мало изучены. В одном депо под поперечной кирпичной стеной, отделявшей помещение кузницы от механической мастерской, наблюдалось протаивание свыше 4 *м*, ширина помещения составляла около 20 *м*; но об этом подробнее будет сказано ниже.

В книге Цытовича и Сумгина (60, стр. 351) имеются довольно подробные материалы о протаивании под кирпичным зданием Петровско-Забайкальской мерзлотной станции, устроенной на бутовом фундаменте.



Фиг. 149

Размеры станции в плане 6 × 8 *м*. Здание обогревается одной центрально расположенной печкой. Глубина заложения фундамента 2,8 *м*. Сплошной фундамент устроен только под наружными стенами и образует, таким образом, замкнутое со всех сторон подполье прямоугольного очертания в плане. Высота подполья около 0,5 *м*. Толщина стенок фундамента 0,7 *м*.

Под центральной печью устроен особый бутовый фундамент на глубину 2,8 *м*. В цоколе здания высотой 0,75 *м* имеется четыре отверстия для проветривания в летнее время. В месте непосредственного возведения этой станции верхняя граница вечной мерзлоты находилась на глубине не более 2,8 *м* (считая от поверхности земли).

Станция была построена в 1931 г. В 1932 г. в октябре и ноябре верхняя граница вечной мерзлоты между печкой и южной стеной станции опустилась примерно до глубины 3 — 3,20 *м*. Такое же примерно протаивание мы видим и в октябре 1933 г. К сожалению, эти наблюдения обнимают период только около 3 лет.

Очень интересен, конечно, и влажностный режим, но о нем даны лишь очень сбивчивые показания. В одном месте говорится, что «влажность гравелисто-песчаного грунта ниже подошвы фундамента не превышала 9% от веса сухого грунта», а несколько дальше указывается, что горизонт грунтовых вод на 11 октября 1933 г. находился на глубине 2,5 *м*, т. е. выше подошвы фундамента, так что указанная чрезвычайно небольшая влажность ниже подошвы фундамента весьма сомнительна.

§ 28. Протаивание под локомобилями и под бассейном для воды у лесозаводов в Игарке. Протаивание на Читинской электростанции

В статье «Вечная мерзлота и строительство Игарки» (23, стр. 51) приводятся примеры протаивания мерзлоты под бассейном у лесозавода № 2 и между локомобилями силовой станции, расположенной в 15 *м* от бассейна с заглубленными в землю топками. Размеры бассейна 60 × 30 *м*; глубина 2 *м*. Бассейн сделан осенью 1931 г. Перед наполнением водой дно бассейна было еще мерзлым. Температура воды в бассейне около +20° в течение всего года. Бассейн до обследования протаивания находился в эксплуатации около 10 месяцев. Локомобили работали почти непрерывно около 2 лет. Под бассейном протаивание достигло 6,5 *м*, а между топками локомобилей, которые были расположены рядом, 6,7 *м*. Повторное бурение через год дало почти те же результаты.

Вопрос о протаивании вечной мерзлоты под площадями, подвергающимися непрерывному действию положительных температур в течение, например, нескольких лет, является совершенно неизученным.

Некоторые сведения, приведенные выше, даны лишь для того, чтобы дать понятие о возможных размерах протаивания под непрерывным действием положительных температур.

Что касается бассейна у лесозавода, то последующие обследования как будто бы обнаружили значительно большее протаивание, чем то, которое наблюдалось в 1931 — 1933 гг. и о котором сказано выше. Это, конечно, вполне возможно. Раз горизонт какого-нибудь водоема выше окружающих грунтовых вод, то нет ничего невероятного, что вследствие такой разности горизонтов на некоторой площади дна водоема может начаться просачивание воды и что под влиянием такого просачивания вечная мерзлота может постепенно уходить вглубь.

Но для такого постепенного понижения верхней границы вечной мерзлоты в течение длительного периода времени необходимо наличие просачивания. Без такого просачивания, без движущихся вод мы будем иметь лишь такое понижение верхней границы вечной мерзлоты, которое из года в год остается постоянным или почти постоянным, колеблющимся около некоторого среднего положения.

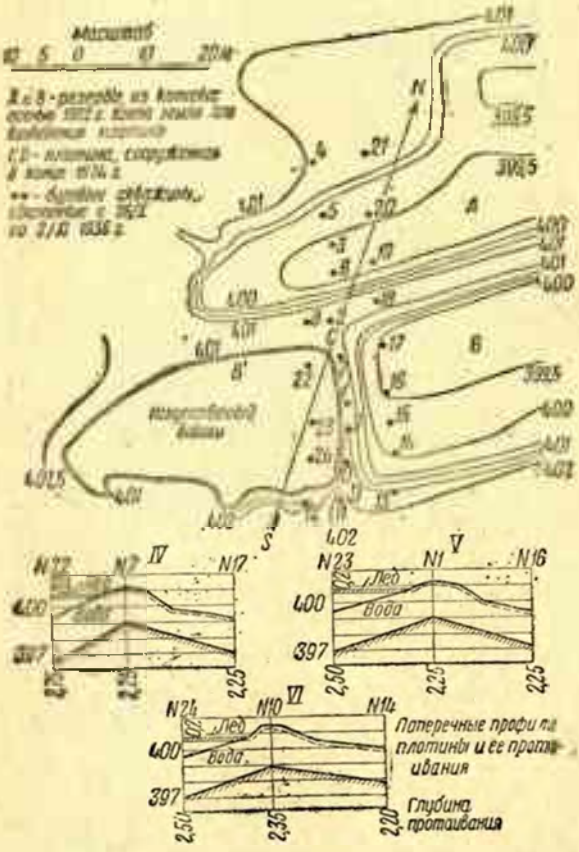
Бурение дна водоема Сковородинской плотины в 1938 г. тоже показало, что в некоторых местах (но не везде) протаивание вечной мерзлоты значительно больше, чем это показано на фиг. 34. Такое протаивание, повидимому, совпадает с усиливающейся фильтрацией плотины.

Нечто подобное наблюдается и на Читинской электростанции, где горизонт вечной мерзлоты из года в год значительно понижается и не только под зданием станции (что можно было бы объяснить непрерывным обогреванием площади, занятой этим зданием), но и на территории станции. Обстоятельства, являющиеся причиной такого ненормально быстрого в естественных условиях понижения границы вечной мерзлоты, еще недостаточно выяснены, но, повидимому, связаны с изменением режима грунтовых вод, которое могло быть следствием искусственного подъема воды в соседнем водохранилище.

Из этого ясно, что возводить сооружение, основанием которому должны служить вечно мерзлые грунты, можно лишь тогда, когда термический режим вечной мерзлоты является совершенно установившимся и когда можно заранее учесть, какие дальнейшие изменения в этом режиме создадут вновь возводимые сооружения.

§ 29. Изменение температурного режима в выемках и под насыпями

Не без влияния на температурный режим грунта остается возведение на какой-либо территории насыпей, выемок и т. п. В районах расположения вечной мерзлоты все это влияет, конечно, и на мерзлотный режим.



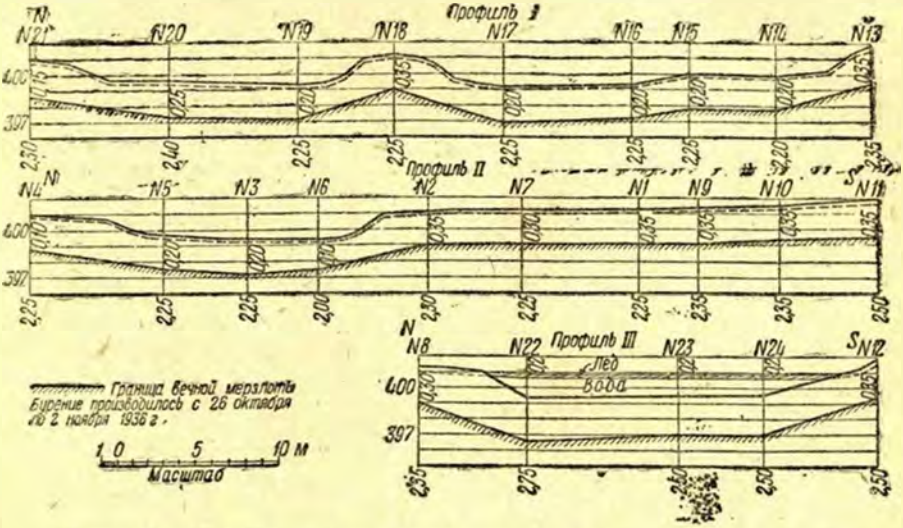
Фиг. 150. Часть территории Сковородинской НИМС

В качестве примера можно привести часть территории мерзлотной станции, изображенную на фиг. 150.

В первой половине 1932 г. эта территория представляла собой почти совершенно ровную, плоскую поверхность с легким скатом по направлению к северу. Осенью 1932 г. для устройства водоудерживательной плотины потребовалась земля. Строители нашли, между прочим, что земля на территории, указанной на чертеже, подходит для сооружения плотины, и вот экскаватором искусственно были созданы два рва, земля из которых и пошла на сооружение плотины. Начальные части этих рвов-резервов, находящиеся на территории станции, изображены на фиг. 150. Очертания одного из этих резервов, а именно *A*, вполне ясны из чертежа; что же касается другого резерва, то на чертеже к нему нужно отнести и территорию *B'*, занятую искусственным водоемом, и мысленно уничтожить плотинку *CD*. Ни водоема ни этой плотинки в 1932 г. еще не было.

Оба резерва тянутся на восток на 250 — 300 *м* и имеют глубину до 3 *м*. Так как большая водоудержательная плотина, о которой мы неоднократно упоминали выше, сильно фильтровала, то на мерзлотной станции из того же грунта решено было устроить небольшую опытную плотинку *CD*, чтобы выяснить фильтрационные свойства этих грунтов.

Поздней осенью и даже частично зимой 1934 г. из мерзлотной земли была устроена плотинка *CD* высотой около 2 *м*. Весной 1935 г. она сильно фильтровала: весенние воды совершенно свободно проходили сквозь комья мерзлого грунта. Летом эти комья оттаяли, плотина осела и была досыпана. Июльские и августовские дожди, представляющие характерные явления на Дальнем Востоке, наполнили отделенный



Фиг. 151. Профили по искусственным оврагам, плотине, пруду

плотиной резервуар *B'* водой настолько, что пришлось установить несколько ниже гребня этой плотинки водосливную трубу, чтобы вода не переливалась через гребень. Вода сквозь плотину совершенно не фильтровала.

В октябре 1936 г. было решено исследовать в отношении залегания верхней границы вечной мерзлоты часть этой территории, для чего и были пробурены 24 скважины, изображенные на чертеже черными кружочками.

На фиг. 150 и 151 даны профили через эти точки бурения: три продольных (*I*, *II* и *III*) и три поперечных (*IV*, *V*, *VI*). Из рассмотрения этих профилей мы видим, что горизонт вечной мерзлоты при создании насыпей и выемок следует за рельефом искусственно созданного профиля: в выемках он уходит вниз, а под насыпями поднимается. Нижняя или северная экспозиция, повидимому, играет некоторую роль, но для небольших выемок и насыпей, какие имеются на рассматриваемой нами

территории, весьма небольшую. Интересно отметить, что наличие водоема глубиной около 2 *м* на глубине протаивания отразилось весьма незначительно: протаивание по величине получилось почти таким, как если бы никакого 2-*м* слоя воды не было. Сравнивая глубину протаивания под водоемом, равную 2,50 — 2,75 *м*, с протаиванием в других точках, видим, что протаивание под водоемом примерно на 25 — 40 *см* больше.

Под глубокими водоемами стоячей воды протаивание, повидимому, может быть больше. Так, по исследованию Афанасьева, протаивание под слоем воды в 6 *м* в Сковородинской плотине достигало 4 — 4,5 *м* (фиг. 34).

Поднятие вечной мерзлоты под плотинкой, которая протаивает только на определенную глубину, и режим мерзлоты под водоемом показывают, что устройство плотины с водонепроницаемым мерзлым ядром вполне возможно и что указания на то, что старая плотина Петровского завода в Забайкалье устроена зимой из мерзлого грунта, ничего невероятного в себе не содержат. Но на этом останавливаться не будем, так как режим под водоемами рассмотрен выше. Отметим лишь, что по произведенным анализам влажность под водоемом только немногим больше, чем в других скважинах, и составляет в среднем около 24,6 %(весовых) по отношению к влажному грунту. Средняя влажность в остальных скважинах составляет 22,7%.

На профилях фиг. 150 и 151 под линией поверхности земли пунктиром обозначена глубина имевшегося промерзания; цифры показывают его величину, которая в выемках меньше, а на выпуклых частях рельефа больше.

§ 30. Практические выводы и дальнейшие задачи

Подводя итоги всему сказанному выше об искусственных факторах, влияющих на режим вечно мерзлых грунтов, и делая соответствующие выводы, можем сказать, что правильное понимание и надлежащее изучение влияния различных факторов на поведение вечной мерзлоты до известной степени дают строителям возможность управления режимом вечной мерзлоты по своему усмотрению и правильно оценивать эффективность тех или иных мероприятий. Так, из изложенного вытекает, что изоляционные прокладки (например, из дерева и торфа) мощностью 10 — 20 *см*, заложенные во влажных пылеватых суглинистых или супесчаных грунтах деятельного слоя, никакого или почти никакого изоляционного эффекта не дают, так как и дерево и торф во влажном состоянии теряют изоляционные свойства. Во всяком случае этот эффект настолько ничтожен, что строитель не может на него рассчитывать и с ним считаться.

Из этого, однако, не следует, чтобы деревянные щиты и прокладки были вовсе не применимы. Из рассмотрения тех же графиков хода температуры под щитами мы видим, что и торф и дерево во влажном состоянии во всяком случае имеют приблизительно ту же теплопроводность, что и грунты, или может быть несколько меньше. Поэтому

устройство деревянной подушки под каменной кладкой является вполне рациональным.

В самом деле, пусть, например, мостовой устой закладывается на глубине 4 *м* на вечной мерзлоте и пусть по расчету возможно ожидать протаивания под ним вечно мерзлого грунта на 30 *см*. При таких условиях заложение на глубине 4 *м* непосредственно на грунт возможно лишь при наличии скалы и мало увлажненных песчаных и гравелистых грунтов, но совершенно невозможно на грунтах пылевато-супесчаных и пылевато-суглинистых с их обычно большой влажностью. При оттаивании, как известно, эти грунты теряют свою несущую способность. В последнем случае укладка деревянной подушки под устоем из двух рядов деревянных брусьев сечением 20 × 20 *см* является вполне естественным выходом, так как термический режим либо остается таким, каким он был бы в естественных условиях (что будет при равенстве теплопроводности сырых деревянных брусьев и мерзлого грунта) либо изменяется в желательном для строителя направлении (если теплопроводность таких брусьев будет несколько меньше). Важно то, что брусья, принимая положительную температуру, не теряют своей несущей способности и протаивание на 30 *м* не отражается на устойчивости сооружения. Иначе говоря, замена грунта брусьями в худшем случае эквивалентна замене мерзлого грунта другим с той же теплопроводностью, но не теряющим своих несущих свойств при положительных температурах.

Итак, при устройстве мостовых устоев каменных или бетонных опор в пылеватых и переувлажненных грунтах такие опоры нужно закладывать ниже верхнего горизонта вечной мерзлоты по крайней мере на 1,0 *м* и сверх того под основание укладывать один или, лучше, два ряда деревянных брусьев сечением 20 × 20 *см* и притом так, чтобы эта деревянная подушка выступала за пределы периметра основания опоры не менее чем на 20 *см* во избежание подтока тепла, который, по исследованиям С. С. Ковнера (62, стр. 38), вполне возможен. Такая деревянная подушка кроме выполнения основной роли — замены ненадежного грунта надежным (о чем сказано выше) — еще дает возможность очень удобно вести бетонную кладку, не боясь ни ее чрезмерного охлаждения под влиянием вечной мерзлоты, ни оттаивания вечно мерзлых грунтов под влиянием экзотермических процессов при схватывании и твердении бетона.

Что касается предложения закладывать бетонные опоры на 1 *м* ниже верхней границы вечной мерзлоты, то это основывается на следующих соображениях. Опыт Сковородинской НИМС показывает, что если положительные температуры и проникают в тело бетонных массивов на большую глубину, чем в окружающих пылеватых суглинках и супесях, то это превышение распространения положительных температур составляет не больше 0,5 *м*. С другой стороны, поскольку при изысканиях верхняя граница вечной мерзлоты определяется на основании наблюдений в течение одного года, то, как мы видели выше, такое определение не является вполне надежным, и можно думать, что в другие годы эта граница будет находиться ниже. Опыт же по-

казывает, что колебания верхней границы вечной мерзлоты не превышают 0,5 *м*.

Итак, если допустить, что верхняя граница вечной мерзлоты может быть ниже наблюденной при изысканиях на 0,5 *м* и что положительные температуры в теле бетонного массива могут опуститься ниже этой границы на 0,5 *м*, то мы и получим тот 1 *м*, на который рекомендуется заглублять опору ниже определенной при изысканиях верхней границы вечной мерзлоты. При более обстоятельном знании колебаний верхней границы вечной мерзлоты в каком-нибудь месте, когда мы располагаем, например, данными о глубине протаивания за ряд лет, глубина заложения опоры может быть, конечно, уменьшена.

Все это, — еще раз повторяем,—относится к случаям заложения опор в грунтах, теряющих свою несущую способность при переходе в такое состояние.

Сказанное является результатом опыта и, конечно, не всегда будет приложимо к очень большим сооружениям, где, например, укладываются сотни и более кубических метров бетонной кладки и где экзотермические процессы имеют другой масштаб и могут потребовать других решений вопроса о том, как поступать с вечной мерзлотой и где двух слоев брусьев может оказаться совершенно недостаточно.

Выше мы видели, что изменения верхней границы вечной мерзлоты под влиянием изменения внешних условий проходят весьма быстро и что примерно через год измененный режим вечной мерзлоты стабилизируется. Однако и здесь нужно сделать оговорку, аналогичную сделанной выше, т. е. связанную с масштабом строительства.

Так, если в очень короткий срок мы сделаем, например, очень большую насыпь из талого грунта, то есть основание думать, что в первое время вечная мерзлота не только не поднимется в эту насыпь, но даже, наоборот, существующая верхняя граница вечной мерзлоты может временно понизиться.

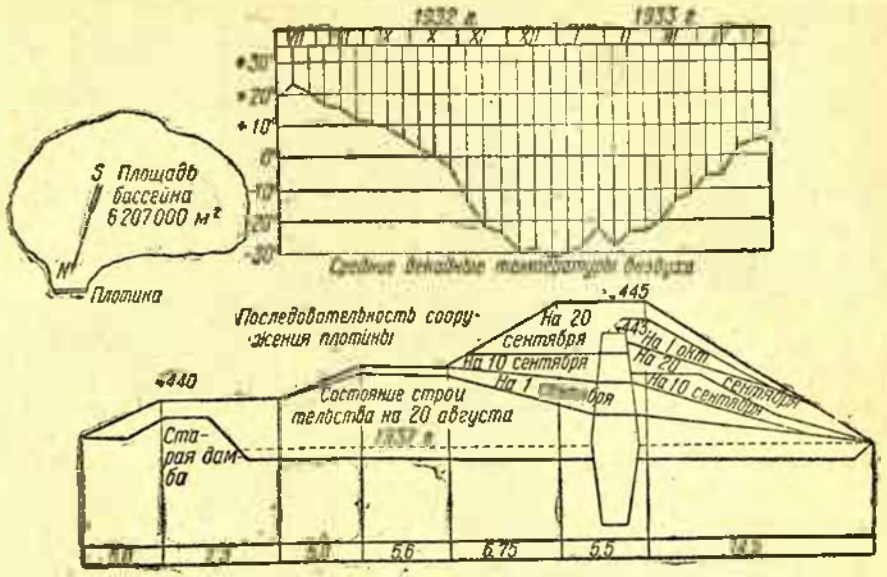
Как пример можно привести сооружение в Сковородине большой водоудержательной плотины. На фиг. 152 показана последовательность сооружения плотины, а на фиг. 153 дан термический режим тела плотины на 10 ноября 1932 г., т. е. непосредственно после возведения плотины, и на 20 апреля 1933 г., т. е. почти полгода спустя.

Из чертежа видно, как медленно происходит охлаждение тела плотины. Следует сказать, что ядро плотины, указанное на чертеже, было сделано из привозной, так называемой «ушумунской» глины. По исследовании оказалось, что этот суглинок мало чем отличается от местных пылеватых суглинков, из которых, как сказано выше, сделана плотина; поэтому можно считать, что плотина сделана из однородного материала.

Здесь следует со всей категоричностью подчеркнуть, что при всяком строительстве на вечной мерзлоте большую роль играет время года, в которое производится строительство.

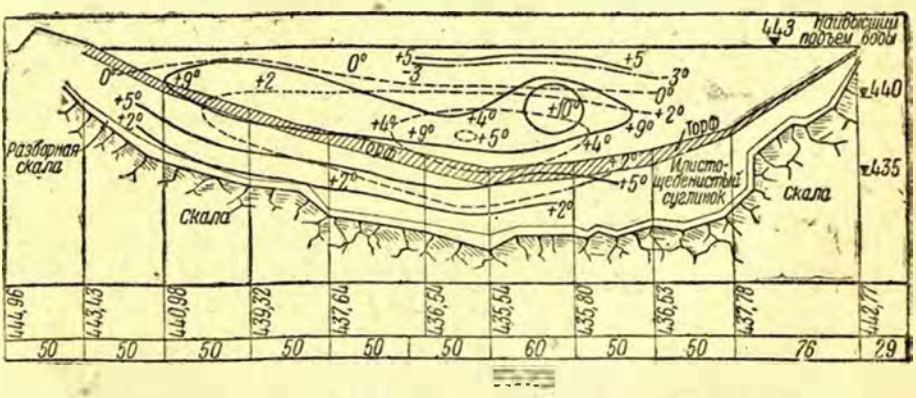
При сооружении Сковородинской плотины в сентябре и октябре строители скопили большие запасы тепла в теле плотины. В больших насыпях, сделанных зимой, можно искусственно создать мерзлый ре-

жим. На этой необходимости считаться со временем года при строительстве нам придется еще остановиться не раз, и это должно учитываться строителями.



Фиг. 152. Сковородинская плотина

Возвращаясь к строительству наиболее распространенных средних и малых масштабов, из рассмотрения приведенных выше примеров



Фиг. 153. Термический режим Сковородинской плотины

Сплошные линии—изотермы тела плотины по оси на 10/XI 1932 г.; пунктирные линии—изотермы тела плотины по оси на 20/IV 1935 г.

видим, что под влиянием искусственных факторов термический режим и изменяется и устанавливается весьма быстро — в течение одного года.

В самом деле, течение температур под щитами для второго года мало чем отличается от первого; поднятие вечной мерзлоты под до-

мами *А* и *Б* происходит непосредственно вслед за устройством подполья и остается почти неизменным в последующие годы; протаивание под бассейном у лесозавода в Игарке достигает размера 6,5 *м* в течение 10 месяцев, а может быть и более, чего мы сказать не можем, так как бурение раньше не производилось, но остается без изменения в течение уже 2 лет.

Изменения рельефа верхней границы вечной мерзлоты в пределах территории, приведенной на фиг. 150, происходят непосредственно вслед за изменением рельефа дневной поверхности и т. д. Иначе говоря, всякое изменение внешних условий весьма быстро вызывает вполне определенное изменение термического режима деятельного слоя и слоя вечной мерзлоты, соответствующее состоянию подвижного равновесия, меняющегося в годичном цикле, но остающегося в своем периодическом течении почти неизменным.

Создание оголенной площадки и термический режим находящихся под нею грунтов деятельного слоя и вечной мерзлоты могут служить пояснением этой мысли. В самом деле (как можно судить по имеющимся изоплетам, фиг. 27 и 28) термический режим грунтов под этой площадкой изменился вслед за ее созданием и цикл измененного режима повторяется затем из года в год с весьма небольшими колебаниями.

Таким образом, основанные на теоретических соображениях и соответствующих вычислениях утверждения Цытовича и Сумгина (60, стр. 399), что под влиянием тепла, выделяемого в данном случае полом здания Якутской магнитной обсерватории, е ж е г о д н о в подполье здания грунт «будет оттаивать на 20 *см* больше, чем промерзать», совершенно не соответствуют данным Сковородинской станции.

Утверждение о постоянном потоке тепла от пола, уничтожающем «постепенно» мерзлоту, можно встретить в разных вариантах и у других авторов. «Раз существует этот поток, рано или поздно мерзлота будет растоплена», — говорят они. Отсюда — закрытые летом и вентилируемые зимой подполья и даже стремление к созданию источника холода под зданием, с тем чтобы получить там среднюю температуру более низкую, чем средняя годовая температура наружного воздуха, и т. д.

На деле же мы видим совсем другое: в доме *А* цоколь засыпан шлаком, толщина которого равна 50 *см*, отдушины зимой закрыты, температура воздуха в подполье в среднем выше температуры наружного, воздуха, отдушины летом открываются для осушения подполья, а мерзлота под зданием поднялась и устойчиво держится на одном и том же уровне. В связи с этим утверждения Цытовича — Сумгина (60, стр. 406), что предлагаемые ими тепловые расчеты дают решение вопроса, «в общем подтверждаемое наблюдениями в натуре», по опыту Сковородинской мерзлотной станции, неверны. Столь большое расхождение между тем, что дают теоретические теплотехнические расчеты и практика, требует серьезного изучения и соответственного изменения принципов этих расчетов, так как пользоваться данными только опыта, конечно, нецелесообразно.

В главе II отмечалось большое влияние влажности на теплопроводность. В связи с этим сам собой возникает вопрос о том, нельзя ли, влияя на влажность, изменить теплопроводность грунтов или материалов, а вместе с этим и термический режим какого-либо участка.

Так, малая эффективность деревянных щитов как теплоизоляции может быть в значительной мере объяснена той избыточной влажностью, которую имеет дерево в условиях залегания в деятельном слое или в вечной мерзлоте. Спрашивается, нельзя ли достигнуть хороших результатов, уложив сухой щит, который был бы изолирован от влияния окружающей влаги, например путем тщательной осмолки и т. п. Это улучшило бы изоляционные свойства, но рекомендовать и рассчитывать на это пока совершенно нельзя, так как неизвестно, как долго будет действительна такая изоляция. Также неопределенно обстоит пока дело с вопросом действия дренажей и других мер для осушения грунта, состоящего из пылеватых суглинков.

Конечно, сказанное никоим образом не относится к другим грунтам, например песчаным, где этот вопрос под углом зрения изменения термического режима, повидимому, совсем не изучен.

ГЛАВА V

ДЕФОРМАЦИИ СООРУЖЕНИЙ И ИЗЫСКАНИЯ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

§ 31. Вопрос об изучении деформаций сооружений в районе распространения вечной мерзлоты

Нет, пожалуй, ни одной книги по вопросам вечной мерзлоты, где не приводилось бы нескольких эффектных примеров аварий, связанных с наличием вечной мерзлоты, и примеров ее вредного влияния, но анализа всех этих влияний, основанного на детальном изучении явления, мы почти никогда не находим. Здесь чувствуется определенный пробел в наших знаниях, и заполнение этого пробела является задачей ближайшего времени.

Обзор деформаций и аварий различных сооружений в условиях вечной мерзлоты в нашей литературе мы найдем в Сборнике института реконструкции пути № 8 и в книге Евдокимова-Рокотовского «Постройка и эксплуатация железнодорожных сооружений в вечной мерзлоте».

Наиболее богатый по объему материал собран у Евдокимова-Рокотовского. Но в главе III этой книги мы уже видели из разбора приведенных этим автором примеров о перемещении влаги возле ст. Букачачи (34, стр. 47) и о нивелировке на ст. Сковородино (34, стр. 59), с какой осторожностью нужно пользоваться данными, которые собраны Евдокимовым-Рокотовским иногда, повидимому, без должного анализа. Кроме того, сопровождающие описание этих случаев комментарии иногда столь противоречивы, что ценность их и комментируемых случаев сильно от этого страдает.

Так, у Евдокимова-Рокотовского в разделе об искусственных сооружениях мы находим, например, утверждение, что «мерзлые грунты при оттаивании пучатся, плывут и производят большое давление» (34, стр. 110). Это подтверждается и дальше (34, стр. 119), где опять говорится, что грунт в тепляках начинает «подтаивать, пучиться и плыть». Вот эта способность пучиться при замерзании и при оттаивании, приписываемая Евдокимовым-Рокотовским влажным грунтам (34, стр. 57), является, например, совершенно нерасшифрованной. Тем не менее при рассмотрении деформаций и аварий жел.-дор. искусственных сооружений придется с осторожностью пользоваться некоторыми приводимыми Евдокимовым-Рокотовским примерами, так как аналогичных материалов у других авторов, к сожалению, нет.

И 8-й сборник Института реконструкции пути (13) и книга Евдокимова-Рокотовского (34) вышли в 1931 г. С тех пор в деле изучения деформаций сооружений в районах распространения вечной мерзлоты, повидимому, не произошло ничего существенного. Так, в книге Морозова, вышедшей в 1938 г. и специально посвященной проектированию и сооружению мостов в условиях вечной мерзлоты, мы не находим ни одного нового примера.

Сковородинская мерзлотная станция, к сожалению, не в силах была поставить самостоятельное исследование в этой области; попытки же найти в делах железных дорог хоть какой-нибудь материал по деформациям сооружений под влиянием факторов, связанных с наличием вечной мерзлоты, не увенчались успехом. В связи с этим при рассмотрении деформаций искусственных сооружений приходится пользоваться старыми материалами.

Если ограничиться рассмотрением лишь тех деформаций и аварий, которые связаны с наличием вечной мерзлоты, то должны будем сказать, что из всех рассматриваемых нами здесь видов сооружений наименее деформируются земляные сооружения (особенно насыпи), значительно больше — искусственные сооружения (мосты и трубы) и, наконец, более всего — различные виды жилого, промышленного и производственного строительства.

§ 32. Деформации железнодорожного полотна

Что касается жел.-дор. полотна, то Бобков говорит (64, стр. 19): «Не меньшее значение имеют деформации жел.-дор. полотна при выемках и насыпях в условиях вечной мерзлоты. Выемки в скальных породах при наступлении морозов начинают заплывать льдом вследствие просачивания грунтовых вод через их откосы; последние растрескиваются и осыпаются, а в глинянных грунтах пучатся и обваливаются. В выемках, сложенных проницаемыми грунтами, например глинисто-щебенистым или песчаным материалом, получаются сплавы откосов при наступлении летних месяцев. В насыпях происходит расползание их вследствие поднятия границы вечной мерзлоты, которая часто захватывает их подошву, образуя вал и расширяя насыпь, как видно на рисунке».

Фиг. 154. Деформации и трещины в насыпи при поднятии вечной мерзлоты по Бобкову

Упомянутый в приведенной цитате рисунок воспроизведен нами на фиг. 154. Аналогичный рисунок и аналогичное объяснение мы имеем и в книге Цыбульского (65, ч. II, стр. 203).

Опыт строительства жел.-дор. путей в Сибири и на Дальнем Востоке смягчает мрачную картину, нарисованную Бобковым. Конечно, описанные им деформации жел.-дор. полотна бывают и в районах вечной

мерзлоты, но они (за исключением лишь поднятия вечной мерзлоты в теле насыпи) бывают и на дорогах, где вечной мерзлоты нет, и объясняются не наличием вечной мерзлоты как таковой, а совершенно другими обстоятельствами. Таким образом, в деформациях, на которые указывает Бобков, мерзлота имеет лишь косвенное значение.

Так, сползание откосов выемок нередко зависит от переувлажненности грунтов, которая действительно весьма часто наблюдается в районах распространения вечной мерзлоты, но такое же сползание наблюдается при влажных грунтах и там, где никакой вечной мерзлоты нет.

Описанные Бобковым явления вовсе не являются правилом. Не всегда скальные выемки заплывают льдом, так же как не всегда получаются и сплывы при наличии вечной мерзлоты.

Что же касается расползания насыпи от поднятия в ней вечной мерзлоты, то о такого рода деформациях заявлений от строителей не поступало. В илистых грунтах они возможны, но вряд ли значительны, поэтому приходится лишь принять к сведению указания Бобкова и Цыбульского, отметив, что если такие деформации и существуют, то для каждой насыпи они могут иметь место только раз за все время ее существования, а именно в период поднятия слоя вечной мерзлоты в теле насыпи.

Есть еще один вид деформаций, наблюдаемый исключительно в районах вечной мерзлоты. Дело в том, что в районах вечной мерзлоты в грунтах встречаются включения льда, называемые иногда линзами, хотя по очертанию они на линзы совершенно не походят. Эти включения лежат, конечно, ниже глубины летнего протаивания. Глубина их залегания, величина и мощность весьма различны. Мощность их колеблется от 10 *см* и доходит до 15 — 20 *м*, а протяжение, начиная с 1 *м*, доходит до сотен метров. Если над такими включениями льда устраивается выемка или закладывается иногда даже неглубокий резерв, то вследствие оттаивания этого льда полотно выемки или дно резерва проваливается и получаются провальные озера, иногда целая цепь таких озер.

§ 33. Деформации искусственных сооружений

Что касается деформаций искусственных сооружений (мостов и труб), то они описаны в сборнике № 8 (13, стр. 62 — 100), у Белокрылова (13, стр. 27 — 35), у Сумгина (1, гл. VI), Евдокимова-Рокотовского (34) и др.; поэтому здесь мы приводим для иллюстрации лишь некоторые примеры.

М о с т ы. В сборнике № 8 имеется указание на то, что на западной части Амурской ж. д. через 2 года после постройки 30% деревянных мостов потребовали исправления вследствие относительного перемещения ответственных частей сооружений более чем на 6,5 *см* по высоте.

«Деформация деревянных мостов характеризуется тем, — говорится там, — что зимой отдельные опоры, обыкновенно средние, вы-

пирает из грунта и поднимает кверху. Это выпирание сопровождается изломом схватов и расстройством всех врубок моста. Так как летом осадка выпученных опор совершается не полностью, то деформация нарастает с каждым годом».

В этом явлении выпирания свай мы видим повторение того процесса, который рассмотрен в главе III при изучении пучения столбов, заделанных в землю на разную глубину.

К сожалению, при описании деформаций мостов авторы не указывают, на какой глубине находилась верхняя граница вечной мерзлоты. Не говорится и о том, как забивались сваи. Если их забивали без помощи паровой иглы, то это наводит на подозрение, что никакой вечной мерзлоты под этими мостами и не было или что она лежала настолько глубоко, что сваи ее не касались, так как забить сваи в вечную мерзлоту без предварительного оттаивания невозможно. Таким образом, в этих случаях мы имеем дело с более или менее глубоким промерзанием, а не с вечной мерзлотой.

Вот одно описание деформаций деревянного моста из сборника № 8 (13, стр. 67), которые совершенно случайно связаны с вечной мерзлотой. Это описание ясно показывает, что вечная мерзлота никакой роли в деформациях моста не играла и что в данном случае надо было решать вопрос не о том, как строить на вечной мерзлоте, а о том, как строить в случае отсутствия вечной мерзлоты, когда имеется более или менее глубокое промерзание, связанное с пучением: «Мост этот балочной системы с пролетами по 2 *м*, общей длиной 42,68 *м*. Опоры свайные, и глубина забивки свай равна 8 — 9 *м*. Сваи нарощены на глубине около 3 *м*. Ручей, через который построен этот мост, не промерзает, и средние опоры, находящиеся в воде, не пучит. Наибольшему пучению подвергаются опоры между ручьем и конусами. Пучение начинается между 10 — 15 декабря и достигает своего максимума в конце февраля». Далее говорится:

«Шурфовкой в промежутке с 10 по 24 марта установлена глубина промерзания болотистого грунта на 3,4 *м*. При откопке подкосной сваи оказалось, что свая разорвана на месте сращивания».

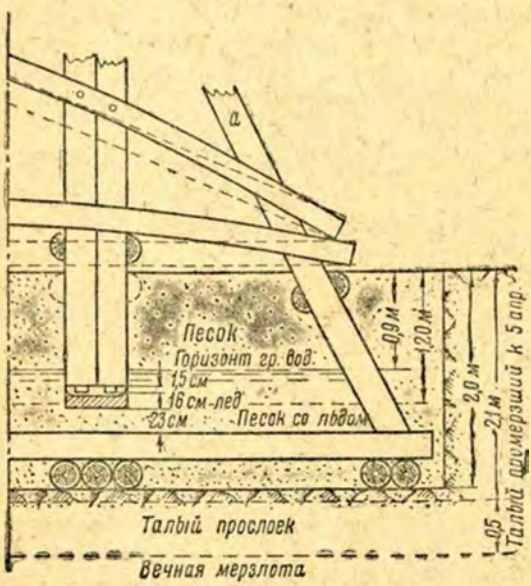
Из описания ясно, что вечная мерзлота во всех этих явлениях роли не играла. Но если допустить, что вечная мерзлота существовала и притом так, что ее верхняя граница находилась на 2 — 3 *м* от поверхности, то легко было бы устроить мост, который бы не пучило. Опыт строительства вторых путей на Дальнем Востоке такое предположение о возможности устройства на вечной мерзлоте недеформирующихся деревянных мостов, как мы увидим далее, полностью подтверждает. Наличие вечной мерзлоты далеко не всегда является в строительстве отрицательным фактором, удорожающим или усложняющим строительство.

Здесь мы отметим, что разрыв нарощенных свай отмечается многими авторами и строителями. Этот разрыв всегда происходит на стыке, являющемся ослабленным местом, но не известно случая, чтобы при пучении разорвало сваю в целом месте.

Возьмем из сборника № 8 еще один пример деформации деревян-

ного моста на лежневых опорах. Фиг. 155, взятая из упомянутого сборника, представляет деформированную часть этого моста. Описание деформации этого моста приводится там в такой форме:

«Остаточная пучина с 1913 по 1927 г. у этого моста достигла 0,23 *м*, вследствие чего мост подрезался. В 1926 г. пучение началось с 15 декабря и в течение зимы достигло 0,16 *м*. Одна из опор была отрыта». Выяснилось, что «грунт на 5 апреля 1927 г. оказался промерзшим на глубину 2,1 *м*, далее следовал талый грунт слоем 0,5 *м*, а глубже опять мерзлый грунт на всю глубину обследования, т. е. на 8,6 *м* от поверхности земли. Грунтовая вода в талом слое никакого напора не имела. Талый прослоек находился под лежнем. Стойки оказались оторванными от лежня и приподнятыми на высоту 0,39 *м*. Пространство между торцом и лежнем оказалось на высоту 0,23 *м* заполненным чистым, промытым песком, над песком находилась пробка из чистого льда толщиной 0,16 *м* с вогнутой верхней поверхностью, а между льдом и торцом стоек оказалось еще свободное пространство, равное 0,015 *м*, поперечные схватки оказались изогнутыми ввиду большого сопротивления выдергиванию укосины *а*.



Фиг. 155

В этом случае вечная мерзлота в деформациях моста не играла никакой роли. Но наличие ее, очевидно, повлияло на выбор конструкции. Строители решили не заглубляться в вечную мерзлоту, а основать мост в деятельном слое, засыпав низ рамных опор песком, который трактовался тогда как грунт непучащий. Ошибочность этих концепций и демонстрируют описанные деформации.

Опоры каменных мостов в случае деформации пучит, как одно целое, либо их разрывает либо они перемещаются в сторону от своего первоначального положения.

В том же сборнике № 8 (13, стр. 63) находим следующее описание:

«Железный мост отверстием 2 × 21,30 *м*. Бычок этого моста, заложенный в марте 1909 г., основан на скальном основании. От обреза фундамента бычка до скалы 4 *м*. В первый же год бычок выпучило и наклонило в сторону. В 1931 г. бычок был разобран до основания, котлован углублен на 0,4 *м* с разборкой разрушенного слоя скалы, а обнаруженные на дне котлована ключи были заглушены цементом.

Фундамент возведенного вновь бычка был засыпан почти от подошвы до обреза крупным камнем, и, несмотря на это, пучение продолжалось. В 1916 г. часть тела бычка провалилась на значительную глубину, сохранив наружную облицовку, причем трещины значительно увеличились».

Провал внутренней части тела бычка, — говорится в заключении, — при сохранившейся облицовке мог произойти лишь при наличии пустоты под подошвой бычка, облицовка же поддерживалась примерзшим к окружающему грунту боковым поверхностным слоем фундамента.

К сожалению, и это наблюдение, как и многие другие, не имеет исчерпывающих данных. Мы не знаем ни рельефа местности ни геологического разреза; не имеем температурных наблюдений; не знаем, как же, наконец, железная дорога и строители вышли из этого положения: удалось ли им устроить незыблемый бычок или нет.

Повидимому, и в этом случае вечная мерзлота не играла никакой роли, как на это указывают обнаруженные на дне котлована ключи, а также факт возможности их заглушения цементом.

Отметим лишь, что этот пример поучителен еще в следующих отношениях: во-первых, он показывает, что скала далеко не всегда является надежным основанием, а во-вторых, что засыпка даже крупным камнем не предохраняет от пучения, что подтверждает сказанное в главе III.

Очень любопытный факт пучения каменного бычка у двухпролетного моста 2 × 10,67 *м* на 632 *км* бывш. Забайкальской ж. д. приводит Евдокимов-Рокотовский (34, стр. 129 — 130). За 15 лет бычок выпучило, повидимому, совершенно равномерно и без каких-либо повреждений на 1,28 *м*. Глубина его заложения уменьшилась с 2,40 *м* до (2,40 — 1,28) = 1,12 *м*. Такое пучение вызвало срезывание бычка в 1925 г. на 52 *см* и 1928 г. на 23 *см*.

Если принять во внимание имеющееся указание Евдокимова-Рокотовского, что глубина летнего оттаивания почвы лежит в пределах 1,6 — 1,7 *м*, то в 1928 г. подошва основания бычка была выше верхнего горизонта вечной мерзлоты минимум на 48 *см*. Нужно только пожалеть, что столь удивительное явление, аккуратно повторяющееся из года в год в продолжение свыше 15 лет, осталось почти совершенно неисследованным.

Третий вид деформаций каменных бычков мы находим в том же сборнике № 8 (13, стр. 66), где описывается деформация среднего бычка четырехпролетного моста 4 × 6,39 *м*. Бычок заложен на разборной скале с дресвой на глубину 4,79 *м* от поверхности земли и 4,26 *м* от обреза фундамента.

«Водоотлива при копке котлована не было. Ввиду пучения и появления трещин зимой 1926/27 г. фундамент был обнажен на глубину 3,55 *м* от обреза фундамента».

В нижней трети никаких трещин не было; в верхней трети кроме вертикальных трещин был обнаружен и ряд горизонтальных. Наи-

более широкая из последних была обнаружена на глубине 1,32 *м* от обреза фундамента, или на 1,85 *м* от земной поверхности.

Здесь, как видим, пучение разорвало бычок, откуда следует сделать заключение о необходимости считаться с растягивающими силами в фундаментах зданий, быков и т. п.

В отношении деформаций жел.-дор. труб (13, стр. 100) отмечается лишь то, что арочные перекрытия и коробовые своды труб на раздельных фундаментах весьма часто дают трещины, из чего автор делает следующее заключение: в пучинистых местах балочные перекрытия следует предпочитать арочным, а каменные коробовые трубы следует устраивать на сплошных фундаментах или железобетонных плитах.

Автору этих строк тоже неоднократно приходилось видеть и трещины (главным образом у ключа свода) и просадки отдельных звеньев труб. Однако оснований для того, чтобы приписать эти деформации наличию вечной мерзлоты, у него не было, хотя бы из-за отсутствия исчерпывающих исследований.

Аналогичные трещины и просадки приходилось наблюдать и в других местах, где вечной мерзлоты не было. Следует, пожалуй, лишь отметить, что оголовки и крылья труб в областях распространения вечной мерзлоты страдают более, чем там, где ее нет; но и здесь вопрос о том, являются ли причинами вечная мерзлота или суровость климата и глубокое промерзание, остается пока открытым.

Специфическим явлением, связанным действительно с вечной мерзлотой, можно, пожалуй, назвать лишь то, когда воды, которые должны отводиться трубой, при благоприятных для этого условиях иногда прокладывают себе путь под трубой. Это бывает, например, тогда, когда текущая по трубе вода отогревает лежащие ниже вечно мерзлые водопроницаемые грунты, вследствие чего последние начинают пропускать воду сначала немного, а потом все более.

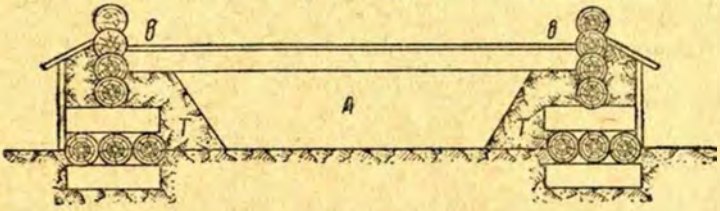
Из обзора перечисленных выше деформаций искусственных сооружений мы видим, что в них далеко не всегда виновата вечная мерзлота, что изучение этого вопроса поставлено слабо и что у нас до сих пор нет твердо установленных принципов относительно того, как надо строить не только в условиях вечной мерзлоты, но и в условиях глубокого промерзания.

§ 34. Деформации производственных и жилых зданий

Перейдем теперь к рассмотрению деформаций производственных и жилых зданий, а также холодных служб. Последние обыкновенно сооружаются либо на лежнях либо на неглубоко зарытых стульях. Те, которые устраиваются на лежнях, в период пучения поднимаются пучащим грунтом, а при оттаивании последнего садятся. Деформации здесь не нарастают или почти не нарастают с течением времени, и если эти деформации и некоторые перекосы являются допустимыми, то такие фундаменты являются наиболее дешевыми. Хуже обстоит дело там, где эти здания устроены на заглубленных в землю стульях. Очень

большое заглубление, которое могло бы их сделать неподвижными, сравнительно очень дорого и потому не делается; небольшое же заглубление в землю (в сковородинских условиях, например, до 2 — 3 *м* включительно) делу не помогает; такие фундаменты выпучивает из земли с каждым годом все больше и больше, причем они теряют свою устойчивость. Деформации, как видим, при этом нарастают и часто нарастают неравномерно, отчего получаются значительные перекосы. Такой характер пучения относится преимущественно к легким, холодным службам.

Иной характер деформаций наблюдается в деревянных жилых зданиях. Выше в главе IV мы уже описали деформации жилого дома *Б* на Сковородинской мерзлотной станции. Там мы наблюдали некоторое ненарастающее пучение, что, конечно, обусловлено конструкцией фундаментов в виде городков, установленных непосредственно на поверхности земли. Надо отметить, что в этом случае мы имели еще шлаковую засыпку всего подполья. Обыкновенно жилые деревянные дома даже значительных размеров принято устраивать на городках,

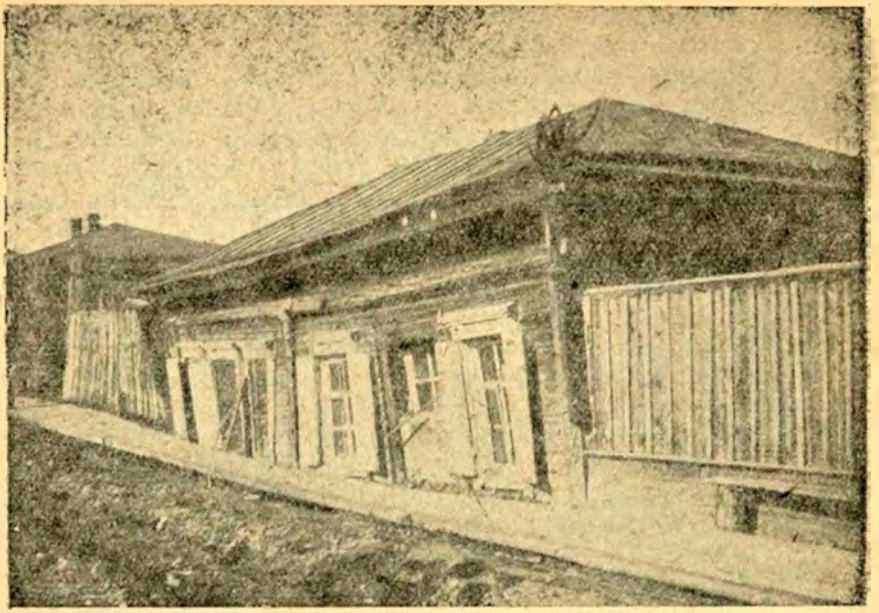


Фиг. 156. Тип фундамента на городках

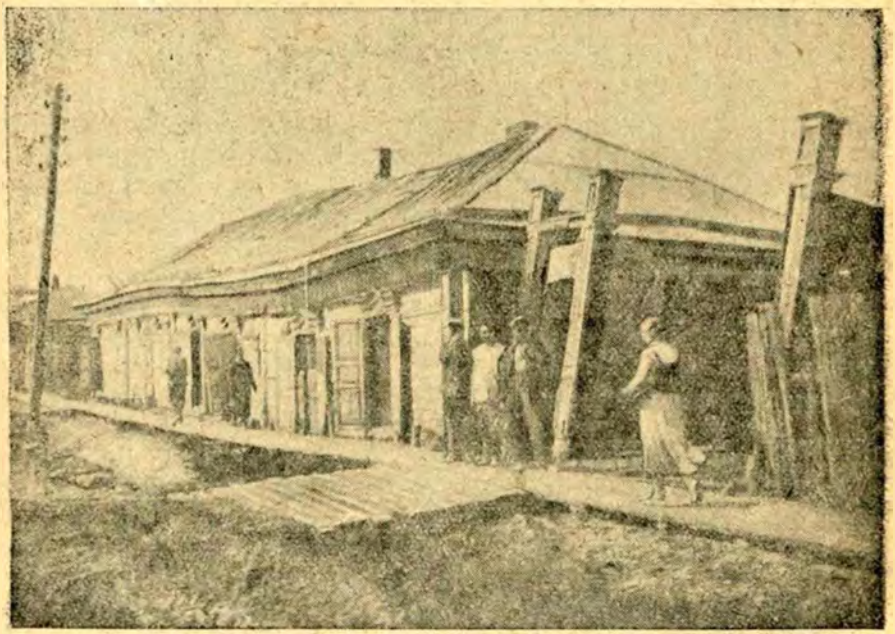
установленных или непосредственно на земле по снятии растительного покрова или с небольшим углублением, не доходящим до 1 *м*.

В целях получения теплых полов пространство между отдельными городками и самые городки засыпаются плотно утрамбованной землей, как это показано на фиг. 156. Таким образом получается непроницаемое для наружного воздуха подполье, которое может сообщаться с наружным воздухом лишь через устраиваемые в цоколе отдушины. Эти отдушины для сохранения теплоты пола плотно закрываются зимой и иногда открываются летом. Громадное большинство таких домов деформируется, причем основной деформацией является не пучение, а постепенное, все нарастающее погружение в грунт, что и понятно, если мы вспомним погружение в грунт центральных столбов установки $Б_3$ (см. главу III). Это погружение, как видно из анализа деформаций установки $Б_3$, происходит главным образом весной, когда грунт оттаивает. Пример такой деформации показан на фиг. 157 и 158, где приведены фотографии домов, из которых один настолько ушел вглубь, что для открытия ставен приходится отрывать возле окон землю.

Фундаменты этих домов заложены в деятельном слое, который при оттаивании не выдерживает почти никакой нагрузки. График подоб-

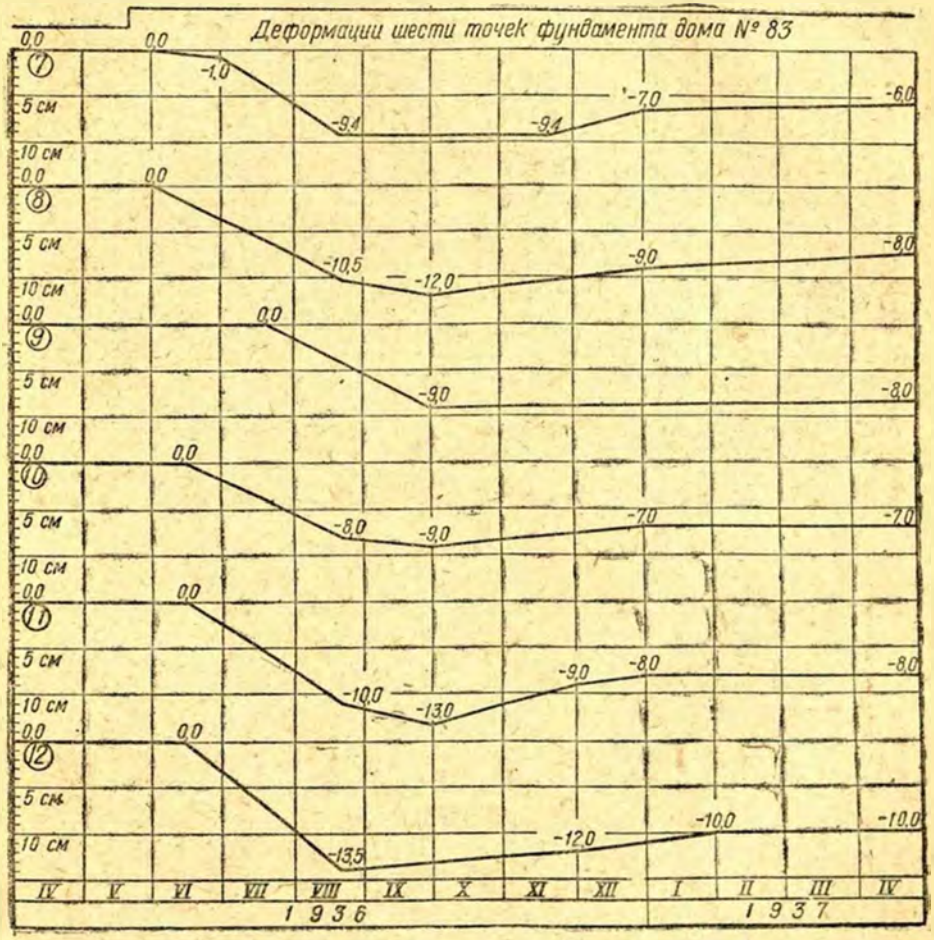


Фиг. 157. Деформированный дом



Фиг. 158. Деформированный дом

ных деформаций дается на фиг. 159. На этом графике даны вертикальные смещения шести точек фундамента дома, законченного строительством в июле 1935 г. Общий вид этого дома показан на фиг. 160, а план с указанием точек, перемещения которых наблюдались, — на фиг. 161.



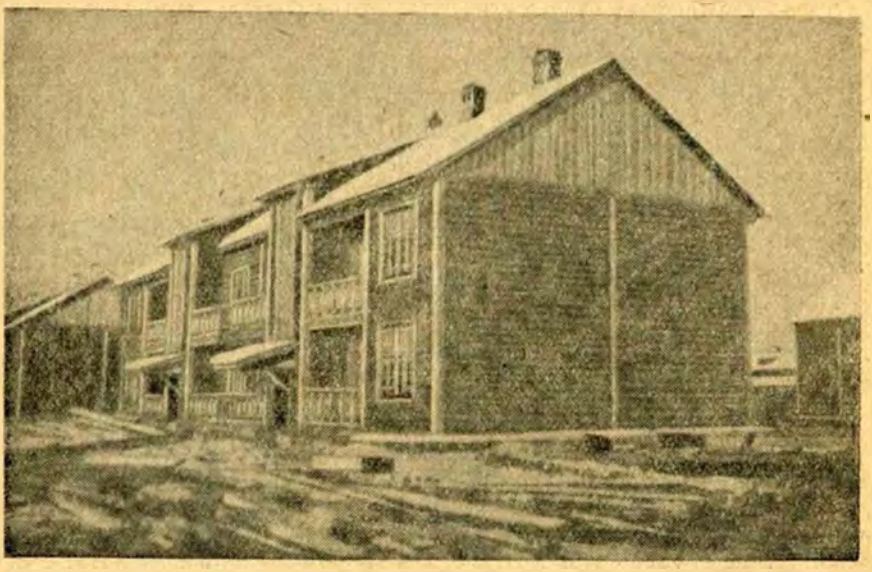
Фиг. 159

Положение дома в начале апреля 1936 г. принято за исходное. Перемещения относительно этого исходного положения и нанесены на графиках, причем на последних показаны только наиболее характерные точки.

Из этих графиков мы видим, что дом, построенный на городках, деформируется неравномерно и что погружение в грунт превышает пучение. Для этого дома, как и для опытного дома *Б*, описанного выше,

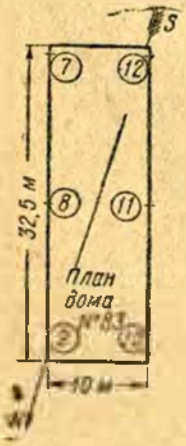
наибольшая просадка имеется у южной точки, что указывает на влияние инсоляции.

Ранее построенные на городках двухэтажные деревянные дома несколько больших размеров, чем только что рассмотренный, имеют



Фиг. 160. Вид дома № 83

в большинстве случаев сильную и неравномерную просадку. Штукатурка в этих домах не держится, а печи разваливаются.

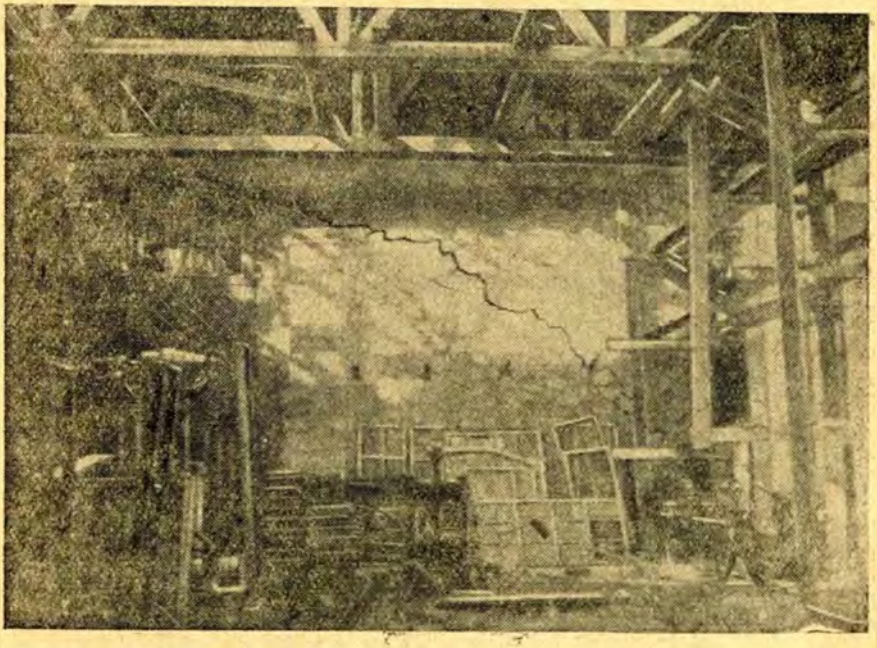


Фиг. 161

В каменных домах, построенных на ленточных фундаментах (сплошных) или в виде отдельных столбов, приходится опасаться других явлений. При сплошных фундаментах можно опасаться протаивания вечной мерзлоты под более теплопроводными фундаментами, результатом чего является осадка здания. При фундаментах же в виде отдельных столбов при холодном подполье протаивания можно (при надлежащем устройстве этого фундамента) не опасаться, но зато приходится опасаться пучения, которое может выдергивать или разрывать эти фундаменты и разрушать здание. Пучение может происходить и при сплошных фундаментах.

Деформации промышленных и фабричных зданий, в особенности горячих цехов, отличаются от только что описанных деформаций жилых зданий только масштабом, а не по существу. Так, деформации и разрушения стен зданий Читинских мастерских происходили исключительно от протаивания грунта под теплопроводными каменными фундаментами.

На фиг. 162 представлена каменная стена депо с образовавшейся на ней трещиной вследствие протаивания вечной мерзлоты под фундаментом. Эта стена была подостлана пакетом рельсов, втопленных в бетон, и покоилась на каменном фундаменте, заглубленном в землю на 4 *м*; столь большое заглубление не помешало теплу проникнуть под подошву фундамента. В приведенном случае надо иметь в виду то, что по другую сторону этой стены стояло два кузнечных горна, расположенных непосредственно у самой стены, все время ее обогревая. Грунт под этой стеной состоял из пылеватого суглинка, насыщенного влагой до полной влагоемкости.



Фиг. 162

Несколько особого рода деформации и осложнения в строительстве могут производить наледные явления. Из гидрогеологии вечной мерзлоты мы знаем, что грунтовые воды могут быть и подмерзлотными, и межмерзлотными, и надмерзлотными, и, наконец, поверхностными. Мы более подробно рассмотрим здесь лишь связь строительства с последними двумя видами вод.

Как мы уже знаем, надмерзлотные подземные воды могут, прорываясь наружу, давать наледи, а не прорываясь, — заполнять внутри грунта целые полости, приподнимая вышележащие слои и образуя этим самым так называемые наледные бугры. Эти полости, заполненные водой, могут образовываться в разных горизонтах, скопляясь непосредственно над вечной мерзлотой, под растительным покровом или на какой-либо другой глубине.

Подземные течения грунтовых вод выбирают для своего движения области наименьшего сопротивления, почему часто бывает, что эти воды прорываются в утепленных местах, иногда в подпольях домов. Приведенная выше фотография (фиг. 3) дает представление о результатах прорыва сквозь подполье дома.

Вопрос о том, сохраняют ли подземные течения из года в год одно и то же направление, пока остается открытым. Однако можно предполагать, что наледи и наледные подземные бугры, возникая в разных местах, все же появляются во вполне определенных районах.

Таким образом, причинами описанных выше деформаций являются: пучение грунта, связанное с приподниманием сооружения или с выдергиванием и разрывом его фундаментов; протаивание мерзлых грунтов под более теплопроводящими фундаментами, чем окружающий грунт, что вызывает погружение фундаментов здания в оттаивающие области деятельног или вечно мерзлого слоя; наконец, явления подземных или надземных наледей, заливающих строения, а при взрывах производящих разрушение их.

Для предупреждения деформаций строителю кроме знания принципов возведения сооружений в районах вечной мерзлоты надо знать те реальные условия, в которых приходится возводить данное сооружение; знание же реальных условий связано с производством изысканий.

§ 35. Изыскания для промышленно-фабричного и поселкового строительства

Характер и объем изысканий зависят от вида и характера строительства. Начнем с изысканий строительных площадок для фабричного и поселкового строительства.

Наряду с изысканиями, которые необходимы для учета условий, создаваемых вечной мерзлотой, мы коснемся и тех изысканий, которые необходимы для выполнения вообще всякого строительства и без которых специфические мерзлотные изыскания были бы неполными. План в горизонталях безусловно необходим для получения ясной картины режима вечной мерзлоты, хотя этот план необходим и при всяких условиях, когда вечной мерзлоты не наблюдается. Мерзлотные изыскания и исследования можно разделить на рекогносцировочные, предварительные и окончательные.

Рекогносцировочные изыскания

Рекогносцировочные изыскания и исследования производятся тогда, когда строительная площадка не фиксирована и когда является возможным выбрать эту площадку из нескольких предварительно намеченных в зависимости от местных условий и вопросов водоснабжения.

Рекогносцировочные изыскания, как правило, следует начинать весной до вскрытия рек. В это время наледи еще не начинают таять и наледные бугры сохраняют свои размеры.

Путем непосредственного осмотра и наблюдений выясняются места наледей, наледных бугров и провалов. Путем опроса местных жителей (если нет данных постоянных наблюдений) желательно установить постоянство и повторяемость этих явлений: каждый ли год и в тех ли самых местах появляются наледи и бугры, когда наблюдается и как протекает их рост, размеры их.

Попутно необходимо осмотреть заболоченные места — мари, — а также места, покрытые торфом и мхом, так как осушение марей и снятие мохового покрова при строительстве неизбежно отразятся на режиме вечной мерзлоты, и это должно быть при проектировании и строительстве учтено. Путем опросов, а также непосредственным наблюдением необходимо установить наивысший горизонт вод во время паводков, промерзаемость зимой рек и озер, время наибольшего выпадения осадков и, если можно, толщину снежного покрова как в снежные, так и в малоснежные зимы. Малоснежность укажет нам на возможность глубокого промерзания, а промерзаемость рек — на возможность подземных течений, связанных часто с более или менее глубоким протаиванием, а также с появлением наледей.

Показания местных жителей, собранные в возможно большем количестве, протоколируются и сравниваются в целях получения наиболее вероятных данных. В случае существования вблизи обследуемых площадок метеорологических станций эти данные должны быть, конечно, учтены, но притом с большой осторожностью, так как и климатические, и гидрологические, и мерзлотные условия иногда сильно меняются на сравнительно небольшом протяжении в зависимости от высоты местности, состава грунтов и т. д.

От метеорологических станций желательно получить данные о температуре воздуха, о количестве осадков и распределении их во времени, о мощности и длительности снегового покрова, о ливнях, о господствующих ветрах и их силе, о режиме находящихся в этом районе рек и о термическом режиме грунтов в связи с их гранулометрическим составом и влажностью.

Необходимы также сведения о растительности на рассматриваемых площадках. Наличие хорошей сосны и ели часто указывает на отсутствие вечной мерзлоты или ее глубокое залегание, в то время как лиственница и береза, в особенности угнетенная и низкорослая, свидетельствуют чаще всего о наличии вечной мерзлоты и о незначительном деятельном слое.

На основании рекогносцировочных изысканий намечают несколько равноценных по этим внешним признакам площадок. Чрезвычайно полезной является при этом глазомерная съемка, соединенная хотя бы с грубой барометрической нивелировкой. На плане этой съемки нужно показать, хотя бы грубо, рельеф, расположение наледей, распространение болот и т. п.

В первую очередь намеченные участки оцениваются с точки зрения возможности достаточного водоснабжения, изыскания которого начинаются одновременно или даже раньше рекогносцировочных изысканий площадок, причем следует заметить, что территориально

строительная площадка и источник водоснабжения могут и не совпадать. Забота о водоснабжении является одной из главнейших. В самом деле, ни фабрично-заводское предприятие, ни жилищное строительство немыслимы без обеспечения их достаточным количеством воды, а между тем районы распространения вечной мерзлоты в отношении нахождения источников водоснабжения являются наиболее трудными.

Ориентировочно намечаются возможная линия водоснабжения и ее профиль.

Должно быть обращено внимание на возможность устройства канализации и удаления фабричных отходов, если последние предвидятся.

Если место строительства будет, по особым соображениям, заранее предопределено, то предварительные рекогносцировочные изыскания отпадают и сразу приступают к окончательному изысканию.

При прочих равных условиях предпочтение отдается сухим площадкам, совершенно не заливаемым высокими водами, где отсутствуют наледи и бугры пучения и провалы, незаболоченным, по возможности с небольшим или маломощным моховым покровом, удаленным от подножия гор, оврагов и обрывов. Преимущества такого вида площадок очевидны, за исключением, пожалуй, пожелания, чтобы эти площадки не лежали у подножья гор и сопок. Площадки, находящиеся у подножья гор, как показывают наблюдения многих исследователей, часто изобилуют наледями, буграми пучения, включениями льда, что делает их малопригодными для экономного строительства. Однако такие места не следует смешивать с пологими склонами гор, где этих явлений не наблюдается и которые являются иногда наиболее подходящими местами в строительном отношении.

Предварительные изыскания

Предварительные изыскания и исследования, следующие за рекогносцировочными, имеют целью из всех намеченных площадок выбрать наиболее подходящую. Эти изыскания производятся в течение весны, лета и начала осени. При этих изысканиях требуется получить следующие материалы: планы в горизонталях выбранных площадок с горизонталями, проведенными не реже чем через 2 *м*. Съемкой должна быть охвачена не только территория, намеченная непосредственно под строительство, но и окружающая эту территорию местность (в особенности в случае наличия вблизи резких изменений рельефа: гор, оврагов, обрывов, ручьев, озер и т. п.), так чтобы можно было иметь ясную картину как стока поверхностных вод, так и возможности их отвода; это важно как в целях учета чисто мерзлотных условий, так и в целях выяснения возможности устройства канализации и удаления отходов, о чем говорилось выше.

На планах должно быть показано возможное направление водопровода, связывающего данную площадку с намеченными источниками водоснабжения, а также должен быть дан профиль земной поверхности по этому направлению.

На планах в горизонталях должна быть дана характеристика покрова (лес, кустарник, поле, болото, луг и т. д.). В описании, сопутствующем этому плану, следует перечислить преобладающие породы деревьев и указать их качество. Кроме того, должны быть подробно описаны характер травянистого покрова, а также характер и мощность моховых и торфяных покровов.

Одновременно на этих же площадках исследуются грунты: их напластование, гранулометрический состав, влажность, глубина залегания в них грунтовых вод и их напор, а также глубина залегания мерзлых грунтов, но, вообще говоря, не вечной мерзлоты, так как изыскания могут производиться до времени максимального протаивания, которое обыкновенно наступает поздней осенью.

Исследование грунтов производится при помощи бурения, шурфования и последующего лабораторного анализа взятых при этом образцов. Образцы желательно брать не реже чем через 0,5 *м* по глубине выработки. В лаборатории определяются влажность и гранулометрический состав (например, по Рутковскому, так как более подробный анализ при изыскании вряд ли необходим). Буровые скважины распределяются по площадке по возможности равномерно, на расстоянии до 150 *м* одна от другой. Бурение скважин, кроме того, производится еще в местах перелома рельефа по ручьям и оврагам, а также у водоемов с целью определения возможной связи между этими факторами и строением грунтов, их влажностью и глубиной залегания мерзлоты.

Скважины бурятся на глубину 5 *м*. Если на этом пути встречается скала, то бурение заканчивается у скалы. Однако, как показывает практика, валуны часто принимаются за скалу. Для избежания подобного рода ошибок следует устраивать шурфы, число которых, вообще говоря, должно быть не меньше 20% от числа скважин. Эти шурфы делаются в целях контроля и уточнения данных бурения.

Несколько буровых скважин, но не менее пяти на квадратный километр (конечно, если не помешает скала), бурят до глубины 20 *м* для выяснения напластований грунтов, характера мерзлоты (сплошная или слоистая), а также для выяснения, не лежит ли нижняя граница вечной мерзлоты в этих пределах. При бурении скважин ведется соответствующий журнал. Скважины нумеруются и наносятся на планы; устья скважин связываются нивелировкой.

Буровыми скважинами пользуются также для наблюдений над температурой грунтов при помощи почвенных термометров. Наблюдения над температурой грунтов при предварительных изысканиях можно ограничить определением одновременных температур в пятнадцати-двадцати скважинах, расположенных в районах различных внешних условий (растительность, рельеф местности и пр.). Температуры определяются на глубине 1,6; 2,5; 5; 10 и 20 *м*.

Измерения на глубине 10 и 20 *м* ведутся в скважинах глубиной 20 *м*. Измерение на этих глубинах можно ограничить тремя-четырьмя скважинами, если показания температур в этих скважинах не будут резко различаться. При резких колебаниях, превышающих, напри-

мер, 1° или обнаруживающих талое состояние грунта наряду с мерзлым в какой-нибудь другой скважине, необходимо исследовать это обстоятельство подробнее.

Измерение температур производится раз в декаду и ведется по возможности продолжительнее. Что касается наблюдений на глубине 10 и 20 *м*, то наблюдения эти достаточно производить раз в месяц.

Если на выбираемых площадках или в районе этих площадок имеются какие-либо сооружения, то их режим должен быть тщательно исследован. Это исследование касается как деформированных, так и и недеформированных сооружений: фиксируются их положение, рельеф местности, на которой они находятся, внешние условия; выясняются системы фундаментов, глубина их заложения; исследуются грунты, горизонт грунтовых вод, влажность грунтов, их гранулометрический состав, горизонт оттаивания, а если возможно, то и вечной мерзлоты.

Горизонты оттаивания желательно отмечать в течение всего времени производства предварительных изысканий (раз или два раза в месяц). Горизонт оттаивания определяется прощупыванием в расстояниях 1; 3; 5 и 10 *м* от здания как с южной, так и с северной сторон, причем прощупывание должно быть произведено в один день. По этим данным вычерчиваются профили оттаивания.

Еще лучше описанные исследования вести со всех четырех сторон здания; очень желательно определить протаивание и под самым зданием, под его полом. В этом случае необходимо описать и конструкцию пола.

На основании произведенных предварительных изысканий, объем которых только что описан, можно выбрать подходящую площадку. В процессе выбора следует постоянно иметь в виду те сравнительно немногочисленные принципы строительства на вечной мерзлоте, нарушение которых неизменно ведет либо к авариям либо к постоянным деформациям, требующим постоянного ремонта.

Здания, являющиеся постоянными источниками значительных количеств тепла (вроде доменных печей, мартеновских цехов и т. п.), конечно, выгоднее всего строить на таких грунтах, переход которых из мерзлого состояния в талое и обратно не отражается на устойчивости фундаментов. К таким грунтам относятся плотная и даже трещиноватая скала, если только в трещинах нет воды и льда, а также гравий и крупный песок, хотя бы и увлажненные до полной влагоемкости, если их слой является достаточно мощным.

Но это вовсе не значит, что доменных печей и горячих цехов нельзя строить на мерзлых грунтах другого рода, сконструировав фундаменты так, что мерзлота и в период строительства и во время функционирования этих зданий сохранится на неопределенное время и будет служить хорошим основанием. При сохранении под зданием вечной мерзлоты могут быть два случая: первый, когда над вечной мерзлотой нет пучащего деятельного слоя, и второй, когда такой слой имеется. Отсутствие пучащего слоя может быть создано искусственно или существует в силу естественных условий. В обоих случаях это соответ-

ствует дренируемым и мало увлажненным грунтам. При этом фундамент основывается на вечной мерзлоте, и рассчитывать его на растягивающие усилия не приходится, так как там, где нет пучения, не могут развиться и выдергивающие фундамент усилия.

Если же над вечной мерзлотой имеется пучащий грунт деятельного слоя (что встречается чаще), то приходится предусматривать не только то, что фундамент будет работать на растяжение (как это установлено в главе III), но и то, что его необходимо заякорить, заделать в вечной мерзлоте, что позволило бы ему остаться на месте и не быть выдернутым силами пучащего грунта.

Конечно, во всех случаях, когда мы заинтересованы в сохранении вечной мерзлоты, не нужно забывать, что температурный режим вверху нашего фундамента должен быть таким, чтобы тепло не обратило мерзлый грунт в талый под его подошвой; но это уже дело выбора конструкции.

Наконец, важным условием, является предохранение зданий от наледей, бугров пучения, провалов, возможных при оттаивании погребенных льдов, и т. п.

Вернемся теперь к рассмотрению площадок. Прочная скала, без трещин вообще и без водоносных в особенности, лежащая не очень глубоко, является самым надежным основанием. Водоносные трещины в скале в районах вечной мерзлоты могут совершенно свести на-нет все ее достоинства. То же нужно сказать и о сильной трещиноватости и неоднородности. Что водоносные трещины мешают незыблемости основания, видно из приведенного выше описания бычка, который упорно пучило, несмотря на принимавшиеся строителями меры.

Если трещиноватая скала лежит непосредственно под деятельным слоем, сложенным из пучащих грунтов, или лежит неглубоко под деятельным слоем, или, наконец, если эта скала частично залегает в деятельном слое, то она далеко не всегда может служить надежным основанием. Во всех этих случаях пучащий при замерзании грунт будет иметь стремление приподнять фундамент и находящееся над ним здание, что требует заякоривания фундаментов или надлежащей их загрузки, превышающей силы выдергивания. Надежное же заякоривание в трещиноватой скале, конечно, невозможно, а надлежащая загрузка фундаментов иногда неосуществима.

Участки, совершенно лишенные мерзлоты (талые острова, которые иногда встречаются в районах вечной мерзлоты), тоже далеко не всегда являются лучшими, как это иногда принято считать. Болотистый талый участок с мало устойчивыми грунтами часто является для строительства и менее надежным и менее экономным, чем участок с надежной мерзлотой. То же надо сказать об участках без вечной мерзлоты, но сложенных сильно пучащими грунтами, в особенности в условиях глубокого промерзания; такие условия можно найти, например, в районе Хабаровска.

Вопрос о борьбе с выдергивающими силами пучения и о заякоривании как мере против выдергивания может стоять в этих условиях чрезвычайно остро, давая иногда очень дорогие решения.

Надежными участками с вечной мерзлотой следует признавать такие, где вечная мерзлота имеет значительную мощность (не менее 25 *м* для обычного строительства), значительную постоянную отрицательную температуру на глубине 10 *м* и ниже (т. е. температуру ориентировочно не выше —1,0°), однородный и равномерно протаивающий деятельный слой, где этот слой не превышает 2—3 *м* и где вечная мерзлота сложена из грунтов достаточно, но не чрезмерно увлажненных, точнее говоря, влажность которых близка к их полной влагоемкости.

Очень желательно (и это иногда наблюдается в естественных условиях), чтобы деятельный слой не пучил.

Щебенистые и гравелистые легко дренируемые грунты, в деятельном слое в особенности, должны предпочитаться глинистым и суглинисто-пылеватым.

На площадках с вечной мерзлотой только что описанного характера даже при сильно пучащем деятельном слое, лежащем над этой мерзлотой, нетрудно заложить незыблемые фундаменты при условии сохранения вечной мерзлоты. Для этого необходимо заякорить фундамент в пределах вечной мерзлоты и рассчитать его на возможное растяжение при пучении. О том, как это сделать, будет сказано ниже; здесь же следует лишь сказать, что это возможно, и в подкрепление напомнить о том, что столбы, зарытые в землю на 4,5 *м*, при деятельном слое в 2,5 *м* при пучении не выдергиваются из земли, как об этом подробно сказано в главе III.

Конечно, далеко не все площадки, подостланные вечной мерзлотой, одинаково хороши. Слоистая мерзлота, где мерзлые слои чередуются с талыми, вообще говоря, совершенно непригодна для строительства. Таких площадок следует всемерно избегать; в случае же крайней необходимости производить строительство именно на таком месте необходимы специальные подробные изыскания, которых мы касаться здесь не будем, но которые легко себе представить, если принять во внимание все те принципы строительства, о которых сказано выше.

То же нужно сказать о площадках, изобилующих наледями и буграми пучения, т. е. о площадках, где наблюдаются различного рода грунтовые воды, независимо от того, будут ли они надмерзлотными, межмерзлотными или подмерзлотными. Обилие таких вод, в особенности с напором, ставит под большое сомнение пригодность площадки для строительства. Подробное исследование возможности отвода этих вод (если необходимость заставляет остановиться на подобной площадке), есть одна из главнейших задач окончательных изысканий, о чем подробнее будет сказано ниже. Если в вечной мерзлоте в слое, непосредственно лежащем ниже проектной глубины заложения фундаментов, встречаются включения чистого льда, то такие площадки следует, как правило, браковать. Включения эти, как мы уже говорили, весьма различны по величине и иногда чрезвычайно пестро разбросаны по территории. Их не следует, однако, смешивать с мелкими прослойками льда, тоже почти всегда встречающимися в супесчаных и

суглинистых грунтах, наличие которых при сохранении мерзлоты, повидимому, не причиняет сооружениям никакого вреда.

Однако и более крупные включения льда, если они находятся значительно ниже подошвы фундамента, вряд ли будут вредить прочности сооружения. Весь вопрос здесь в возможности пластичных деформаций льда, на что обращал внимание, например, Эндрюс (Andrews), так как сохранить мерзлое состояние этих включений мы можем. Правда, мы почти никогда не сможем привести эти включения к температуре более низкой, чем та, которую имеет включающий их слой, но сохранить им температуру этого слоя все же можно. Однако эти температуры не настолько низки (для Сковородина от —0,5° до —1,0°), чтобы придать этим включениям желательную твердость, и вот тут-то и возникает еще не разрешенный вопрос о том, насколько можно сжать заключенный в грунте кусок льда, не боясь его пластических деформаций. Вопрос этот пока не разрешен ни теорией ни надлежаще поставленным экспериментом, но по немногим данным из практики есть основания полагать, что при залегании отдельных включений на глубине 4 — 5 *м* ниже подошвы фундамента можно при сохранении мерзлотного режима совершенно не опасаться этих включений, если только здание не является очень большим и грузным.

Ледяные включения в толще вечной мерзлоты, о которых мы здесь говорим, встречаются нередко на Дальнем Востоке; на дальнем же Севере, как можно судить по показаниям многих лиц, такие включения встречаются гораздо чаще, причем иногда они перестают иметь характер отдельных включений, а представляют пласты льда зачастую большой мощности и большого протяжения. Эти пласты покрыты иногда небольшим, а иногда и значительным земляным покровом, так что на нем растут деревья, как свидетельствует об этом Львов.

В таких условиях, где эти ледяные пласты получили значительное развитие, не так легко будет найти площадку без них, и поэтому перед строителями является задача научиться строить на льду. Без решения этой задачи освоение Арктики будет значительно затруднено. К решению этого вопроса надо приступить теперь же, так как полноценные ответы можно будет получить не сразу и не в один год.

Выше перечислены лишь основные принципы, которыми необходимо руководиться при выборе площадки предварительных изысканий. Природные условия нередко представляют гораздо более сложные картины, так что каждая исследованная площадка требует специального рассмотрения, увязанного с требованиями технологических процессов фабрично-заводских комбинатов или с размерами и типом жилищного строительства, если площадка предназначается для последнего.

Окончательные изыскания

После предварительных изысканий приступают к окончательным изысканиям и исследованиям на выбранной площадке, которые начинаются осенью и должны продолжаться всю зиму. При благоприятных условиях эти изыскания могут быть закончены к августу — сентябрю

следующего за их началом года, охватив таким образом период около 1 года. К этому времени должны быть закончены изыскания источников водоснабжения.

Минимальная длительность всех изысканий определяется с февраля или марта какого-нибудь года до сентября следующего, т. е. почти в $1^1/_2$ года.

Окончательные изыскания желательно вести с учетом намеченного расположения главнейших сооружений и в случае строительства фабрично-заводских комбинатов с участием будущего руководителя данного предприятия, знающего все детали технологического процесса и все условия, необходимые для наиболее выгодной и экономной эксплуатации.

Окончательные изыскания имеют целью дополнить предварительные данные теми, которые необходимы для конкретного проектирования и строительства намеченных сооружений, т. е. уточнить рельеф местности, режим грунтовых вод, уточнить термический режим и верхнюю границу вечной мерзлоты, установить и изучить характер пучения деятельного слоя, определить сопротивляемость сжатию мерзлых грунтов, а в подлежащих случаях и талых грунтов деятельного слоя, определить прочность смерзания грунтов и разных засыпок с теми строительными материалами, из которых предполагается устроить фундаменты, и, наконец, выяснить наличие и направление движения грунтовых вод.

План в горизонталях, выполненный во время предварительных изысканий, должен быть дополнен другим, менее обширным, охватывающим только строительную площадку с горизонталями, проведенными через 0,5 *м* одна от другой.

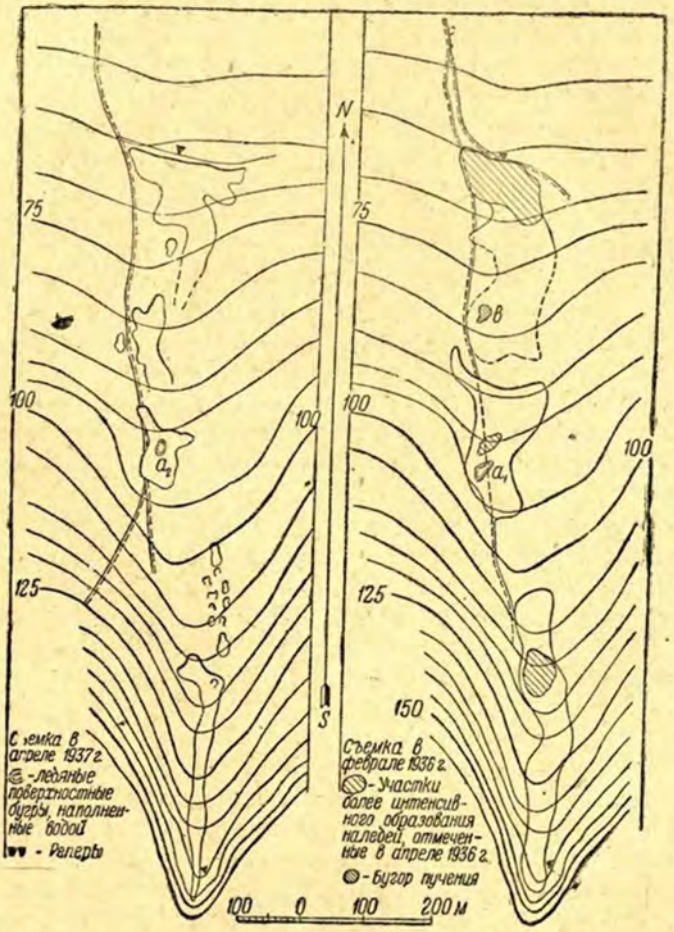
Если для выяснения горизонта грунтовых вод окажется недостаточно тех скважин, которые были выполнены при предварительных изысканиях, то число скважин при окончательных изысканиях увеличивается.

Скважины бурятся в период с половины августа до ноября, когда протаивание достигает своего максимума. Цель закладки этих скважин, как уже сказано, — выяснить границу залегания грунтовых вод, где она недостаточно ясна, а также уточнить глубину протаивания или верхнюю границу вечной мерзлоты в наиболее характерных местах выбранной площадки, т. е. в лесу (если есть лес), на лугу, в местах, покрытых мхом или торфом, в местах, лишенных растительности, и т. п. Этими дополнительными скважинами проходят деятельный слой и углубляются в вечную мерзлоту по крайней мере на 0,5 *м*.

Особое внимание надо обратить на скважины, где вода фонтанирует и изливается наружу, как это иногда бывает в действительности.

В зависимости от того, являются ли грунтовые воды напорными или безнапорными, рекомендуется составить карты гидроизогипс или пьезоизогипс. Чтобы учесть режим грунтовых вод, желательно карты гидроизогипс и пьезоизогипс иметь по крайней мере на два срока (например, на 1 сентября и 1 ноября) или на другие два срока, разнящиеся на два или полтора месяца.

Здесь, кстати, надо отметить, что в пылеватых суглинистых и супесчаных грунтах определение гидроизогипс и пьезоизогипс иногда является делом нелегким, так как иногда бывает так, что одна скважина работает с напором, так что вода изливается наружу, тогда как другая, находящаяся рядом — в расстоянии 2 — 3 *м*, — является



Фиг. 163. Развитие наледей к югу от верхнего поселка Сковородино

совершенно сухой. В этом случае мы имеем дело с определенными подземными руслами потоков, образующих, по всей вероятности, иногда целую сеть. К сожалению, достаточных наблюдений в этом направлении нет; однако уже и то, что нам известно, позволяет говорить о вероятном существовании таких сетей, сложенных из более или менее водопроницаемых грунтов, по которым движутся воды периодически или даже постоянно (и зиму и лето).

Неизвестно, являются ли эти подземные русла и потоки постоянными или могут менять свое направление. То, что в этом отношении мы знаем, позволяет полагать, что эти русла, сложенные из более водопроницаемых пород, являются все же только до известной степени постоянными и в известных пределах могут из года в год меняться, а воды, текущие по этим руслам, могут образовывать наледи и вздымать бугры пучения в разных местах, как это видно из фиг. 163, представляющей план в горизонталях небольшого участка близ Сковородина, на котором нанесены наледи и наледные бугры для двух лет. На этих планах видны границы наземных наледей. Буквами a_1 и a_2 обозначены поверхностные бугры, представляющие пологие купола, сложенные из чистого льда и наполненные чистой водой. Буквой b обозначен бугор пучения, где вода, образовавшая этот бугор, лежит на некоторой глубине под землей.

Из этих планов мы видим, что наледи и бугры пучения, меняя свои места и конфигурацию, лежат примерно в одной и той же полосе. При этом, однако, нужно помнить, что высказанное здесь предположение об известной неизменности мест появления наледей справедливо только до тех пор, пока внешние условия являются неизменными. Примером может служить тот факт, что устройство в Сковородине водоудержательной плотины изменило гидрогеологический режим и ниже этой плотины появились наледи там, где их раньше, по согласному свидетельству всех старожилов, никогда не было.

В целях уточнения верхней границы вечной мерзлоты и в целях ускорения работы в дополнение к бурению или взамен его можно пользоваться и прощупыванием, которое в грунтах, где нет щебенки и гравия, является прекрасным способом определения границы протаивания.

Щуп представлят собой длинный стержень круглого железа диаметром около 10 *мм*, оканчивающийся змеевиком. Этот стержень, вообще говоря, легко гнется и легко вручную же выпрямляется. При вращении он быстро углубляется в землю, причем верхним, обыкновенно отогнутым, концом пользуются для создания вращающего момента. Мерзлое состояние грунта определяется тем, что быстрота поступательного движения щупа резко сокращается. На фиг. 164 показана работа со щупом. Для прощупывания нужен 1 человек. Глубина в 2,5 *м* легко проходится в 15 — 20 мин. Поверка прощупывания бурением, которая неоднократно делалась, давала иногда расхождение, которое, однако, не превышало 5 —7 *см*.

Если точно или ориентировочно известно место расположения зданий, то на площадках, предназначенных для строительства, разбиваются сетки с квадратными очертаниями отдельных ячеек так, чтобы стороны этих квадратов были не более 10 *м*. В вершинах этих квадратов и производится прощупывание, результаты которого заносятся в особый журнал. Это делается для того, чтобы убедиться, что протаивание на всей площадке, которая будет потом занята каким-нибудь сооружением, происходит равномерно, что площадка в пределах деятельного слоя довольно однородна.

Такое исследование ведется потому, что в районах вечной мерзлоты бывают иногда случаи, когда граница вечной мерзлоты по глубине резко меняется на сравнительно небольшом протяжении, что можно было наблюдать, например, в Игарке (см. фиг. 4 и соответствующий текст). То же можно было наблюдать в Якоку тстрое, где в двух буровых скважинах, расположенных на расстоянии, не превышающем 40 *м*, в июне мерзлота в одной скважине была встречена на глубине около 1 *м*, а в другой скважине ее удалось обнаружить лишь на глубине свыше 7 *м*.

Независимо от этого вне периметра здания, по крайней мере по углам предполагаемого сооружения, необходимо произвести шурфование на глубину, превышающую предполагаемое заглубление фундаментов по крайней мере на 2,5 *м*. Еще лучше устанавливать эту глубину в зависимости от размеров здания, пользуясь измененной формулой Л. Н. Бернацкого

$$H \geq h_1 + \frac{h_2}{4},$$

где H — глубина разведочного шурфа;
h_1 — толщина деятельного слоя;
h_2 — ширина здания.

При рытье шурфов через каждые 0,25 *м* берутся пробы грунта на влажность и гранулометрический состав, отмечаются появление грунтовых вод и граница вечной мерзлоты. Шурфы эти, как и прощупывание, делаются в октябре, перед заморозками.

Фиг. 164

В случае обнаружения неравномерного протаивания, значительной неоднородности состава и влажности делаются дополнительные шурфы, буровые скважины, прощупывания, чтобы выяснить характер наблюдаемых разниц, как делается это и при геологических исследованиях.

Особое внимание должно быть уделено скальным грунтам, находящимся в пределах вечной мерзлоты.

Как показывает опыт, буровые исследования далеко не всегда могут дать правильное представление, в особенности о скальных породах.

Так, в Игарке при изысканиях под лесопильный завод валуны при бурении были приняты за скалу. Нечто подобное произошло и при изысканиях у Петровского завода.

Кроме того, найденная в толщах вечной мерзлоты скала далеко не всегда является надежной, какой она иногда кажется при извлечении

из шурфа. Известны случаи, когда такие образцы скалы, с первого взгляда вполне доброкачественные, через некоторое время рассыпались в мельчайший порошок. В мерзлом состоянии такая рассыпающаяся при оттаивании скала может считаться хорошим основанием; если же предполагается ее использование в талом состоянии, то сопротивляемость ее предварительно должна быть тщательно изучена.

Такое не вполне понятное действие вечная мерзлота может оказывать не только на скалу. В Игарке был найден в слое вечной мерзлоты прекрасный образец зуба мамонта. Около месяца этот зуб просуществовал, повидимому, вполне благополучно, но через полгода он рассыпался на мельчайшие слои.

Ввиду изложенного проверка данных бурения шурфованием совершенно необходима.

По данным прощупывания, бурения и шурфования составляются план в горизонталях залегания верхней границы вечной мерзлоты и геологические разрезы имеющихся напластований. Строителю и проектировщику нужно иметь в виду, что этот план в горизонталях верхней границы вечной мерзлоты не есть нечто незыблемое, а носит до известной степени ориентировочный характер. Рельеф верхней поверхности вечной мерзлоты меняется из года в год, колеблясь около некоторого среднего положения, даже без влияния каких-либо искусственных причин, и может значительно измениться под влиянием искусственных причин(в случае, например,снятия торфяного покрова). Поэтому в октябре данного года, проделав только что описанные исследования, необходимо с этих площадок (т. е. там, где предполагается разместить здания) снять дерн, сделать планировку и зимой удалять снег по мере его выпадания, в августе же или сентябре следующего года повторить исследование и сделать несколько новых шурфов. Изменение в протаивании необходимо со всей тщательностью зафиксировать. Зная из главы IV, как быстро сказывается влияние искусственных факторов, мы можем понять, насколько важны только что рекомендованные исследования.

Чрезвычайно хорошо соединить только что описанные исследования с наблюдениями над термическим режимом вечной мерзлоты и деятельного слоя.

Выше уже было сказано, что наблюдения над температурой, начатые при предварительных изысканиях, желательно продолжать возможно более длительный срок. Это значит, что термометрические наблюдения, организованные в районах различных внешних условий, продолжаются регулярно в течение всего времени окончательных изысканий, ведутся на тех же глубинах и производятся в те же сроки, о которых сказано выше. В период окончательных изысканий эти наблюдения дополняются тем, что аналогичные температурные наблюдения устанавливаются и на оголенных площадках в местах будущего возведения сооружений на тех же глубинах (1,6; 2,5; 5 и 10 *м*), если не мешает скала. Наблюдения эти ведутся со времени их организации (примерно в сентябре или октябре) до августа или сентября следующего года.

При большом количестве намеченных сооружений температурные наблюдения устанавливаются, конечно, не на всех площадках, а только на наиболее характерных. Точно так же в других характерных местах, где возведения сооружений не предполагается, но где уже ведутся наблюдения, начатые в период предварительных изысканий (например, в лесу, под толстым моховым покровом), является весьма желательным в период окончательных изысканий произвести дополнительные изыскания.

Эти температурные изыскания следует производить в целях сравнения по возможности ближе к уже производившимся. Для этого, отступя 20 *м* от существующей установки, разбивают квадрат размерами 20 × 20 *м*. С этого квадрата удаляют растительный покров (дерн, мох, кусты, деревья) и в центре устанавливают трубки для почвенных термометров, в которых и измеряют температуру на глубине 1,6; 2,5; 5 и 10 *м*. Снег с этих оголенных площадок по мере выпадания тоже удаляется.

Мы уже знаем из предыдущего (см. в главе IV о влиянии искусственных факторов), по опыту наблюдения изменений температур под домами, что изменения эти наступают быстро. Таким образом, правильно организованные наблюдения в период предварительных и окончательных изысканий дадут возможность проектировщику и строителю предвидеть те изменения в температурном режиме, которые внесут строительство и даже в некоторых случаях эксплуатация сооружений.

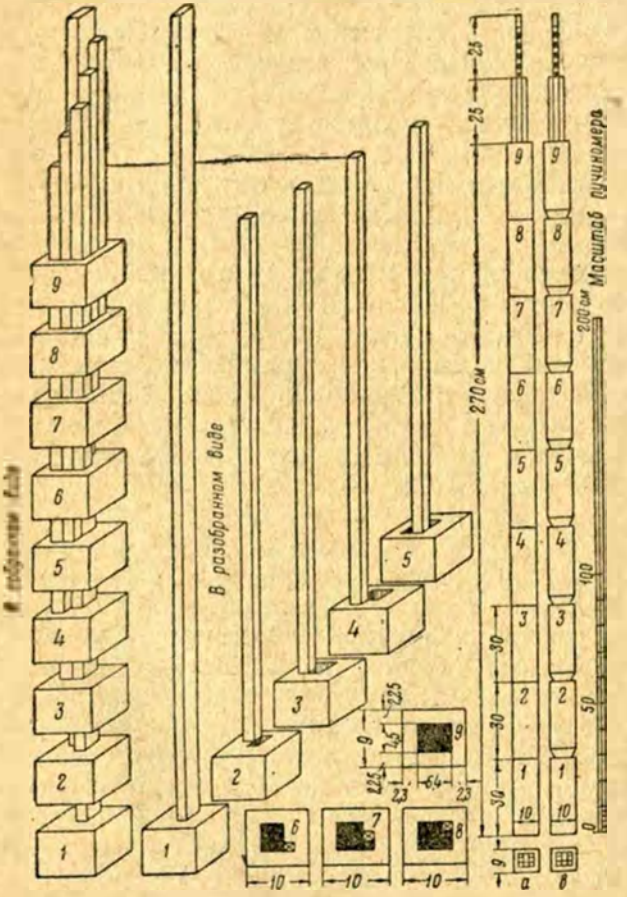
§ 36. Некоторые детальные исследования и их методика. Исследование пучения грунтов

Кроме термического режима для строителя и проектировщика весьма интересно знать, пучат ли грунты на выбранной площадке, какова величина этого пучения и как глубоко распространяются пучинистые грунты. Для этого рекомендуется в местах установки термометров (в расстоянии 1 — 1,5 *м* от них) на некоторых естественных и оголенных площадках и в других местах, которые могут интересовать строителя, установить в августе или сентябре (но непременно до начала промерзания почвы) диференциальные пучиномеры, примененные автором этих строк на Сковородинской научно-исследовательской мерзлотной станции. Эти пучиномеры дешевы и просты. Их может изготовить любой столяр; даваемые же ими показания обладают достаточной полнотой.

На фиг. 165 показаны схема и проекты последнего типа установленных диференциальных пучиномеров. Пучиномер состоит из нескольких элементов (в рассматриваемой схеме — из девяти), которые назовем муфтами. Каждая из муфт имеет свой деревянный стержень, неизменно с ней связанный. Каждая муфта, кроме нижней, имеет еще отверстие, которое пропускает стержни всех нижележащих муфт. Нижняя же муфта *7* не имеет отверстий и соединена с наиболее длинным стержнем, поперечное сечение которого вдвое больше остальных и

равно 3,0 × 1,8 *см*. Сечение каждого из остальных стержней равно 1,5 × 1,8 *см*. Самая верхняя муфта, пропуская все стержни, не имеет своего стержня.

Когда пучиномер собран и муфты сдвинуты вплотную, то верхушки всех стержней (за исключением большего, соединенного с нижней муфтой) находятся в одной плоскости, выступая над верхней муфтой на 25 *см*. Стержень, соединенный с нижней муфтой, выступает над остальными тоже на 25 *см*. Часть его, выступающая над верхней муфтой 9, разделена на сантиметры. Все стержни и все муфты обильно смазываются техническим вазелином.



Фиг. 165. Проект дифференциального пучиномера

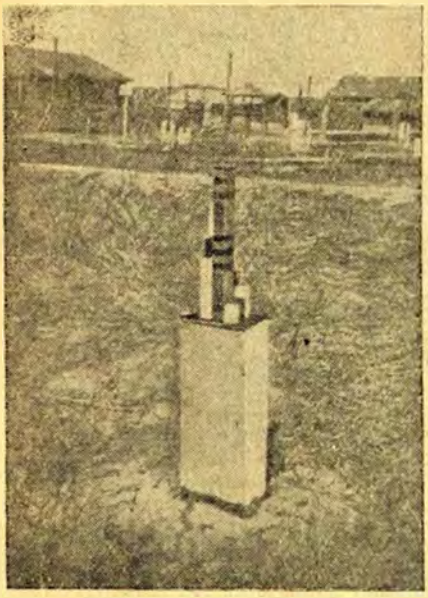
В грунтах, легко поддающихся бурению, проделывается такое отверстие, чтобы пучиномер без особого труда можно было туда вставить. Во избежание пустот в отверстие предварительно может быть налит разжиженный грунт, который при опускании в отверстие пучиномера оттуда им выдавливается. В скважинах, где нет грунтовых вод, это необязательно. В грунтах, где такое отверстие не может быть пробурено, вырывается по возможности узкий шурф, куда вставляется пучиномер, и засыпается вынутым грунтом.

Ниже мы даем описание работы пучиномера. Пучение начинается сверху. Этим пучением поднимается верхняя муфта, за поднятием которой и следят по делениям центрального стержня. С увеличением толщины промерзания начинают расширяться нижележащие слои, увлекая в своем пучении последовательно расположенные ниже муфты. При вертикальном перемещении этих муфт вверх с ними поднимаются и соответственные стержни. О процессе поднятия мы судим

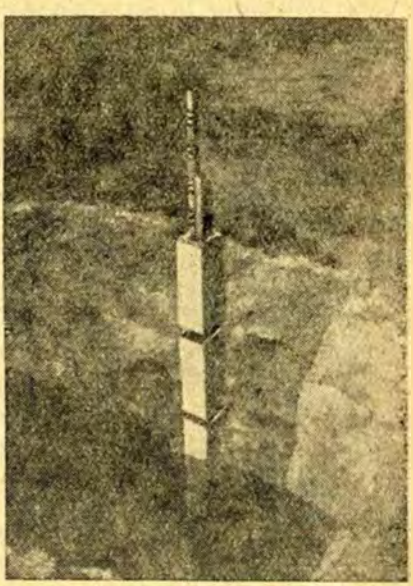
по перемещению этих стержней относительно центрального. Что касается последнего, то при общей длине пучиномера, равной 2,9 *м*, нижняя муфта, соединенная с ним, попадает в сковородинских условиях в вечную мерзлоту, и потому он должен быть неподвижен. Однако ради гарантии верхушка этого стержня нивелируется и сравнивается с неподвижным репером.

Таких реперов, об устройстве которых будет сказано ниже, должно быть установлено на выбранной площадке несколько. Они необходимы при изысканиях и исследованиях, а также при строительстве.

На фиг. 166 дан фотоснимок одного из диференциальных пучиномеров Сковородинской станции в действии. На фиг. 167 мы видим такой



Фиг. 166



Фиг. 167

пучиномер, только более упрощенного типа, на втором году его работы, поставленный ради опыта, так как были сомнения в том, будут ли вообще удовлетворительно работать подобного рода пучиномеры. Он отрыт, и на фотоснимке видны разъединенные пучением муфты.

Было опасение, что второй год такой пучиномер работать не будет, что грунт попадет в промежутки между муфтами и муфты не вернутся в исходное положение. Практика на площадке, где плывунов не наблюдалось, таких опасений не подтвердила.

На фиг. 165 даны два проекта *a* и *b*. Один проект имеет призматические муфты, а на другом низ этих муфт обделан в виде усеченной пирамиды. В период выпучивания оба типа работали одинаково хорошо; что же касается дальнейшей их службы, то только последующий

опыт может дать ответ, какой из этих пучиномеров является более пригодным.

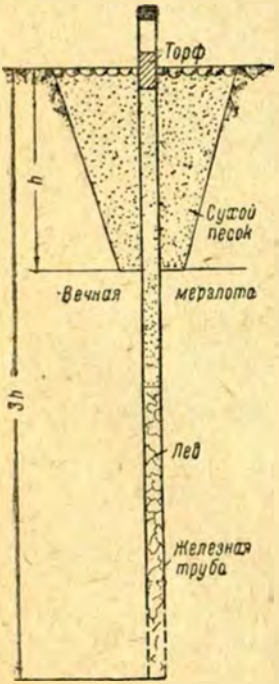
В сущности говоря, изыскателю многолетнее исследование пучения вряд ли потребуется. Ему нужно установить только, пучат или не пучат данные грунты и если пучат, то все ли слои или только верхние. На все эти вопросы пучиномер даст ответы, указав размеры пучения и во времени и по глубине.

Наблюдения над пучиномерами достаточно производить два раза в месяц и вести с момента установки до окончания исследования в августе или сентябре будущего года.

Выше уже сказано, что центральный стержень пучиномера нивелируется и определяется его отметка относительно подвижного репера.

Неподвижные реперы

Лучшим репером, конечно, является площадка, вырубленная в скале, если только можно найти вблизи такую скалу. Однако это далеко не всегда возможно.



Фиг. 168. Мерзлотный репер системы Сумгина—Цитовича

Реперы, предложенные Цытовичем и Сумгиным, испытаны на практике и оказались вполне удовлетворительными. Описание предложенного ими репера дается авторами в следующем виде:

«Мерзлотный репер представляет собой металлическую трубу с отверстиями в нижней части (фиг. 168). Труба забивается в буровую скважину соответствующего диаметра на требуемую глубину. Глубина расположения подошвы репера от поверхности земли не должна быть менее тройной глубины максимального оттаивания. В трубу на $^3/_4$ глубины ее заложения в мерзлоте заливается вода, имеющая температуру, близкую к 0°. После того как вода от действия окружающей отрицательной температуры замерзнет, труба засыпается сухим песком, а после торфом».

Государственный междуведомственный геодезический совет (66) в своей инструкции предлагает несколько иной репер как обязательный для всех ведомств, учреждений и организаций, ведущих геодезические, аэросъемочные и тому подобные работы.

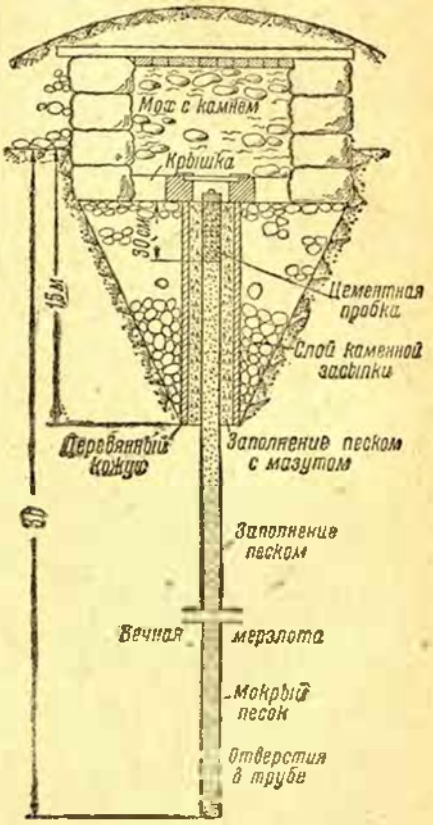
Согласно инструкции этот репер (фиг. 169) имеет следующее описание:

«Основной репер представляет собой 3″, 4″ или $4^1/_2$″ железную трубу, опускаемую бурением на тройную глубину наибольшего оттаивания, но не меньше 6 *м* в субарктической зоне и 4 *м*—в арктической, причем верхнее колено обязательно имеет длину 1 *м*. Верх трубы на глубину 1,5 *м*

защищается деревянным кожухом с засыпкой песком или галькой, насыщенными нефтяными отходами. Перед установкой кожуха в верх трубы ввинчивается металлическая пробка с репером и тщательно промеряется стальной рулеткой расстояние между высотной точкой репера и нижним краем щели свинчивания верхнего колена трубы (длиной 1 *м*), т. е. верхним краем второго колена трубы, который служит, таким образом, вторым нижним репером на случай повреждения верхнего».

Из этих описаний мы видим, что по существу оба репера одинаковы по идее, разница лишь в заполнении и объеме верхней части.

Репер Цытовича — Сумгина проще и, как уже сказано, доказал свою пригодность на деле. Что касается репера второго типа, то будучи основан на том же принципе, что и первый, он, конечно, является вполне пригодным и надежным, но его дорогая надстройка для изысканий и исследований не нужна, да к тому же ее незыблемость и целесообразность вызывают большие сомнения.



Фиг. 169. Мерзлотный репер Государственного геодезического совета

Практика показывает, что первый репер (т. е. репер Цытовича — Сумгина) в свою очередь тоже может быть упрощен. Нет, повидимому, никакой необходимости засыпать его снаружи чем-либо, а также сухим песком, так как нет никакого основания думать, что этот песок сухим и останется; точно так же нет никакого основания поверхнасыпанного в трубу песка укладывать торф. Что же касается заполнения трубы водой или пересувлажненным песком, то здесь, повидимому, большой разницы нет. Преимущество песка в том, что он скорее замерзнет, а преимущество воды в том, что она более надежно заполнит все пустоты. Поэтому лучшим заполнением следует считать крупный песок, увлажненный до избыточного насыщения, погружаемый в трубу небольшими порциями с легкой утрамбовкой.

Железные трубы, вставляемые в землю для термометрических измерений в них, могут быть прекрасными реперами, если их длина удовлетворяет поставленным выше требованиям. Так, в Сковородине трубка для измерения температур на глубине 14 *м* служит в течение уже многих лет в качестве самого надежного репера.

На строительной площадке необходимо иметь не менее двух реперов, лучше три. Постоянство разниц в их отметках будет служить гарантией их неподвижности.

Исследования сопротивляемости вечно мерзлых грунтов

Не менее важным вопросом, является вопрос о допускаемом давлении на грунт под фундаментами.

Ввиду малой изученности сопротивлений вечно мерзлых грунтов давлению испытание сопротивляемости их в естественных условиях нужно считать пока необходимым.

В главе III мы описывали результаты испытания сопротивляемости вечно мерзлых грунтов штампами и видели, что в пылевато-суглинистых грунтах нагрузка в 5 и 10 *кг/см*^{2} в течение года сколько-нибудь заметных деформаций не дала, причем максимальная температура испытуемого грунта доходила до —0,2°, а влажность равнялась приблизительно 27% от веса сухого вещества.

Мы уже видели, что кратковременные испытания в указанных условиях температуры и влажности (в течение, например, декады) для большинства вечно мерзлых грунтов дадут удовлетворительные результаты, т. е. грунты не дадут заметных деформаций при напряжениях до 8 — 10 *кг/см*^{2} и даже более. Поэтому и здесь нужно поставить вопрос не о прочности грунта на сжатие, а о тех медленно нарастающих пластических изменениях, которые могут появиться в сильно увлажненных грунтах.

Если принять во внимание данные Цытовича (60, стр. 196 и 217), то при незначительной влажности, равной 12,8%, и даже при небольших нагрузках (от 0,5 — 2,0 *кг/см*^{2}) мы в супесчаных грунтах при температуре —1,7° имеем уже значительные пластические деформации. Возникает вопрос, не будут ли происходить аналогичные пластические деформации под фундаментами.

Чтобы рассеять эти опасения, должны быть поставлены соответствующие испытания при помощи штампов, аналогичных примененным в Сковородине, или, например, при помощи приборов, аналогичных прибору Вольфсгольца. Этот прибор описан у разных авторов, например у Шоклича (67, стр. 69), и по существу мало чем отличается от сковородинских. Его преимущество в больших размерах штампа.

Однако при применении прибора Вольфсгольца или аналогичного ему нужно иметь в виду следующие обстоятельства: нагрузка должна быть все время постоянной, превышающей расчетную на принятый коэфициент запаса; кроме того, должна быть предвидена возможность вертикального перемещения штампа под этой нагрузкой на некоторую величину (например, на 10 *см*); наконец, зазор между трубой штампа и обсадкой должен быть тщательно заполнен техническим вазелином во избежание конденсации пара.

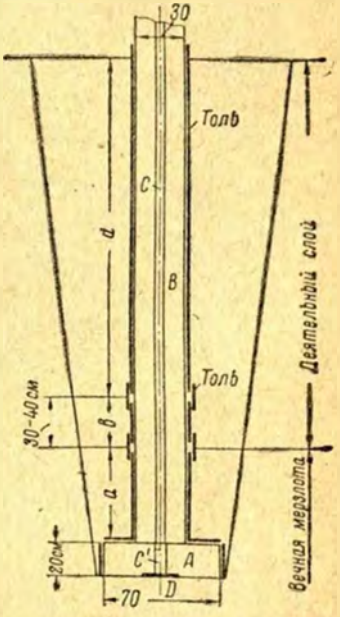
Еще проще воспользоваться штампом, нижняя часть которого схематически изображена на фиг. 170. Собственно штамп *А* представляет собой деревянный или железобетонный прямоугольный параллеле-

пипед с квадратным основанием. Необходимое давление на штамп передается через круглый или многогранный стержень *B*, тоже из дерева или железобетона, обильно смазанный техническим вазелином и обвернутый толем. Обвертка толем состоит из трех частей *a*, *b* и *d*. Каждая из этих частей подходит впритык к другой, линия же стыка перекрывается накладкой из толя по вазелину. Толь, чтобы удержать его в необходимом положении у стержня, обматывают сверху шпагатом или тонкой проволокой. Часть *a* лежит в пределах вечной мерзлоты, части *b* и *d* — в пределах деятельного слоя; высота части равна *b* 30—40 *см*. Обильно смазывается вазелином и самый штамп *A*, верхняя часть которого, а также боковые грани покрываются толем.

Весь этот прибор устанавливается в вырытом для этого котловане, который после установки немедленно засыпается землей. В главе III было отмечено, что обвертывание толем по вазелину предохраняет обвертываемые призматические тела от пучения на срок до 2 лет. Этим обстоятельством мы здесь и пользуемся для наблюдения возможных пластических деформаций, могущих нарастать в длительные сроки.

В стержне и штампе весьма желательно устроить отверстия *C* и *C'* для установки термометра и определения температуры непосредственно под штампом. Отверстие *C'* в самом штампе нужно сделать несколько больше, чем в стержне *B*. Снизу отверстие *C'* перекрывается железной пластинкой *D* заподлицо с нижней гранью штампа.

На схеме взят штамп размерами 70×70 *см*; однако при однородности грунта ниже верхней границы вечной мерзлоты (что можно обнаружить бурением) можно ограничиться и штампом меньших размеров.



Фиг. 170. Схема нижней части штампа

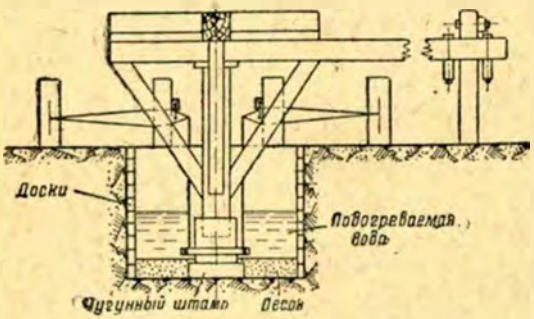
Способ нагрузки стержня *B* не показан, так как это зависит от размеров штампа, и может быть осуществлен многими способами, примеры которых можно найти в курсах оснований и фундаментов, а также в недавно изданном проекте «Технических условий на исследование грунтов как основания сооружений», изд. 1939 г.

Эти приборы для испытания устанавливаются в августе, сентябре или даже октябре на выбранной площадке и за ними ведутся наблюдения до августа или сентября следующего года. Наблюдения заключаются в определении нивелировкой перемещений штампа относительно какого-нибудь неподвижного репера. Наблюдения ведутся не реже двух раз в месяц и записываются в надлежащий журнал. Возможно ближе к штампу (если не предусмотрена установка термометра в теле штампа), не далее 1 *м* на уровне погружения штампа, устанавливают тер-

мометр и производят измерение температуры, чтобы иметь возможность связать перемещения штампа, если таковые будут обнаружены с наблюденной в это время температурой. Штамп желательно заложить на глубину, равную глубине заложения фундамента.

Если штамп при полуторной или двойной нагрузке против предполагаемой останется в течение года неподвижным, то при однородном грунте (что устанавливается, как выше сказано, бурением и анализом) это будет служить гарантией, что предположенное давление на грунт не вызовет нежелательных деформаций. Если же будет обнаружено хотя бы небольшое оседание штампа, то это будет показывать, что нужно более глубокое заложение фундамента в области более низких температур или уменьшение давления.

От испытания «мерзлого грунта пробной нагрузкой с одновременным оттаиванием», рекомендуемого Цытовичем и Сумгиным (60, стр. 379, 380), следует пока воздержаться, если только практика совершенно неожиданно не выявила его несомненных достоинств.



Фиг. 171. Схема установки для испытания мерзлых грунтов пробной нагрузкой при оттаивании по Цытовичу — Сумгину

Утверждая, что «это испытание может дать весьма ценные указания для практики», авторы все же не дают ни характера, ни способа получения этих «ценных указаний» и не сообщают, когда, где и с каким успехом этот способ применялся. А между тем такой способ испытания, который назовем для краткости испытанием теплым штампом, по нашему мнению, вызывает много возражений.

Способ, о котором идет речь, состоит в испытании грунта на дне открытого шурфа, вырытого на глубину предполагаемого заложения фундаментов. На мерзлом дне шурфа устанавливается штамп площадью 5 000 *см*², на которую передают требуемое давление и измеряют осадку. Разница от обыкновенных испытаний подобного рода, применяемых для талых грунтов, состоит в том, что перед загрузкой штампа дно шурфа засыпается песком слоем 20 — 30 *см*, который таким образом окружает на эту высоту и низ штампа. Затем шурф заливается водой, которая во время испытания подогревается, отчего грунт постепенно оттаивает вокруг штампа и под штампом. Схема такого штампа дана на фиг. 171, заимствованной из книги Цытовича и Сумгина (60, стр. 380).

Если это исследование ведется для испытания мерзлых грунтов как таковых, т. е. для определения их свойств в мерзлом состоянии, то вряд ли такое испытание может дать что-либо достоверное. Если же испытание ведется в предвидении, что мерзлота под фундаментами зда-

ния уйдет (т. е. для выяснения свойств грунта, когда он станет талым), то и в этом случае вряд ли получатся данные, которыми можно будет воспользоваться для строительства.

Не говоря о сомнениях, вызванных самой методикой, допустим, что испытания эти с учетом всех влияющих факторов легко выполнимы и что такие испытания сделаны, например, по периметру какого-нибудь будущего здания. Допустим также, что эти испытания дали однородные и благоприятные результаты. Пусть, например, выяснилось, что осадка при оттаивании грунта на 1 *м* при давлении, равном 2 *кг/см*², во всех шурфах равняется 1 *см* и притом стабилизируется.

Строитель тогда должен сделать такой вывод: здание строить можно, но так, чтобы и давление и протаивание под всеми точками фундаментов были одинаковыми или чтобы здание могло выдерживать те напряжения, которые в нем возникнут благодаря неравномерному прогреванию грунтов. И то и другое условия мало осуществимы. В случае различных результатов испытаний вопрос еще более осложняется.

Пойти на возможность уничтожения вечной мерзлоты под фундаментами здания можно только при наличии мощных однородных пластов скалы или плотно слежавшегося крупного песка или гравия даже при их увлажненности почти до полной влагоемкости, т. е. при наличии таких грунтов, которые при переходе в талое состояние и при давлениях, соответствующих этому состоянию, не дают никакой осадки.

Таким образом, мы полагаем, что теплый штамп может дать лишь один ценный результат, а именно убедить — в случае сомнения — экспериментатора в том, что испытываемый грунт при переходе в талое состояние никакой осадки не дает.

Осадка, даже небольшая, будет указывать на то, что при неизбежном неравномерном оттаивании под зданием неизбежны деформации, а следовательно, и трещины.

Пусть при мелкозернистости и непереувлажненных песчаных грунтах эти деформации будут невелики, но все же они будут. Что же касается непесчаных грунтов, а особенно пылеватых с прослойками льда, то при таких грунтах итти на уничтожение мерзлоты под зданием нельзя ни при каких показаниях теплых штампов. Приведенные выше примеры домов, постепенно уходящих в землю, служат хорошим доказательством этого положения.

Силы или прочность смерзания

Мы уже раньше видели, что влажные грунты, замерзая, примерзают к соприкасающимся с ними телам. Мы знаем также, что это обстоятельство играет роль в пучении и выпучивании столбов и фундаментов, что подробно рассмотрено в главе III.

Приняв все это во внимание, мы видим, насколько важно для проектировщика и строителя знание этих сил смерзания. Задача сводится к следующему. Пусть грунт и соприкасающееся с ним тело смерзлись. Требуется определить, какое усилие нужно приложить, чтобы сдви-

нуть грунт и тело по плоскости их соприкосновения или оторвать одно тело от другого в направлении, перпендикулярном плоскости соприкосновения. Сдвигающее или отрывающее усилие, нарушающее связь между грунтом и примерзшим к нему телом, разделенное на площадь смерзания, и дает меру прочности смерзания, или силы смерзания, как ее иногда называют.

Вопросом о величине прочности смерзания занимались Цытович, Сумгин, Евдокимов-Рокотовский, Покровский и др. Наиболее обстоятельно и полно, повидимому, занимался этим вопросом Цытович, но, к сожалению, почти исключительно в лабораторных условиях и с искусственно приготовленными грунтами.

Цытович ограничивает свои исследования только исследованием прочности смерзания при сдвиге (60, стр. 171), называя эти силы «касательными силами смерзания». В результате исследований Цытович приходит к таким выводам:

1) величина силы смерзания как грунтов, так и льда увеличивается с понижением отрицательной температуры;

2) для исследованных грунтов в данных условиях опыта зависимость между величиной силы смерзания грунтов с деревом в пределах от 0° до —6° может быть принята линейной (60, стр. 177).

Далее Цытович дает следующие эмпирические формулы:

для касательных сил смерзания различных грунтов с деревом при температуре от 0° до —6° (6,0, стр. 178, 179);

для пылевато-илистого грунта

$$\tau_c = /4{,}6 + 0{,}9\,t°/кг/см^2;$$

для глины

$$\tau_c = /2{,}8 + 1{,}4\,t°/кг/см^2;$$

для супесчаного грунта

$$\tau_c = /1{,}0 + 3{,}6\,t°/кг/см^2.$$

Эти формулы действительны при влажности грунтов, близкой к половине от их максимальной влажности и только в пределах указанных выше температур. При большей влажности — до пределов, близких к использованию их полной влагоемкости, — эти силы (60, стр. 183) увеличиваются.

Дальше (60, стр. 182) Цытович приводит интересные в практическом отношении данные о смерзании различных грунтов с насыщенным водой деревом при небольших отрицательных температурах. Приводим эти данные в табл. 31.

Если принять во внимание, что в табл. 31 а дана объемная влажность, то влажность пылевато-илистых и глинистых грунтов в пределах от 22,4 до 32,6% далеко не является насыщающей их до полной влагоемкости. Из этого заключаем, что силы смерзания, взятые из табл. 31 или определенные по формулам Цытовича, будут, вообще говоря, меньше, чем силы смерзания более увлажненных грунтов.

Таблица 31а

Температура в °С	Смерзание с насыщенным водой деревом						Смерзание с насыщенным водой бетоном					
	пылевато-илистого грунта		глинисто-го грунта		супесчано-го грунта		пылевато-илистого грунта		глинисто-го грунта		супесчано-го грунта	
	$W_в$	τ	$W_в$	τ	$W_в$	τ	$W_в$	τ	$W_в$	τ	$W_в$	τ
	в %	в $кг/см^2$	в %	в $кг/см^2$	в %	в $кг/см^2$	в %	в $кг/см^2$	в %	в $кг/см^2$	в %	в $кг/см^2$
—0,2°	29,9	3,6	27,1	2,9	12,1	1,3	—	—	—	—	—	—
	22,4	7,0	22,4	3,2	6,7	2,8	16,4	4,4	17,8	7,8	5,8	2,8
—1,2°	32,6	8,9	26,4	5,9	10,1	4,1	33,0	6,0	26,3	4,8	11,7	6,4
	43,8	7,1	37,3	13,0	13,3	7,2	44,0	9,2	36,2	6,4	12,1	7,0
	51,2	7,6	56,5	11,8	16,5	8,2	53,2	3,1	43,9	5,8	16,1	11,1

Здесь $W_в$ — объемная влажность.

Характеристика грунтов следующая:

В пылевато-илистом грунте фракций от 0,05—0,005 *мм* 63%
В глинистом грунте фракций меньше 0,005 *мм* 36%
В супесчаном » » от 1,0 до 0,05 *мм* 68%

Попробуем теперь определить силы смерзания пылевато-илистых грунтов с содержанием пыли около 75%, с количеством частиц меньше 0,005 *мм* около 20%, с весовой влажностью по отношению к сухому веществу в пределах от 25 до 30% при температурах —0,2°, —0,6° и —1,1°, что нам понадобится дальше.

Найти более или менее точный ответ на вопрос, поставленный таким образом, по данным Цытовича, не так просто, так как характеристики грунтов, к которым относятся его данные, не отличаются достаточной полнотой. По Цытовичу неясно, что такое ил и пылевато-илистый грунт.

В характеристике такого грунта в табл. 45 (60, стр. 177) сказано: «фракций < 0,005 — 14%, органических веществ — 18%» и только.

Если же сопоставить приведенные Цытовичем данные табл. 45 и его формулы с данными и формулами Вологдиной, помещенными в Сборнике № I лабораторных исследований механических свойств мерзлых грунтов (изд. Академии наук), то по тождеству этих данных и выведенных из них формул можно, повидимому, заключить и о тождестве грунтов, к которым они относятся.

В работе Вологдиной в упомянутом выше сборнике на стр. 49 пылевато-илистый грунт характеризуется следующим образом: частиц от 1 до 0,25 *мм* — 0,8%; от 0,25 до 0,05 *мм* — 3,9%; от 0,05 до 0,01 *мм* — 15,9%; от 0,01 до 0,005 *мм* — 46,8%; от 0,005 до 0,001 *мм* — 26,3% и 0,001 *мм* — 6,3%.

Несколько обобщая, будем иметь: частиц от 1,0 до 0,05 *мм* — 4,7%; частиц от 0,05 до 0,005 *мм* — 62,7%; частиц меньше 0,005 *мм* — 32,6%. Ни об иле, ни об органических примесях у Вологдиной не сказано ни слова.

Не вдаваясь в дальнейшее рассмотрение этого вопроса, будем думать, что все грунты, называемые Цытовичем пылевато-илистыми, имеют приблизительно одни и те же свойства и что тот грунт, для которого мы ищем силы смерзания, может быть назван пылевато-илистым. Сила смерзания для температуры 0° для этого грунта будет, по формуле Цытовича, равна

$$\tau'_c = 4{,}6 + 0{,}9 \cdot 0{,}0 = 4{,}6 \ кг/см^2,$$

что несколько противоречит экспериментальным данным, приведенным им в таблице, где для более низкой температуры, равной — 0,2°, сила смерзания равна 3,6 *кг/см*^{2}.

Для температуры, равной —0,6°, по формуле

$$\tau''_c = 4{,}6 + 0{,}9 \cdot 0{,}6 = 5{,}1 \ кг/см^2.$$

Непосредственно из табл. 45 книги Цытовича и Сумгина (60, стр. 77) для весьма близкой температуры, равной —0,5°, имеем

$$\tau''_c = 6{,}1 \ кг/см^2.$$

Для температуры, равной —1°, по формуле

$$\tau'''_c = 4{,}6 + 0{,}9 \cdot 1 = 5{,}5 \ кг/см^2.$$

По приведенной выше табл. 31 для близкой температуры, равной —1,2°, для самой меньшей объемной влажности $W_0 = 22{,}4\%$, имеем

$$\tau''''_c = 7{,}0 \ кг/см^2.$$

Выбрав из всех этих данных наименьшие значения (цель чего будет ясна из последующего), получим

для температуры 0°

$$\tau'_c = 3{,}6 \ кг/см^2;$$

для температуры —0,6°

$$\tau''_c = 5{,}1 \ кг/см^2;$$

для температуры —1,0°

$$\tau'''_c = 5{,}5 \ кг/см^2.$$

Из изложенного видим, что вопрос о силе смерзания далеко не настолько изучен, чтобы данными, приведенными, например, Цытовичем, можно было пользоваться на практике. Те исследования, о которых сказано в главе III (§ 21), показывают, что в лабораторном изучении прочность смерзания получилась значительно больше, чем та, которую должно учитывать на практике.

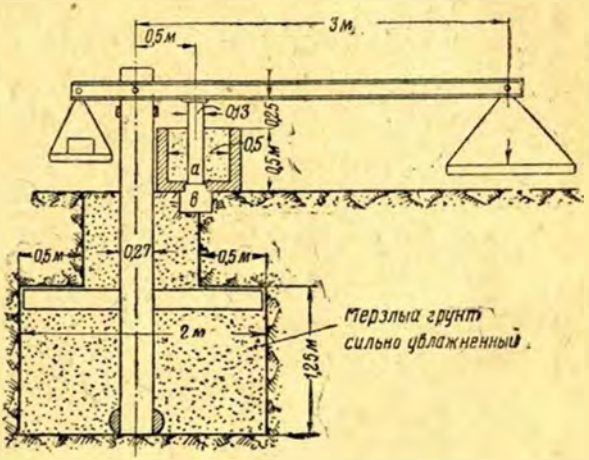
Кроме приведенных выше формул, основанных на лабораторных исследованиях, Цытовичем и Сумгиным для определения сил смерзания рекомендуется еще полевая установка, данная на фиг. 172, заимствованная из книги упомянутых авторов (60, стр. 188). Прочность

смерзания между цилиндром или призмой *a* и окружающим его грунтом определяется по усилию, необходимому, чтобы протолкнуть тело *a* в оставленную пустой полость *b*.

По существу эта установка тоже носит лабораторный характер, и полевым является, пожалуй, только холод, замораживающий грунт у тела *a*. Ввиду этого данные, полученные в результате пользования такой установкой, дадут такие же преувеличенные значения для прочности смерзания, как и в случае чисто лабораторных исследований.

К этим вопросам мы еще вернемся, когда будем говорить о расчете фундаментов; здесь же укажем лишь на необходимость вследствие недостаточной изученности вопроса постановки соответствующих опытов в ряде случаев непосредственно на строительных площадках.

Для определения прочности смерзания можно пользоваться прибором, изображенным на фиг. 173. На этой фигуре дан прибор, который можно применить при глубине деятельного слоя в пределах от 2,4 до 2,7 *м*. При других мощностях деятельного слоя он должен быть соответственно изменен.



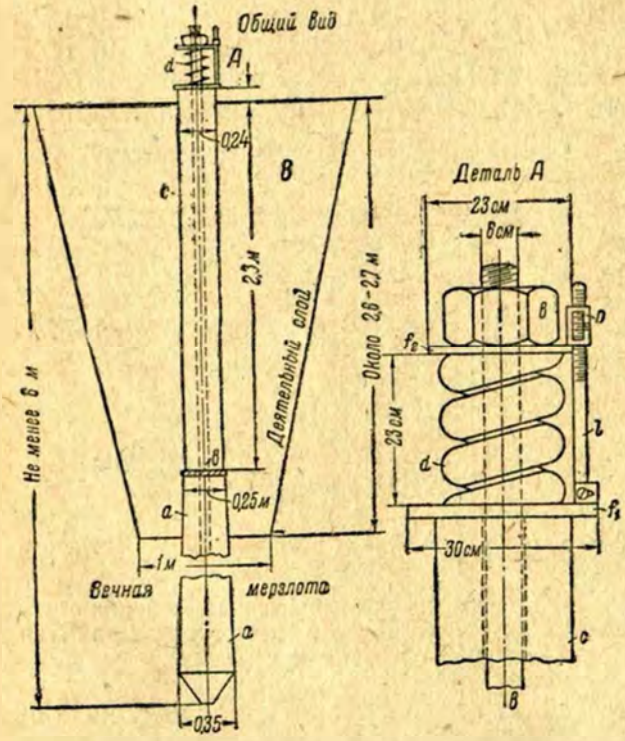
Фиг. 172. Полевая установка для определения смерзания грунта с деревом и другими материалами по Цытовичу — Сумгину

Прибор состоит из железобетонной, уширяющейся книзу, сваи *a* с центрально заделанным в нее железным стержнем *b* диаметром 6 —7 *см*. Свая эта тем или иным способом заделывается в землю, т. е. забивается при помощи паровой иглы или заливается полужидким грунтом в заранее проделанном отверстии. Забивка или заливка производится в заранее вырытом шурфе *B*, который вырывается с таким расчетом, чтобы дно его достигало вечной мерзлоты, а верх железобетонной сваи несколько выступал над этим дном. На верх сваи укладывается из пакли или из войлока диск, обильно пропитанный техническим вазелином, а на проходящий сквозь этот диск стержень надевается цилиндр из дерева, бетона или железобетона. Этот полый цилиндр отмечен буквой *c* и может быть сделан цельным или составным; в последнем случае он скрепляется двумя хомутами. Цилиндр этот должен свободно надеваться на стержень *b*, зазор же между стержнем и цилиндром в 1 —2 *мм* должен быть заполнен вазелином.

Поверх цилиндра кладется железный диск f_1, затем надевается пружина *d*, далее следует второй железный диск f_2. Гайка на верху стержня *b* плотно сжимает и диски и пружину. После этого устанав-

лива ется линейка *l* с нониусом *n*, свободно опирающимся на железный диск f_2. После этого шурф *B* засыпается с плотной утрамбовкой вынутым грунтом или тем материалом (песком, шлаком и т. д.), которым хотят засыпать фундамент.

Такой прибор лучше устанавливать в марте — июне, чтобы вечно мерзлый грунт успел хорошо примерзнуть к низу прибора. С началом заморозков в октябре грунт или засыпка, примерзшие к полому цилиндру, начнут пучить и стремиться приподнять цилиндр *c*. Это усилие начнет сжимать пружину *d*, приподнимая в то же время линейку *l*, перемещение которой нетрудно определить по нониусу *n*.



Фиг. 173. Прибор для определения прочности смерзания – пучиномамометр

Предварительная градуировка пружины позволит с достаточной точностью определить по деформации пружины выдергивающее усилие.

Если разделить определенное усилие на периметр полого цилиндра, то получим выдергивающее усилие, отнесенное к погонному сантиметру периметра, что практически и является, повидимому, наиболее правильным.

Из самого способа действия прибора вытекает, что при установке нужно остерегаться, чтобы вазелин или смола не попали на поверхность испытываемого цилиндра даже в том случае, если, например, смолой предположено покрыть стойки фундамента. Дело в том, что подобное покрытие смолой, гудроном или вазелином может в первое время в сильной степени повлиять на прочность смерзания грунта с цилиндром, уменьшив ее, что, однако, не будет показательно, так как срока благоприятного действия любого из таких покрытий мы не знаем. Точно так же в порядке окончательных изысканий было бы нецелесообразно засыпать котлован прибора промазученным песком, так как даже полное отсутствие пучения, а стало быть, и смерзания между таким песком и цилиндром не дало

бы уверенности, что эти хорошие показатели сохранятся надолго — на срок амортизации сооружения.

Такого рода длительные испытания, конечно, должны производиться исследовательскими станциями, но не при изысканиях, при которых должны испытываться материалы и засыпки, свойства которых остаются заведомо длительное время неизменными. Таковы бетон, песок, гравий, местный грунт, дерево и т. п.

Здесь необходимо отметить, что описанный прибор (фиг. 173) на практике еще не испытан. Опыты с пучиномером и другие исследования дают, однако, уверенность, что прибор будет действовать удовлетворительно и даст возможность получить необходимые данные.

Что касается сваи *а*, то ее лучше делать квадратного сечения. При отсутствии паровой иглы или невозможности сделать отверстие для опускания сваи *а* ее можно, конечно, заменить более коротким стержнем, заякоренным внизу на глубине 1—1,5 *м* ниже верхней границы вечной мерзлоты. Якорь может иметь квадратное или иное сечение и должен быть рассчитан на выдергивание, как будет указано в главе VI.

Прибору для определения прочности смерзания, показанному на фиг. 173, может быть дана и другая конструкция. Можно, например, заставить поднимающийся цилиндр *с* сжимать какую-либо незамерзающую жидкость и давление, передаваемое на жидкость, измерять манометром. Проект такого прибора в настоящее время разрабатывается на Сковородинской станции.

При отсутствии каких бы то ни было приборов в крайнем случае можно перейти к тем установкам, которые применялись на Сковородинской станции при изучении пучения под нагрузкой (см. главу III, § 21). Схема установки дана на фиг. 104.

Здесь, конечно, приходится итти ощупью при определении той минимальной нагрузки, которая должна уравновесить выдергивающие силы пучения.

Воспользовавшись уже полученными данными на Сковородинской станции, нагрузки эти можно выбирать примерно в пределах 90 — 150 *кг* на погонный сантиметр периметра поперечного сечения стержня в пределах деятельного слоя.

В случае невозможности забить сваю ее можно заменить хорошо заякоренным в вечной мерзлоте на глубине 1 — 1,5 *м* бревном, причем якорь должен быть рассчитан на выдергивание.

Столбы, на которые передается давление от рычага, в отличие от того, как показано на фиг. 104, заглубляются до укладываемых под ними подушек, распределяющих давление. Подушки, распределяющие давление, укладываются непосредственно на поверхности вечной мерзлоты. Размеры подушек в плане определяются так, чтобы давление на грунт не превышало 1 *кг/см*^{2}.

§ 37. Изыскания для шоссейных и железных дорог

Если при выборе строительной площадки для промышленного и жилищного строительства в районах вечной мерзлоты мерзлотные изыскания имеют большое значение (лучший в мерзлотном отношении

участок оказывается по большей части лучшим и в других отношениях), то этого нельзя сказать о дорожных изысканиях, и лучшая в мерзлотном отношении трасса вовсе не является лучшей в экономическом и строительном отношениях.

Это происходит потому, что жел.-дор. изыскания, как говорит Оппенгейм, отнюдь не являются чем-то обособленным от проектирования дороги, а представляют известную стадию проектирования. Проектирование же дороги обусловливается таким разнообразным комплексом различных требований к трассе, что требование наилучших условий в мерзлотном отношении далеко не всегда может быть удовлетворено.

Роль изыскателя-мерзлотоведа здесь сводится лишь к тому, чтобы внести свои коррективы, отметив в каждом участке намеченной трассы, какие неудобства он представляет в мерзлотном отношении и с какими дополнительными расходами сопряжено сооружение дороги на этом участке, а также может ли улучшить положение передвижка трассы в пределах той полосы, которая обыкновенно исследуется при изысканиях.

Что же должен внести мерзлотовед в комплекс изысканий, чтобы они были в достаточной мере освещены в мерзлотном отношении?

Наиболее серьезными специфическими явлениями вечной мерзлоты, нарушающими нормальный режим земляного полотна, являются наледи и провалы. Первые неразрывно связаны с наличием ручьев, рек и подземных текучих грунтовых вод, вторые — с наличием подземных включений льда.

Таким образом, мерзлотоведу прежде всего надлежит выяснить гидрологические и гидрогеологические условия трассы и наличие или отсутствие в пределах изучаемой полосы подземных включений льда. В связи с этим, независимо от того, проектируется ли выемка или насыпь, необходимо знать, имеются ли грунтовые воды, а если они имеются, то мощность этих подземных потоков, их направление и, наконец, характер, толщину и элементы залегания водоносных слоев. Необходимо при этом выяснить и возможность отвода вод, что связывается с рельефом местности и с характером напластований.

Выяснение подземных включений льда делается при помощи бурения. Если запроектирована насыпь, то разведочное бурение достаточно произвести на 1 — 1,5 *м* ниже деятельного слоя. Однако если местность, на которой запроектирована насыпь, представляет марь или торфянистое болото, т. е. если мощность деятельного слоя исследуемого участка мала и может легко увеличиться вследствие обжития, удаления вод, уничтожения мохового покрова и т. д., то обследование нужно производить на глубину не менее 4 *м*.

Таким образом, исследование глубины залегания ледяных включений можно, как правило, ограничить глубиной 4 *м*, если только на участке, где возводится насыпь, не предполагается устройства других сооружений, требующих рытья выемок и канав на глубину, большую 1 *м*.

При устройстве выемок тоже можно ограничиться глубиной исследования в 4 *м*, но только ниже дна будущих кюветов, так как мы

знаем, что после устройства выемки вечная мерзлота отступит примерно на толщину деятельного слоя и верхняя граница вечной мерзлоты повторит приблизительно вновь образованный при устройстве выемки профиль.

Описанные исследования надо вести вдоль трассы, располагая скважины в расстоянии 50 *м* одна от другой, исключая, конечно, скальные грунты и др., где рассчитывать на такие включения не приходится.

В местах, где будут встречены ледяные включения, исследования ведут более подробно, т. е. на всю ширину выемки или насыпи, добавляя к ширине 15 — 20 *м* и располагая скважины в расстоянии не более 15 *м* одна от другой. Признаком возможности нахождения таких включений могут служить иногда значительные ледяные прослойки в толще вечной мерзлоты, достигающие толщины 2 — 3 *см* и более, как это видно на фотографии фиг. 6.

В случае нахождения включений значительной мощности и протяженности, залегающих верхней поверхностью в указанных выше пределах исследований, необходимо принять меры к дополнительному обследованию достаточно широкой полосы вдоль трассы с целью выяснения возможности уйти из района распространения этих включений, так как они могут создать серьезную угрозу возможности проведения земляного полотна, в особенности выемки.

Найденные включения по возможности оконтуривают и наносят на план с указанием их мощности. Если районы больших включений, тянущихся иногда на километры, обнаружить нетрудно, то нельзя того же сказать о мелких включениях размерами, например, от 0,5 — 2,0 *м*, разбросанных иногда самым прихотливым образом. Нет никакой уверенности, что в процессе изысканий некоторые из них не будут пропущены.

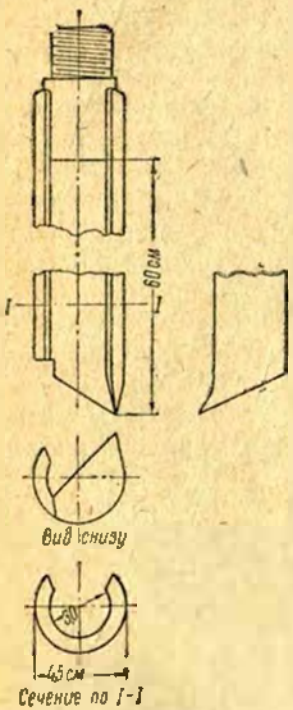
При устройстве насыпей эти пропущенные включения льда будут играть незначительную роль и лишь в исключительных случаях, например при исключительном понижении вечной мерзлоты, дадут о себе знать. При устройстве выемок риск провалов в местах пропущенных включений значительно больше, и потому в первый год существования полотна на своевременное обнаружение и ремонт таких деформаций должно быть обращено самое серьезное внимание.

Из этого же сопоставления мы видим, что при трассировке изыскатель, в особенности в местах распространения пылеватых супесков и суглинков, должен по возможности избегать выемок и отдавать предпочтение насыпям, которые не рекомендуется делать высокими. Что же касается проведения трассы на склонах южной или северной экспозиции, то вопрос о преимуществах того или иного проведения нужно считать пока совершенно невыясненным.

Естественнее всего поручить той партии, которая будет исследовать грунтовые воды, их движение, водоносные пласты и ледяные включения, также и анализ грунтов и определение их влажности, хотя это непосредственно к вечной мерзлоте и ее проявлениям и не относится. И влажность и гранулометрический состав важны, конечно,

для определения заложения откосов, насыпей и выемок, для суждения о пучинистости и т. п., но специфически вечно мерзлого в этом, конечно, ничего нет.

Что касается перехода оврагов, ручьев, рек, т. е. всех тех мест, где намечаются искусственные сооружения, то они, конечно, исследуются особо и более подробно и прежде всего в отношении вечной мерзлоты, которая в этих местах вследствие наличия текучих вод иногда уходит так глубоко, что с ней совершенно не приходится считаться, а приходится иметь дело с явлениями глубокого промерзания, в частности с пучением.



Фиг. 174. Ложка для бурения мерзлых пылеватых суглинков и супесей

В соответствии со сказанным в местах возведения искусственных сооружений изыскателям надлежит составить мерзлотный профиль, который бы давал живое сечение ручья или оврага, деятельный слой под ним и вне его в пределах подходов к искусственному сооружению, верхнюю границу вечной мерзлоты, геологическое строение и гранулометрический состав напластований — и все это до глубины, превышающей предполагаемую глубину заложения фундаментов искусственных сооружений на 4 — 5 *м*, если не встретится скалы. В случае обнаружения скалы кроме необходимого числа буровых скважин, дающих картину напластований грунтов, покрывающих скалу, и картину залегания скалы, закладывается один-два шурфа с целью определения качества скалы (разборная, трещиноватая, водоносная) и определения ее мощности, для чего она должна быть разобрана или пробурена по крайней мере на 1,5 *м*.

Кроме продольного профиля и разреза необходимо дать в зависимости от размеров сооружения и характера напластований один, два или более поперечных профилей.

Переход рек лучше делать в глубоких местах, так как мелкие скорее промерзают и в них можно скорее ожидать и более сильного сужения живого сечения вследствие промерзания и даже соединения зимнего промерзания с вечной мерзлотой, что может повлечь за собой образование нежелательных наледей.

Все сказанное не относится к большим искусственным сооружениям, где применяются глубокие фундаменты, кессоны, опускные колодцы и т. п. и где изыскания должны быть подчинены ряду дополнительных требований, которые определяются естественными условиями перехода, а также размерами, характером и материалом сооружения. Что же касается обследования мест, предназначенных для создания поселков и крупных станций со всеми необходимыми обу-

стройствами, то таковые должны производиться в том объеме, как это предусмотрено выше для поселкового и промышленного строительства.

Изыскание источников водоснабжения составляет специфическую область, которой мы здесь не касаемся.

Мы умышленно не связывали дорожных мерзлотных изысканий с каким-либо календарным планом, так как эти изыскания, как указывалось выше, не имеют самостоятельного значения и связаны с целыми комплексами других, часто не менее важных и не менее сложных требований. Мы указали лишь ряд сроков исследований, необходимых для того, чтобы мерзлотные изыскания были полноценными.

Таким образом, мерзлотные изыскания с учетом указанных сроков должны войти как часть в общий календарный план изысканий, который должен быть составлен с учетом всех необходимых требований.

Мы не касались изысканий для шахтного строительства и изысканий под гидротехнические сооружения, так как надлежащего опыта изысканий для этих сооружений, повидимому, нет и положительные и отрицательные стороны этого строительства недостаточно изучены.

В заключение этой главы на фиг. 174 дан чертеж буровой ложки, применявшейся при бурении скважин в мерзлых пылевато-суглинистых и супесчаных грунтах на Сковородинской мерзлотной станции. На такой форме ложки остановились в результате ряда попыток стахановцы мерзлотной станции, рабочие Герман и Колбаса. Применение такого напарья и правильная организация труда позволили увеличить выработку до 300 — 400%.

ГЛАВА VI

ФУНДАМЕНТЫ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

§ 38. Несколько общих замечаний об устройстве фундаментов в районах распространения вечной мерзлоты

Из предыдущих глав известно о характере неудач, которые постигли строителей, и подробно разобраны причины аварий и деформаций сооружений, построенных на вечной мерзлоте без учета ее специфических свойств.

Однако не все сооружения, построенные по привычным методам, не приноровленным к мерзлотным условиям, терпят деформации. Есть много сооружений, которые в течение многих лет ведут себя вполне удовлетворительно, не обнаруживая никаких деформаций (например, многие железнодорожные мосты, жилые здания в г. Незаметном и т. д.). В Сковородине же большинство домов в большей или меньшей мере деформировано.

Однако следует заметить, что видимое благополучие некоторых сооружений является обманчивым, так как приходилось наблюдать в Сковородине дома, которые 2—3 года стояли повидимому благополучно, а затем начали заметно деформироваться. Но эта оговорка о кажущемся благополучии некоторых сооружений сделана не для того, чтобы умалить сделанное ранее утверждение, что многие сооружения, построенные на вечной мерзлоте без учета ее наличия, устойчивы, а для констатации того, что деформации могут появляться не сразу. Поэтому мы полагаем, что не всегда при строительстве на вечной мерзлоте требуются особые приемы, отличные от применяемых в районах, где вечной мерзлоты нет. В известных случаях, как увидим, можно строить так, как если бы никакой мерзлоты не было.

Последнее, однако, нельзя обобщать и делать вывод о возможности вообще не считаться с мерзлотными условиями, а деформации здания, появляющиеся из-за пренебрежения этими условиями, относить только за счет небрежности строительства, невыполнения строительных правил и т. д. Такой упрощенный взгляд, разделяемый некоторыми строителями, причинил, конечно, много вреда строительству в районах вечной мерзлоты и имел результатом непроизводительную трату не одного миллиона рублей.

Не менее ошибочен взгляд, что в районах распространения вечной мерзлоты всегда необходимо применение особых приемов и притом одних и тех же во всех случаях, если только будет обнаружено наличие вечной мерзлоты.

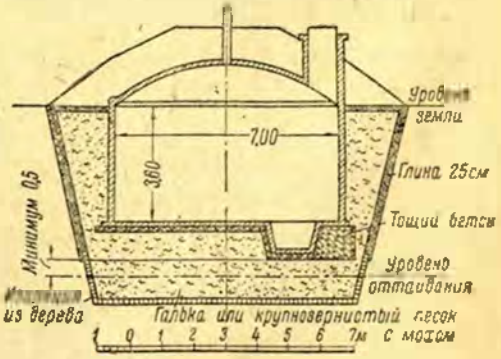
В качестве примера рекомендации применения универсальных типов фундаментов для районов распространения вечной мерзлоты во всех случаях, без всяких оговорок, приведем пример решения одной из проектных организаций, которой предлагалось устройство

Фиг. 175. Вариант фундаментов при вечной мерзлоте

Фундамент под внутренние стены (слева); фундамент под наружные стены (справа)

фундаментов по типу, указанному на фиг. 175. Этот тип учитывал только глубину заложения подошвы в зависимости от глубины залегания верхней границы вечной мерзлоты.

Аналогичное решение для районов вечной мерзлоты предлагает та же проектная организация для устройства заглубленных в землю баков для воды и для целого ряда других сооружений. Так, для устройства баков для воды предлагается решение, показанное на фиг. 176.



Фиг. 176. Установка резервуара в вечномерзлых грунтах

По нашему мнению, изображенные на фиг. 175 и 176 проекты совершенно не продуманы, а универсализм решений является по существу совершенно неправильным, что видно будет из нижеизложенного. Бедность фактически проверенного материала не дает возможности пока классифицировать возможные типы рациональных фундаментов, спроектированных с учетом мерзлотных условий, а потому мы приведем лишь несколько примеров различных решений с учетом данных исследований и изысканий. Эти примеры, как мы

полагаем, помогут строителям найти более или менее верное и надежное решение и в других случаях.

Некоторые авторы (34, гл. III, 70, стр. 185) предполагают установить классификацию принципов строительства фундаментов на вечной мерзлоте, исходя из характера воздействия сооружения на режим вечной мерзлоты как в процессе строительства, так и в процессе дальнейшей эксплуатации сооружения.

Этой классификацией предусматриваются:

1) активный метод, т. е. метод «уничтожения» вечной мерзлоты;

2) пассивный метод, когда строитель проектирует сооружение так, что мерзлотный режим остался ненарушенным; сооружение, построенное по этому методу при пучении грунтов, перемещается, как одно целое, не разрушаясь при этом;

3) симбиотический метод, при котором сохраняется мерзлота и применяются такие конструкции фундаментов, которые обеспечивают сооружению устойчивость; примером такого строительства может служить сооружение, построенное на прочно заделанных в мерзлоту сваях.

Несмотря на видимую простоту, эта классификация при сопоставлении с реальными условиями дает не три, а множество решений и, кроме того, сама по себе она не отличается достаточной четкостью. В самом деле, пусть в районе распространения вечной мерзлоты, в месте, где грунт не пучит и при оттаивании не деформируется, построено какое-нибудь здание по тем старым методам, которые не учитывают ни мерзлоты, ни глубокого промерзания. При указанных выше условиях здание должно прекрасно стоять независимо от того, будет ли оно само источником значительных тепловых потоков или нет, будет ли оно «уничтожать» мерзлоту или нет.

Спрашивается, какой метод здесь применен: активный, пассивный или симбиотический. Удовлетворительного ответа на этот вопрос, повидимому, получить невозможно. Трудно также уяснить, что значит «уничтожение» мерзлоты.

Если мощность вечно мерзлого слоя невелика, например 0,5 — 1,0 *м*, то уничтожить такую сомнительную вечную мерзлоту еще можно, но говорить об уничтожении мерзлоты при мощности ее, например, в 20 *м* и более, конечно, не приходится. В последнем случае возможно изменение температурного режима с некоторым местным временным понижением верхней границы вечной мерзлоты, что, по терминологии авторов, создавших упомянутую выше классификацию, ничем в принципе не отличается от симбиотического метода. Поэтому мы полагаем, что от этой классификации следует воздержаться.

Об этой не совсем удачной классификации методов строительства на вечной мерзлоте можно было бы и не говорить, если бы эта классификация не получила известного распространения и не проникла почти без изменений во «Временные технические условия на изыскания, проектирование и сооружение железных дорог в условиях вечной мерзлоты», где она предопределяет в ряде случаев метод строительства.

Так, по поводу метода строительства с уничтожением вечной мерзлоты в упомянутых «Временных технических условиях», на стр. 54 и 55 сказано, что «этот метод технически целесообразен и экономически выгоден при деградирующей вечной мерзлоте, при слоистой мерзлоте и т. д.».

Из этого положения вытекает непосредственный вывод, что метод уничтожения вечной мерзлоты является целесообразным и экономически выгодным для Сковородина и других аналогичных районов, так как в Сковородине, по определению Сумгина — автора гипотезы о деградации, — вечная мерзлота является деградирующей (60, стр. 310). А между тем такой вывод, как мы увидим далее, является ошибочным.

Примечание. Так как к указаниям «Временных технических условий на изыскания, проектирование и сооружение железных дорог в условиях вечной мерзлоты», изданных в 1939 г. и составленных по инициативе Научно-исследовательского института пути и строительства, нам придется обращаться и далее, то и в дальнейшем для краткости мы их будем обозначать так: «Вр. Т. У.».

§ 39. Фундаменты при деятельном слое из непучинистых грунтов

Случай устройства фундаментов при деятельном слое из непучинистых грунтов является наиболее простым, так как выдергивания и приподнимания фундаментов силами пучения ожидать не приходится и, следовательно, никакого заякоривания фундаментов делать не следует.

Если грунт деятельного слоя не пучит при замерзании, то он не будет оседать и при оттаивании. Таким образом, промерзание и оттаивание не могут вызвать деформации фундаментов. В данном случае не следует добиваться того, чтобы подошва фундамента непременно закладывалась на вечной мерзлоте, если к этому не побуждают какие-либо другие причины. Однако и в этих условиях вопрос о характере вечно мерзлых грунтов и об их несущей способности с сохранением их мерзлого состояния или их таяния остается в полной силе. Если по типу сооружения протаивания вечной мерзлоты можно не опасаться, то фундаменты сооружения могут быть основаны как в пределах деятельного слоя, так и на вечной мерзлоте, причем фундаменты эти устраиваются так, как если бы никакой мерзлоты не было.

Если подошва фундаментов намечается в пределах деятельного слоя и предполагается, что грунт будет оттаивать, то допускаемое напряжение на грунт должно быть выбрано в соответствии с исследованиями грунта деятельного слоя в талом состоянии, что делается по правилам и нормам, установленным для талых грунтов. Здесь следует помнить, что несущая способность грунтов весной в процессе их оттаивания меньше, чем осенью, о чем подробно говорилось в главе III при анализе установки $Б_3$. Правда, указанный выше факт установлен для сильно увлажненных грунтов, которые вследствие этого пучат, но ввиду недостаточной изученности этого вопроса рекомендуется ради осторожности вести испытание несущей способности и для менее влажных, непучащих грунтов весной в период их протаивания.

В случае, если фундамент предполагается основать на поверхности или в толще вечной мерзлоты и есть уверенность, что мерзлое состояние сохранится, то грунт испытывается, как сказано в предыдущей главе, при помощи штампа.

В случае, если в сооружении имеются значительные источники тепла и под подошвой фундамента этого сооружения можно опасаться оттаивания мерзлоты, то эту возможность надо учесть как при составлении проекта, так и при строительстве.

Выше мы выяснили, что если предварительными исследованиями обнаружено, что деятельный слой при оттаивании и замерзании не деформируется, то опасаться, например зимой, перехода этого слоя под сооружением из мерзлого в талое состояние и обратно (при правильно назначенном напряжении на грунт) не приходится.

Из этого следует, что не опасно и протаивание вечно мерзлых грунтов, если они по гранулометрическому составу аналогичны грунтам деятельного слоя и если их влажность (что особенно важно) не превосходит влажности деятельного слоя. То же самое относится и к вечно мерзлым слоям, если они будут содержать камни, гравий и если грунт, цементирующий эти крупные включения, будет не более влажен, чем аналогичный грунт пучащего деятельного слоя.

Указанное также будет справедливо, когда вечно мерзлый грунт представляет скалу. Не следует только забывать, что иногда скала, находящаяся в пласте вечной мерзлоты, при оттаивании рассыпается в порошок.

Считая вполне возможным в рассматриваемых условиях непучащих грунтов заложение фундаментов в пределах деятельного слоя, следует признать, что периодически замерзание и оттаивание грунта под фундаментом является нежелательным и под ответственными сооружениями, рассчитанными на длительный срок существования, этого следует избегать, так как здесь может происходить процесс разрушения грунта от периодического замораживания и оттаивания.

То же надо сказать и о заложении фундаментов в вечной мерзлоте. Пусть мерзлота такова, что при переходе в талое состояние она не дает осадки под некоторой нагрузкой. Сооружение, построенное на таком мерзлом грунте, при надлежаще выбранном давлении на него будет стоять вполне устойчиво, даже если грунт под этим сооружением частично оттает. Но будет несколько хуже, если граница, отделяющая мерзлую зону от талой, проходящая под фундаментом, будет со сменой времен года или по другим причинам изменять свое положение, т. е., если некоторый объем грунта будет попеременно то в талом, то в мерзлом состоянии. Это обстоятельство надо иметь в виду при проектировании и строительстве.

§ 40. Фундаменты в условиях пучащего деятельного слоя

Пусть на основании предварительных изысканий на строительной площадке установлено следующее:

1) площадка горизонтальная и отвод возможных грунтовых или производственных вод весьма затруднителен;

2) под растительным и частью торфяным покровом залегает слой пылеватых суглинков мощностью от 6 — 8 *м*, ниже — галька;

3) влажность суглинков в деятельном слое колеблется в пределах от 18—21% по отношению к весу влажного образца, так что они являются пучинистыми, что подтверждают и наблюдения над пучиномерами, дающими величину пучения до 17 *см*;

4) состав суглинков (по данным лабораторных испытаний) довольно однородный, что подтверждается и исследованиями над протаиванием непосредственно на участках, где предполагается разместить здания, т. е. разница в глубине протаивания в различных точках не превышает 0,3 *м*;

5) грунтовых вод нет;

6) наибольшее протаивание на площадках оголенных или покрытых травянистым покровом достигает 2,5 *м*; под моховым покровом наибольшее протаивание равно 1,2 *м*, по снятии мохового покрова достигает 2,4 *м*;

7) вечная мерзлота, лежащая ниже границы наибольшего оттаивания, довольно однородна и имеет тонкие прослойки чистого льда, не превышающие 0,5 *см*; влажность вечно мерзлых грунтов достигает 24—26% по отношению к весу естественного образца;

8) наивысшая температура грунтов на глубине 5 *м* равна —0,4°; температура на глубине 10 *м* постоянна и равна —0,8°, а на глубине 20 *м* равна —1,0°;

9) силы выдергивания, по данным опыта, достигают 170 *кг* на 1 *пог. см* периметра сечения круглого деревянного столба диаметром 24 *см*, заглубленного до верхней границы вечной мерзлоты. Это значит, что прибор для определения прочности смерзания, пучинодинамометр показал, что при таком сопротивлении пучению деревянного цилиндра пучащий грунт уже не может приподнять этот цилиндр, а отрывается от него и скользит по его поверхности вверх;

10) грунт на глубине 3,5 *м* при давлении на штамп, равном 8 *кг/см*^{2}, испытывался в течение 10 месяцев; в первый месяц штамп дал осадку 2 *мм*, а в последующие месяцы — нулевую; максимальная температура на этой глубине была за это время —0,3°.

Эти данные изысканий следует признать благоприятными для строительства, но неправильно в этом случае намечать «уничтожение» мерзлоты с допущением ее протаивания под фундаментами, несмотря на то, что данные о температурах на глубине 10 и 20 *м* заставляют отнести эту мерзлоту, по принципу Сумгина, к деградирующей, а «Вр.Т.У.», как мы уже отмечали выше, рекомендуют уничтожение такой мерзлоты.

Точно так же не следует рекомендовать устройства дренажа и дренирующей засыпки фундамента, о которой будет сказано ниже. В этом случае нельзя также основывать фундаменты в пределах деятельного слоя, так как именно при наличии влажных пылеватых грунтов возможно погружение сооружений в оттаивающий под ними грунт.

Поэтому указание Цытовича и Сумгина (60, стр. 389) на то, что для деревянных зданий жилого типа можно ограничиться упрощенными фундаментами из лежневых опор или на городках и клетках, требует

ограничений, а именно: лежневые опоры и городки можно допустить лишь там, где деятельный слой не пучит, на пучинистых же пылеватых и илистых суглинках строительство жилых зданий и других, требующих известной стабильности, недопустимо.

Конечно, если на таких грунтах построить на лежневых опорах или на городках холодный сарай или даже жилой дом, то ничего особенного не случится, никакой внезапной катастрофы не произойдет, но штукатурка в таких домах держаться не будет, печи и трубы будут разрушаться. Перекосившиеся сараи, уборные и дома весьма распространены в районах вечной мерзлоты и служат наглядным доказательством того, что строительство на лежневых опорах или городках при наличии суглинков недопустимо.

Деревянные фундаменты

Пусть, например, на строительной площадке, характеристика которой приведена выше, требуется построить здание, причем тепловые процессы внутри него таковы, что при надлежаще устроенном подполье вечная мерзлота сохраняется.

Допускаемое давление на грунт под фундаментом можно принять равным 4 *кг/см²*. Выдергивающее фундаменты усилие при пучении грунтов с некоторым запасом принимаем равным $t = 200$ *кг* на 1 *пог. см* периметра поперечного сечения фундамента, а допускаемое напряжение t_2 вечно мерзлого грунта на срезывание принимаем равным 0,75 *кг/см²*.

Фундаменты предполагается сделать в виде деревянных стоек диаметром $d = 24$ *см* с надлежащей заделкой в вечной мерзлоте против выпучивания. Максимальное расчетное давление на такую стойку с учетом временных нагрузок $P_1 = 12$ *т*. Давление на ту же стойку без учета временных нагрузок $P'_1 = 6$ *т*. Допускаемые напряжения для стоек из лиственницы: сжатие равномерное $n_1 = 110$ *кг/см²*; скалывание равномерное продольное $t = 15$ *кг/см²*; смятие второго рода частичное (на части ширины и длины) для врубленных в стойку брусьев $n_{c_2} = 50$ *кг/см²*.

Рассматриваемая стойка будет работать в следующих условиях. Летом и осенью — во время наибольшего протаивания, когда выдергивающие силы пучения будут отсутствовать, — на стойку будет действовать при полной нагрузке максимальное сжимающее усилие $P_1 = 120$ *т* (невыгодный случай). Поздней осенью и в начале зимы—в период интенсивного пучения грунтов, — на стойку будет действовать кроме давления от вертикальных нагрузок еще выдергивающее усилие, действующее снизу вверх и равное $\pi d \cdot 200 = 15$ *т*. Максимальное возможное выдергивающее и растягивающее стойку усилие будет при этом равно $P_2 = 15 - 6 = 9$ *т*, где 6 — минимальное давление на стойку (P'_1).

Устройство стойки принимаем согласно фиг. 177, из которой видно, что в стойку внизу врублены два коротыша длиной по 1 *м*, отесанные на два канта. Эти два коротыша соединены со стойкой кроме врубки еще болтом и, с одной стороны, служат для распределения давления от стойки на мерзлый грунт, а с другой, — являются якорем, которым стойка заделывается в вечную мерзлоту.

Произведем проверку прочности этой стойки. Так как сжимающее усилие $P_1 > P_2$, то наибольшее напряжение стойки на сжатие, а врубленных в стойку коротышей на смятие будет при нагрузке $P_1 = 12$ *т*.

Пусть ω_2 — ослабленное врубками и болтовым отверстием сечение стойки равно 220 *см*², далее $\omega_1 = \omega'_1$ 110 *см*² представляют площадки на коротышах, которым передается давление от стойки; коротыши будут работать на смятие.

Сминаемая площадь

$$\omega_1 + \omega_1' = 220 \text{ см}^2.$$

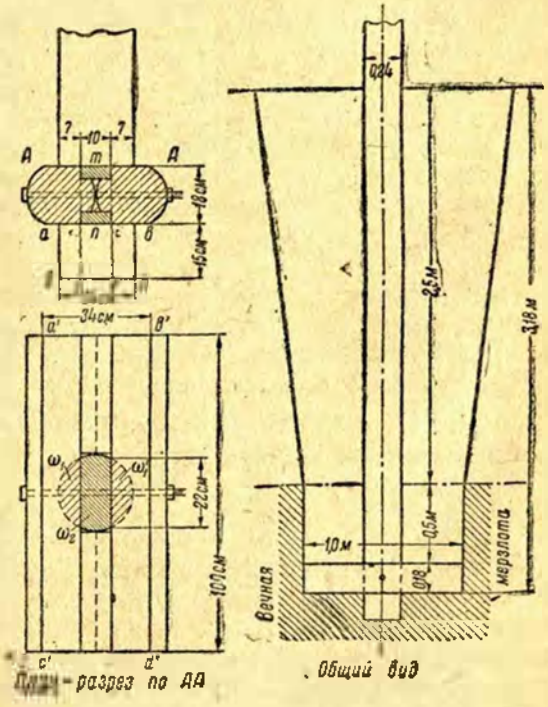
Напряжение стойки на сжатие

$$n_1 = \frac{P_1}{\omega_2} = \frac{12\,000}{220} = 55 \text{ кг/см}^2 < n_1. \qquad (1)$$

Напряжение на смятие

$$n_{c_1} = \frac{P_1}{\omega_1 + \omega_1} = \frac{12\,000}{220} = 55 \text{ кг/см}^2 > n_2. \qquad (2)$$

Напряжение на смятие, как видим, несколько превышает допускаемое напряжение, что, однако, можно допустить, так как часть усилия P_1, производящего смятие, будет погашаться примерзшим к стойке грунтом в пределах вечной мерзлоты. Давление на грунт можно считать передающимся по площади $a'b'c'd'$ (см. план фиг. 177), за вычетом площади поперечного сечения стойки, так как осуществить одновременную работу в горизонтах ab и gh практически при строительстве нельзя. При постройке котлован вырывается до горизонта ab, а для нижележащего конца стойки вырывается небольшое углубление.



Фиг. 177. Проект фундаментной стойки

Для использования при передаче давления на грунт и пространства между двумя коротышами, охватывающими стойку, укладываются бруски *m* и *n*, которые увеличивают площадь передачи. Эти бруски прикрепляются к лежням гвоздями.

Под площадкой с врезанным бруском *n* для возможно равномерной передачи давления подсыпается слой сухого песка толщиной до 2 *см*.

Площадь $a'b'c'd'$, равная ω_3, по которой передается давление на грунт, будет равна

$$\omega_3 = 100 \cdot 34 - \pi \cdot 12^2 = 2\,950 \ см^2.$$

Давление на вечно мерзлый грунт будет

$$n' = \frac{P_1}{\omega_3} = \frac{12\,000}{2\,950} = 4{,}04 \ кг/см^2.$$

Если бы растягивающее и выдергивающее стойку усилие P_2 было бы больше P_1, то в формулу, определяющую смятие коротышей, вместо P_1 пришлось бы поставить P_2. Работа же стойки на растяжение определилась бы так:

$$n_p = \frac{P_2}{\omega_3}.$$

Такие случаи в практике вполне возможны. Это бывает, если стойка не имеет вертикальной нагрузки, если не считать собственного веса (например, столб ограды, репер и т. п.).

Можно также сделать проверку прочности врубленных в стойку лежней на изгиб под действием, с одной стороны, силы реактивного давления грунта, а с другой, — веса грунта, находящегося над лежнями. Напряжение на изгиб при совместном действии этих двух нагрузок получится около 130 $кг/см^2$, что несколько превышает допускаемое напряжение. Но надо полагать, что этот расчет является весьма приближенным; в действительности лежни являются вмерзшими в вечно мерзлый грунт, что меняет условия работы этих лежней в запас прочности.

При пучении и выдергивании столба будет действовать растягивающее усилие P_2, равное 9 m. Под влиянием этого усилия нижняя часть стойки будет скалываться по сечениям ef и $e'f'$.

Величина площади скалывания

$$\omega_4 = 2 \cdot 22 \cdot 15 = 660 \ см^2.$$

Скалывающее напряжение равно

$$t' = \frac{P_2}{\omega_4} \approx 13{,}5 \ кг/см^2 < t.$$

Усилие P_2 будет стремиться выдернуть фундаментную стойку вместе с якорем из вечной мерзлоты и сжать лежащий над ней деятельный слой. Пренебрегая весом последней (что в запас прочности), предположим, что при выдергивании вместе со стойкой выдергивается слой вечной мерзлоты, лежащий над лежнями и ограниченный в плане линией $a'b'c'd$.

Поверхность, по которой произойдет при этом скалывание вечной мерзлоты, имеет в плане очертание прямоугольника; высота ее равна высоте вечно мерзлого слоя над лежнями. Площадь этой поверхности равна

$$\omega_5 = 2\,(100 + 34) \cdot h,$$

где h — высота вечно мерзлого слоя над лежнями.

Величина необходимого заглубления h определится из следующих соображений: сила P_2 должна быть меньше или равна сопротивлению вечной мерзлоты на срезывание по площади ω_5.

Ввиду того что вечно мерзлый слой, находящийся над лежнями якоря, расположен непосредственно под деятельным слоем, а также ввиду того что в период пучения температура этого слоя имеет температуру, наиболее высокую и близкую к нулю, допускаемое напряжение t_2 на срезывание мы принимаем равным всего 0,75 *кг/см²*. Исходя из этого, глубина заложения столба определится из выражения

$$\omega_5 \cdot t_2 \approx P_2$$

или

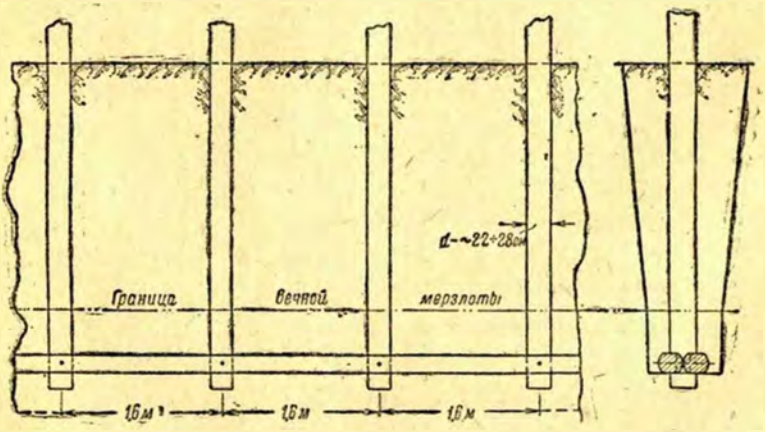
$$2 \cdot 134\ 0{,}75 \cdot h \approx 9\,000\ кг,$$

откуда

$$h = 45\ см.$$

Принимаем $h = 50\ см$.

Из приведенного примера расчета мы видим, на какие усилия должен быть рассчитан фундамент в случае наличия пучащих грунтов. Из этого же примера видим, что чем меньше будет диаметр, а следовательно, и периметр фундаментной стойки, тем меньше будет выдергивающая сила P_2.



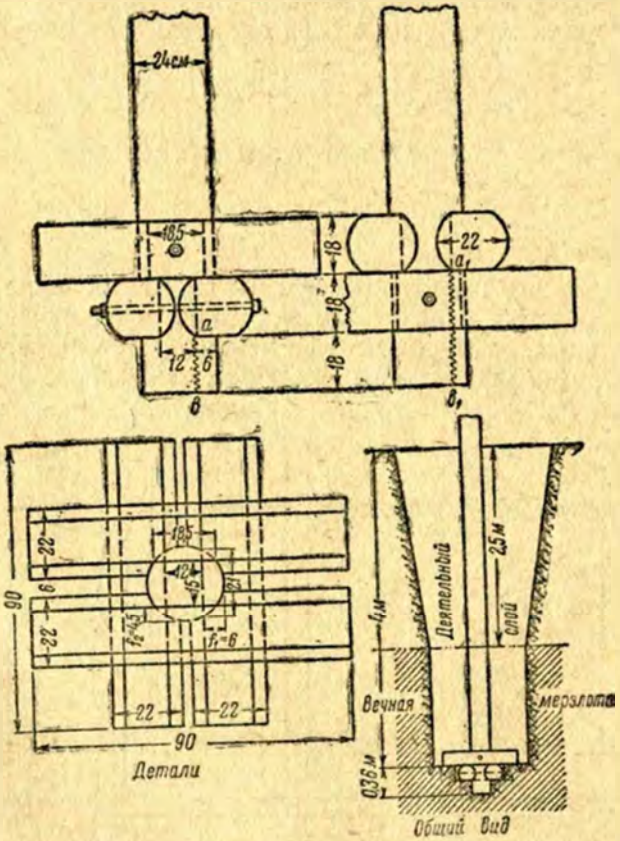
Фиг. 178. Ленточный фундамент

Если по расчету или на основании других соображений стойки располагаются в небольшом расстоянии одна от другой, то бывает целесообразно устраивать ленточный фундамент. В этом случае в нижние концы нескольких стоек врубаются парные схватки, которые соединяются болтами, как это показано на фиг. 178. Расчет такого фундамента ведется в том же порядке, как и состоящего из отдельных стоек.

Для ориентировочных соображений на фиг. 180 даны размеры врубок нижних парных крестообразно расположенных (фиг. 179) схваток

в зависимости от радиуса стойки. Такие врубки обеспечивают до известной степени соответственно равномерную работу на растяжение, смятие и скалывание.

Данными примерами не исчерпываются те конструкции, которые могут быть предложены для практики, но их, по нашему мнению, достаточно для иллюстрации принципов, положенных в основу расчета.



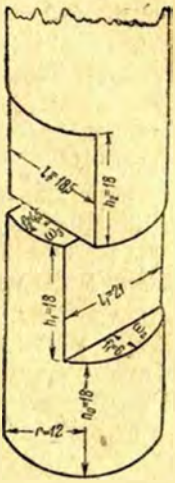
Фиг. 179

Железобетонные фундаменты

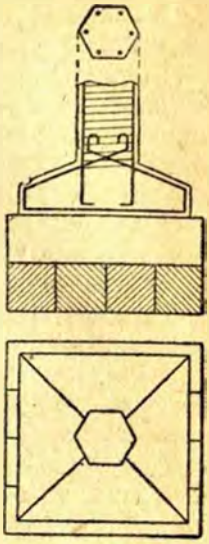
На фиг. 181 дана схема башмака одиночной стойки. Для уменьшения площади смерзания периметр стойки принят шестигранного очертания, а для усиления сечения стойки принята спираль консидера, что, конечно, не является правилом, но может быть рекомендовано при значительных выдергивающих усилиях. Армирование башмака назначается в зависимости от работы стойки, с одной стороны, на сжатие при передаче вертикальных усилий на башмак, что требует

постановки нижней горизонтальной арматуры башмака, а с другой стороны, на выдергивание, когда стойка растягивается, что требует постановки верхней арматуры башмака.

Проверка на сжатие производится от центральной силы P_1, а на растяжение и выдергивание — от силы P_2, являющейся равнодействующей минимального сжатия стойки и направленной вверх выдергивающей силы, приложенной к поверхности стойки. Последняя сила численно равна периметру сечения этой стойки, умноженному на максимальное удельное выдергивающее усилие, отнесенное к погонному сантиметру периметра, определяемое при окончательных изысканиях опытным путем.

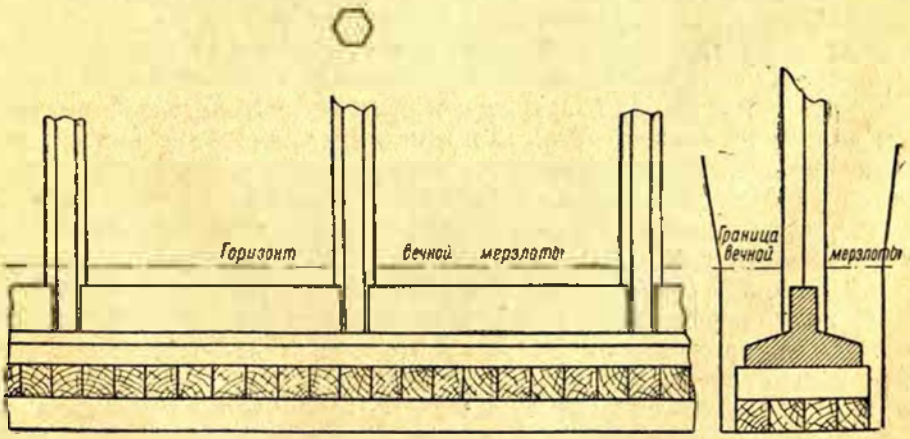


Фиг. 180



Фиг. 181

На фиг. 182 дана схема ленточного железобетонного фундамента. Как отдельная железобетонная стойка, так и ленточный железобетонный фундамент предполагаются заложенными в слое вечной мерзлоты на такой глубине, которая обеспечивала бы прочную их заделку при работе стойки на выдергивание и вечно мерзлого грунта на скалывание.



Фиг. 182. Ленточный железобетонный фундамент

Как под стойкой, так и под ленточным фундаментом, укладывается ростверк из брусьев, который имеет конструктивное и теплотехническое значения.

§ 41. Смерзание с вечной мерзлотой. Выдергивающие силы пучения по Цытовичу и Сумгину. Сопротивление вечно мерзлых грунтов скалыванию

В главе III мы предлагали полученную из двухлетнего опыта величину нагрузки в 120 *кг* на 1 *пог. см* периметра при толщине деятельного слоя в 2,5 *м*, препятствующую пучению цилиндрических и призматических тел, увеличить до 150 *кг* и пользоваться этой величиной при проектировании, если только надлежаще поставленные исследования при окончательных изысканиях для какого-нибудь конкретного случая не дадут иного значения.

Что касается величины 170 *кг* на 1 *пог. см* периметра (при той же толщине деятельного слоя в 2,5 *м*), увеличенной затем для расчета конструкций до 200 *кг*, которой мы только что пользовались при расчете деревянной стойки, то эту величину как произвольно взятую только для примера расчета мы принимать далее во внимание не будем.

Итак, мы полагаем, что 150 *кг* на 1 *пог. см* периметра поперечного сечения столба — это мера максимальной прочности смерзания при непрерывном движении пучащего грунта по поверхности этого столба, когда толщина деятельного слоя равна 2,5 *м*, а грунт, образующий этот слой, представляет пылеватый суглинок, насыщенный влагой до полной или почти полной влагоемкости (см. главу III, § 21).

Попробуем, пользуясь этим, определить хотя бы приблизительно величину прочности смерзания, так сказать, в статическом состоянии, т. е. когда смерзающиеся тела не перемещаются одно относительно другого.

Допустим, что в некоторый момент выдергивающие силы, развивающиеся при пучении, достигли своей максимальной величины, измеряемой 150 *кг* на 1 *пог. см* периметра. Это значит, что на оголенной площадке (см. § 21) все столбы, заделанные на глубину до 4 *м* включительно, будут пучить; но уже столб, заделанный на глубину 4,5 *м*, пучить не будет. Такой вывод получается в результате данных наблюдения. Так как пучению этого столба препятствует смерзание нижней его части с вечной мерзлотой, в которую он заделан на 2 *м*, то это значит, что на продольной полоске шириной в 1 *см*, выделенной на поверхности погруженной в вечную мерзлоту части этого столба, возникает сопротивление выдергиванию, равное 150 *кг*. Прочность же смерзания можно в среднем считать равной этой величине или несколько большей.

Так как сопротивление выдергиванию развивается на полоске длиной 200 *см*, то средняя прочность смерзания на этой полоске может быть оценена в $(150 : 200) = 0{,}75$ *кг/см*^{2}. Но так как температура вечной мерзлоты вдоль выделенной плоскости неодинакова и уменьшается с глубиной, то и прочность смерзания, которая является функцией температуры, тоже неодинакова. Допуская, что вверху на границе вечной мерзлоты прочность смерзания равна нулю и что прочность смерзания растет к основанию столба по линейному закону, мы получим максимальную возможную прочность смерзания равной 1,5 *кг/см*^{2}.

На самом деле истинная максимальная прочность смерзания будет меньше, так как температура вдоль той части столба, которая находится в вечной мерзлоте, изменяется не по линейному закону и прочность смерзания у верхней границы вечной мерзлоты при нулевой температуре вообще не равняется нулю.

Таким образом, максимальная возможная прочность смерзания в рассматриваемых условиях лежит между 0,75 *кг/см²* и 1,50 *кг/см²*, т. е. равна приблизительно 1,1 *кг/см²*.

Посмотрим теперь, каким же реальным температурам соответствуют найденные величины прочности смерзания. Так как наблюдения температур ведутся на глубинах 2,5; 3,2 и 5 *м*, то из таблиц наблюдений мы возьмем температуры для этих глубин, а температуру для глубины 4,5 *м*, определим интерполяцией. Температуры же для глубин 2,5; 3,2 и 4,5 *м* соответствуют точкам у начала заглубления рассматриваемого столба в вечную мерзлоту, внизу у основания столба и в некоторой промежуточной точке на расстоянии 0,7 *м* от верхней.

Данные наблюдений приведены в табл. 32.

Таблица 32

Температуры на глубине от 2,5 до 5,0 *м* на оголенной площадке

Годы	1932			1933			1934			1935		
Месяцы	X	XI	XII	X	XI	XII	X	XI	XII	X	XI	XII
На глубине 2,5 *м*	−0,3	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	0,0	0,0	0,0	−0,1	−0,1	−0,2
	−0,3	−0,2	−0,3	−0,1	−0,1	−0,2	0,0	0,0	−0,1	−0,1	−0,2	−0,2
	−0,3	−0,2	−0,3	−0,1	−0,2	−0,2	0,0	0,0	−0,1	−0,1	−0,2	−0,2
На глубине 3,2 *м*	−1,0	−0,8	−0,7	−1,1	−0,8	−0,6	−0,9	−0,8	−0,6	−0,9	−0,7	−0,6
	−0,9	−0,8	−0,7	−0,9	−0,8	−0,7	−0,9	−0,7	−0,6	−0,8	−0,7	−0,6
	−0,9	−0,8	−0,7	−0,9	−0,8	−0,7	−0,8	−0,6	−0,6	−0,8	−0,6	−0,6
На глубине 4,5 *м* по интерполяции							−1,3	−1,1	−1,0			
							−1,1	−1,1	−1,1			
							−1,1	−1,0	−1,0			
На глубине 5 *м*	−1,3	−1,2	−1,1	−1,5	−1,3	−1,2	−1,4	−1,2	−1,2	−1,4	−1,3	−1,2
	−1,3	−1,2	−1,1	−1,4	−1,2	−1,2	−1,2	−1,2	−1,2	−1,4	−1,3	−1,2
	−1,3	−1,2	−1,0	−1,3	−1,2	−1,2	−1,2	−1,2	−1,2	−1,3	−1,2	−1,2

В каждой клетке этой таблицы мы имеем по три цифры, соответствующие, если читать их сверху вниз, трем декадам месяца. Помня, что наименьшая прочность смерзания соответствует наиболее высоким

температурам, найдем время, когда температуры грунта были наиболее высокими. Наиболее теплыми декадами являются третья декада ноября и первая декада декабря 1934 г. Для этих декад температура равна 0,0° на глубине 2,5 *м*, —0,6° на глубине 3,2 *м* и —1,2° на глубине 5 *м*. По интерполяции для глубины 4,5 *м* находим температуру, очень близкую к —1° (точнее —1,05°).

Рассматривая температуры за 1934 г. и выбирая минимальные, получим:

Для глубины	2,5 *м*	0,0°
» »	3,2 »	—0,6°
» »	4,5 »	—1,0°

Средняя температура (учитывая, что промежуточная точка лежит на глубине 1,3 *м* выше основания столба) будет —0,6°, точнее —0,62°. Таким образом, среднюю величину прочности смерзания, равную 0,75 *кг/см²*, можно отнести к температуре —0,6°, а максимальную, равную приблизительно 1,1 *кг/см²*, — к температуре —1°.

Выше для расчета конструкций мы пользовались определением выдергивающих сил, развивающихся при пучении, методами, предложенными в § 36 главы V. Эти методы основаны на непосредственном определении усилий, препятствующих пучению столбов, заглубленных в деятельном слое до границы вечной мерзлоты. Иначе говоря, выдергивающие силы, развивающиеся при пучении, мы измеряли прочностью смерзания столба с замерзающим деятельным слоем, определяемые непосредственно опытом, причем в значение этой прочности смерзания входили и развивающиеся при пучении силы трения. Однако здесь надо подчеркнуть то, что силы смерзания могут служить мерой для реально развивающихся при пучении выдергивающих сил лишь тогда, когда существует пучение, и когда, следовательно, примерзающий грунт скользит по поверхности столба. Когда же пучения нет, то, хотя смерзание и может, вообще говоря, существовать, оно никоим образом мерой выдергивающих сил, развивающихся только при пучении, служить не может.

Так, мокрая галька, не насыщенная водой (по терминологии Цытовича, «пролитая водой»), никогда пучить не будет, несмотря на то, что сила смерзания такой гальки с сырым деревом равна 0,9 *кг/см²* (60, стр. 186). Вообще, если в грунте будет достаточное количество равномерно распределенных пор, заполненных воздухом, то такой грунт является непучинистым; между тем на стр. 43 «Вр. Т.У.» такая галька трактуется как пучинистая, и по ее прочности смерзания, принятой равной 0,8 *кг/см²*, вычисляется сила выпучивания, что, конечно, неверно.

Посмотрим теперь, как определяются силы выдергивания, развивающиеся при пучении, Цытовичем и Сумгиным, так как эти авторы наиболее подробно разбирают этот вопрос и так как их взгляды нашли отражение во «Вр.Т.У.».

Называя эти силы силами выпучивания, они отождествляют их с максимальными силами смерзания. «Обычно при расчетах,— говорят они, — за силы выпучивания принимают максимальные силы смер-

зания фундаментов с грунтом деятельного слоя и слоя вечной мерзлоты» (60, стр. 280). Что же касается «максимальных сил смерзания», то за таковые они принимают прочность смерзания, определенную в лабораторных условиях, которую на основе не вполне убедительных доводов они уменьшают вдвое.

Рассмотрим теперь предлагаемый в той же книге метод определения сил пучения. Для определения этих сил Цытович и Сумгин задаются эпюрой наиболее невыгодных, т. е. наиболее низких, температур в период пучения, констатируют, в каких грунтах эти температуры развиваются, находят по своим лабораторным данным соответствующие этим грунтам и температурам силы смерзания, уменьшив, как сказано, последние вдвое, и, просуммировав эти силы по всей поверхности столба, результат суммирования считают выдергивающей силой.

Фиг. 183

Так, если пользоваться данными для этого расчета, представленными на фиг. 183, взятой из книги Цытовича и Сумгина (60, стр. 416), то выдергивающая сила определяется так. Сначала в пределах одинаковых грунтов находят средние температуры: — 10°, — 3° и — 1°, что, конечно, вполне допустимо. Затем для этих температур и соответственных грунтов находятся силы смерзания: 12 *кг/см²* для супеска и температуры —10°, 7 *кг/см²* для глины и температуры —3° и, наконец, 6 *кг/см²* для пылеватого илистого суглинка при температуре —1°.

Среднее значение выдергивающей силы на 1 *см²* определится так:

$$\tau_{ср} = \frac{12 \cdot 1{,}2 + 7 \cdot 0{,}2 + 6 \cdot 0{,}7}{1{,}2 + 0{,}2 + 0{,}7} \approx 9{,}5 \text{ кг/см}^2,$$

а выдергивающая сила P будет равна

$$P = 9{,}5 \cdot 94 \cdot 210 = 187\,500 \text{ кг},$$

где 94 *см* — периметр окружности деревянного фундаментного столба;

210 *см* — длина этого столба, находящаяся в деятельном слое.

Если отнести эту силу, как это мы уже делали, к 1 *пог. см* периметра поперечного сечения столба, то получим для выпучивающих сил величину, равную 1 995 *кг* на 1 *пог. см* периметра, или, округляя, 2 000 *кг* на 1 *пог. см* периметра, что превышает определенную нами из опыта величину 150 *кг* на 1 *пог. см* периметра в 13 с лишним раз.

Нетрудно понять, как учет выпучивающих сил по Цытовичу и Сумгину может отразиться на проектах сооружений и на построенных по этим данным сооружениях, увеличивая, усложняя и удорожая их. Что касается причин такого расхождения в определении выдергивающих при пучении сил, то о них сказано в главе III, § 21.

Выше в главе V мы, следуя формулам и данным Цытовича, определили минимальные силы смерзания для температур 0°, —0,6° и —1,0°. Эти силы таковы:

Для температуры	—0°	3,6 *кг/см*²
»	—0,6°	5,1 »
»	—1,0°	5,5 »

Воспользуемся этими данными для определения прочности заделки в вечную мерзлоту столба на оголенной площадке, заглубленного на 4,5 *м*.

Если мы вырежем по длине заглубленной в вечную мерзлоту части нашего столба полоску шириной в 1 *см*, то сила n_c смерзания этой полоски с прилежащим грунтом в наших условиях будет такова:

$$n_c = \frac{3{,}6+5{,}1}{2} \cdot 70 + \frac{5{,}1+5{,}5}{2} \cdot 130 = 993{,}5 \text{ кг на 1 пог. см периметра.}$$

Величина 993 *кг* на 1 *пог. см* периметра в 6 с лишним раз превышает величину 150 *кг* на 1 *пог. см* периметра, которую мы рассматривали как характеристику прочности смерзания дерева с вечной мерзлотой при глубине заделки деревянного столба на 2 *м* в вечную мерзлоту.

Таким образом, определив прочность заделки такого столба в вечной мерзлоте по данным Цытовича, мы минимум в шесть с лишним раз преувеличим эту прочность, что, конечно, сильнейшим образом должно отразиться и на расчете конструкций и на самом характере строительства.

Перейдем теперь к определению сопротивления вечно мерзлых грунтов скалывающим усилиям, однако значительно ограничив задачу. Цель дальнейшего — лишь показать на отдельном примере, каким образом можно подойти к решению этой задачи в каждом отдельном случае.

Мы будем говорить о сопротивлении скалыванию лишь вечно мерзлых грунтов, аналогичных тем, в которые заглублены столбы на оголенной площадке Сковородинской станции, когда эти грунты находятся при температурах, соответствующих периоду пучения грунтов (см. табл. 32). Характеристики этих грунтов даны во многих местах выше. Для этих грунтов и этих температур нами выше уже определена средняя прочность смерзания, равная 0,75 *кг/см*².

Отметим теперь, что вообще сопротивление мерзлых грунтов сдвигу или скалыванию, или, что то же, прочность смерзания грунта с самим собой, при испытании на скалывание, конечно, больше, чем прочность смерзания с деревом или бетоном. Это следует из того, что при надлежащей заделке деревянных и бетонных столбов, когда пучение не может их выдернуть и когда при пучении грунт начинает скользить вдоль их поверхности, грунт отрывается от дерева и бетона, но никогда не на-

блюдалось, чтобы у дерева и бетона оставался слой грунта, что имело бы место, если бы прочность смерзания с деревом и бетоном была больше сопротивления грунта скалыванию.

Это, повидимому, подтверждается и лабораторными опытами. Поэтому допущение, что сопротивление грунта срезыванию при указанных выше температурах тоже равняется 0,75 *кг/см*², т. е. прочности смерзания с деревом, и дает некоторый запас прочности. Кроме того, некоторый запас прочности обеспечивает и то обстоятельство, что мы не принимаем при расчете во внимание ни веса выдергиваемых при пучении объемов мерзлых грунтов, ни сопротивления выдергиванию некоторого объема деятельного слоя.

Поскольку столбы, заякоренные из расчета на срезывание в 1 *кг/см*², никаких деформаций, по крайней мере в сковородинских условиях, не обнаружили, указанную выше величину 0,75 *кг/см*² и подавно можно считать для ориентировочных расчетов допустимой. Для других грунтов и температур допустимое напряжение на скалывание должно быть найдено при изысканиях опытным порядком — путями, аналогичными указанному.

§ 42. Фундаменты в виде отдельных столбов. Сваи

Выше мы рассматривали устройство заякоренных фундаментов, причем якори осуществлялись либо в виде схваток у деревянных фундаментов либо в виде башмаков и лент у железобетонных фундаментов.

Как особый вид заякоривания можно рассматривать глубокое погружение в вечную мерзлоту стержней призматической формы, квадратных, шестиугольных, восьмиугольных и, наконец, круглых сечений.

Мы уже знаем, что в условиях Сковородинской площадки такие стержни из дерева, будучи заделаны в вечную мерзлоту на 2 *м* и более, не подвергаются пучению; это мы объяснили примерзанием вечной мерзлоты к стержням. Поскольку прочность этого примерзания зависит от рода грунта и в еще более значительной степени от влажности (так как к сухому или почти сухому грунту ничто не примерзает), то ясно, что для различных мест это примерзание может быть иным, и даже в Сковородине без предварительного исследования нельзя поручиться за то, что оно во всех местах одинаково. Вот почему важнейшее дело изысканий — выяснить не только силы смерзания, но и характер и влажность грунтов на строительной площадке — как деятельного слоя, так и вечной мерзлоты в пределах заложения фундамента и ниже, как об этом сказано в главе V.

В то время как при уже рассмотренных фундаментах с заякориванием расчет велся на срезывание вечно мерзлых грунтов при выдергивании их из вечной мерзлоты, в фундаментах в виде призматических столбов расчет следует вести, учитывая, главным образом, прочность смерзания этих столбов с вечно мерзлыми грунтами.

На этом принципе заделки в вечную мерзлоту в расчете на смерзание с ней фундаментных столбов устроены фундаменты здания Сково-

родинской станции, представляющие собой деревянные цилиндрические столбы, заглубленные на 5 *м*. Станция стоит незыблемо. Единственным недостатком этого фундамента является его дороговизна. Однако дороговизна эта в значительной мере объясняется кустарным способом производства работ. Следовало бы сконструировать такой бур, при помощи которого с двигателем малой мощности можно было бы быстро бурить необходимых размеров отверстия на сравнительно небольшую глубину — от 5 до 7 *м*. Такой механический бур принес бы огромную пользу для ускорения и удешевления устройства фундаментов и тем самым способствовал бы внедрению в практику строительства в условиях вечной мерзлоты глубоких, устойчивых (незыблемых) фундаментов.

Схема производства работы по устройству фундаментов посредством механического бура представлялась бы в таком виде. На выбранной для строительства площадке, где грунты более или менее однородны, протаивание идет равномерно и нет водоносных слоев. При помощи механизированного бура делается необходимое количество отверстий на необходимую глубину в соответствии с данными изысканий и расчета, куда и вставляются деревянные или железобетонные фундаментные столбы, для осаживания которых достаточно, вообще говоря, ручной бабы; но и последнюю работу целесообразно механизировать.

Чтобы осуществить плотное соприкосновение столбов с вечно мерзлым грунтом, перед погружением их в пробуренное отверстие на дно наливается раствор жидкого пылеватого или глинистого грунта (консистенции сметаны), который и вытесняется вверх при погружении столба, заполняя пустоты между столбом и стенками отверстия, если таковые окажутся.

Количество раствора определяется из соотношения размера отверстия с размерами столба так, чтобы при погружении столба этот раствор поднялся до верхней границы вечной мерзлоты. Для того же, чтобы при погружении цилиндрического столба раствор этот не оказался в случае плотного прилегания столба к стенкам отверстия зажатым в в замкнутом пространстве (что сделало бы погружение столба невозможным), необходимо вдоль столба на его поверхности устроить один или два небольших желобка, по которым избыток жидкого грунта мог бы подниматься вверх — наружу.

Пески как быстро осаждающиеся в воде грунты для такого раствора непригодны — необходимы суспензии. Песок, быстро оседая на дно, мог бы только уменьшить глубину отверстия. При отсутствии рекомендуемых грунтов столб можно залить холодной водой, так как вечно мерзлые грунты, почти как правило, являются водонепроницаемыми.

Фундаменты в виде свай

Забить сваю (деревянную или железобетонную) в вечно мерзлый грунт обыкновенным способом невозможно. Наибольшее погружение при подобных работах не превышает 0,2—0,4 *м*, поэтому здесь при-

бегают к предварительному оттаиванию грунта, которое производится при помощи паровых игл.

Паровая игла представляет собой обыкновенную железную трубку диаметром 25—19 *мм* (1,0—3/4''), на одном конце которой навинчивается или приваривается стальная коническая насадка, а на другом — тройник, как показано на фиг. 184, *а*. Пар поступает через боковое отверстие, как показано стрелкой, отверстие же *а''* заделывается наглухо. Посредством легких ударов по этому заделанному концу игла погружается в грунт, когда встретятся какие-либо препятствия. Отверстие для ввода пара через переходную муфту соединяется гибким шлангом с источником пара.

Фиг. 184. Паровая игла и ее детали

Процесс забивки заключается в следующем. В месте, предназначенном для забивки сваи, предварительно при помощи паровой иглы на глубину предполагаемой забивки свай оттаивается вечная мерзлота, куда затем и загоняется свая. Оттаявший вечно мерзлый грунт затем вновь замерзает и примерзает к свае. Таким образом, свая оказывается вмерзшей в вечно мерзлый грунт. Ввиду этого свайные основания в районах вечной мерзлоты применяются лишь там, где вечную мерзлоту под сооружением предлагается сохранить либо полностью либо частично, так чтобы сваи в ней были надежно заделаны.

Стальные наконечники для паровой иглы применяются различных типов. Наиболее употребительные из них изображены на фиг. 184, *b*, c_1, c_2 и *d*.

Наконечник конической формы (фиг. 184, *b*) является наиболее употребительным. Как видно из фигуры, он состоит из двух частей: собственно наконечника *b'* и переходной муфты *b''*, при помощи которой он прикрепляется к трубе *a'*. Иногда этот наконечник устраивается с боковыми отверстиями в его конической части, как это показано на фиг. 184, *а*, но, повидимому, эти отверстия большого значения не имеют, а возможно, и вредят, давая выход пару, когда основное отверстие внизу наконечника чем-нибудь забивается. По этим соображениям при опытах на Сковородинской станции эти отверстия были у одной иглы заделаны, отчего работа этой иглы не ухудшилась по сравнению с той, у которой отверстия оставались незаделанными.

Пропарку грунта для забивки свай можно в крайнем случае вести

и без специальных наконечников, оттянув на конус конец трубки, так, чтобы диаметр выходного отверстия равнялся 8—10 *мм*. Такими иглами без специальных наконечников на работах в Игарке был пропарен грунт для здания графитной обогатительной фабрики, куда вслед за пропаркой и были без затруднений забиты сваи.

Описанные наконечники применяются при оттайке супесчаных, суглинистых и даже слегка гравелистых грунтов, если только не требуется дробления.

На фиг. 184, c_1, c_2, c_3 изображен наконечник с долотом. Пар выходит над долотом через отверстия m_1 и m_2. Этот наконечник приваривается к трубе, а не ввинчивается, чтобы при ударах и поворотах он не отвинчивался. Наконечник, изображенный на фиг. 184, *d*, есть вариант только что описанного. В нем долото заменено усеченной пирамидой. При погружении, например, в галыку он может не только ее дробить но и просто раздвигать при продвижении отдельные зерна.

Протаивание гравелистых грунтов и забивка в них свай требуют значительно бо́льшего времени и бо́льших средств, и дело изысканий и последующих экономических подсчетов выяснить, выгоднее ли забивать сваи или же устраивать фундаменты иного рода, как, например, описанные, с заякориванием в вечную мерзлоту.

На месте работ по заранее составленному проекту устраивается паропровод из железных труб. В определенных местах устраиваются перекрытые вентилями отростки труб от основного паропровода, к которым и прикрепляются специальные гибкие резиновые шланги, соединенные с паровой иглой.

К проекту паропровода предъявляются следующие требования:

1) паропровод не должен мешать свободному и удобному передвижению копра или копров и маневрированию с ними;

2) отростки паропровода, предназначенные для соединения с гибкими шлангами данной длины, должны быть расположены так, чтобы было возможно удобнее обслужить все точки, подлежащие пропарке от данного отростка;

3) чтобы паропровод был по возможности коротким.

Пар подводится к игле специальным бронированным шлангом длиной обыкновенно 10—15 *м*. Употребление обыкновенных резиновых рукавов (даже если их обмотать предварительно бечевкой или проволокой) нерационально: они очень быстро изнашиваются и рвутся.

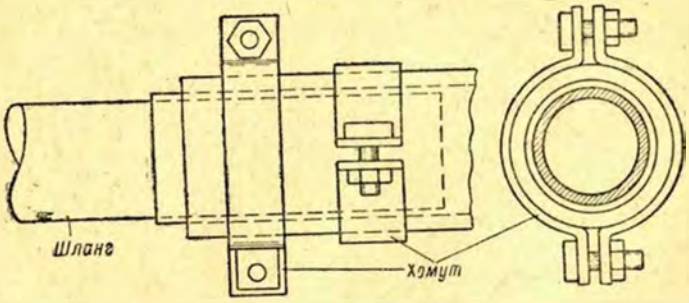
Необходимо также обратить внимание на плотное и прочное присоединение резиновых шлангов к железным отросткам паропровода и к паровой игле. Очень часто пользуются для этого кольцевыми прокладками и парой железных хомутиков на небольших болтах, как это показано на фиг. 185. Нелишне, кроме того, обвязывать место соединения проволокой, соединяя хомутики с железной трубой так, чтобы резиновый шланг не соскочил с отростка паропровода или в месте его соединения с паровой иглой. Случаи такого соскакивания кроме потери времени могут иметь следствием еще ожоги рабочих паром.

Пар получается от котла, с которым и соединяется паропровод. Для расчета паровой установки можно пользоваться следующими

данными опыта. На Сковородинской станции для пропарки отверстий для свай пользовались вертикальным котлом Шухова с поверхностью нагрева 19,5 $м^2$ и рабочим давлением 8 *ат*. Такой котел мог вполне удовлетворительно обслужить лишь одну паровую иглу описанного выше типа.

Попытка работать двумя иглами одновременно настолько снижала давление пара, что пропарка грунта происходила значительно медленнее; отверстие иглы чаще забивалось грунтом, так как пониженное давление пара не в состоянии было всегда вытолкнуть застрявшие в отверстии частицы грунта.

При работе на морозе (как это, например, имело место на строительстве в Игарке) необходимо утепление как основного паропровода из железных труб, так и гибких шлангов. Основной паропровод из железных труб устанавливается на легких деревянных козлах, устроенных из жердей. При работе в теплое время года железные трубы кладутся непосредственно на козлы; при работе же зимой в морозы железные



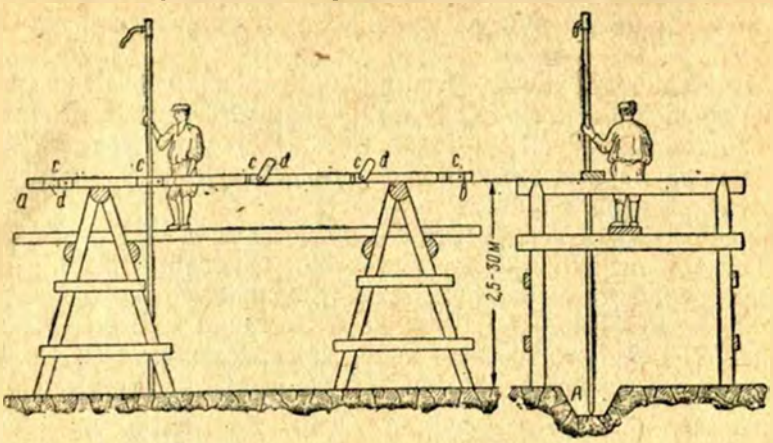
Фиг. 185

трубы в случае надобности утепляются войлоком, которым они обвертываются, или сухими опилками, которые насыпаются в четырехгранные деревянные короба сечением 20 × 20 *см*. Эти короба укладываются на деревянных козлах; под железные же трубы паропровода в этих деревянных коробах устанавливаются подкладки и диафрагмы.

Пропарка вечной мерзлоты может вестись в соответствии с проектом либо непосредственно с дневной поверхностью, либо со дна предварительно вырытого котлована. При пропаривании необходимо строго следить за вертикальным направлением паровой иглы, так как в косо пропаренную скважину забить вертикально сваю будет невозможно.

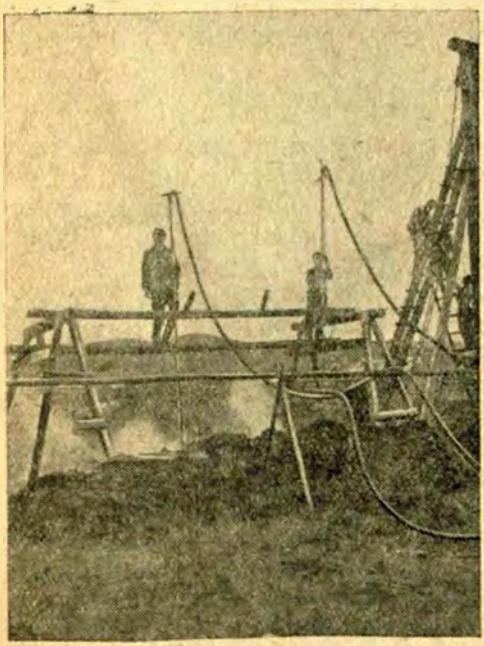
Так как длина паровой иглы колеблется обыкновенно в пределах от 5 до 7 *м*, а иногда может быть и более, то удерживать такую иглу, да еще с прикрепленным вверху шлангом, в вертикальном положении является для двух рабочих, работающих внизу у иглы, делом весьма затруднительным. Это относится, конечно, к начальному моменту пропарки скважины, когда центр тяжести иглы находится еще высоко. Ввиду этого установку паровой иглы ведут с козел высотой 2,5—3 *м*, изображенных на фиг. 186 и 187. Эти фигуры относятся к забивке на Сковородинской мерзлотной станции пробных свай.

На козлах укладывается пластина или брусок *ab* (фиг. 186) с вырезанными в нем гнездами *ck*. Гнезда *c* расположены на взаимном расстоянии, равном расстоянию расположения свай в плане. Сначала



Фиг. 186. Козлы для установки паровой иглы

устанавливаются козлы, затем брусок *ab* так, чтобы гнезда *c* находились как раз над центрами предполагаемых к забивке свай, что определяется при помощи отвеса. После этого в гнездо может быть установлена игла, как это и показано на фиг. 186 и 187.



Фиг. 187

Когда забивка свай ведется с поверхности земли, то в месте забивки сваи снимается дерн и делается небольшое углубление, так чтобы нижний конец иглы попал в это углубление. Вместо такого углубления иногда выгоднее прорыть канавку глубиной 0,25—0,30 *м*, как это показано на фиг. 186 (канавка *A*). Делается это потому, что при пропарке отверстия для сваи возле иглы выступает вода, появившаяся вследствие конденсации отработанного пара, образующего при смешивании с грунтом потоки горячей грязи, сквозь которую прорывается избыточный, не превратившийся в воду, пар.

Описанные выше углубления или канавки устраиваются для того, чтобы эта жидкая горячая грязь не растекалась по поверх-

ности строительной площадки, где забиваются сваи, и не заболачивала площадку, что только мешало бы работам.

По установке иглы углубление или канавка перекрывается у самой иглы обрезками досок, пластин и покрывается старыми рогожами. С этого помоста двое рабочих опускают паровую иглу в грунт при помощи двух клещей или особых приспособлений для захвата паровых игл. Зажав этими клещами трубку паровой иглы, они слегка надавливают на клещи, несколько поворачивая паровую иглу вокруг ее оси то в одну, то в другую сторону. В суглинистых и супесчаных грунтах этого надавливания бывает вполне достаточно, чтобы паровая игла быстро погружалась в грунт, причем сколько-нибудь значительной разницы при прохождении талых и мерзлых слоев не наблюдается.

Перекрытие канавки или углубления рогожами и досками необходимо для предохранения рабочих от действия пара и фонтанирующего иногда у иглы горячего разжиженного грунта. Поэтому необходимо озаботиться, чтобы рабочие у паровой иглы были в брезентовых халатах с капюшонами и в теплых зимних рукавицах. В тех случаях, когда канавок почему-либо сделать нельзя, необходимо сделать небольшой помост, который в месте прохода иглы покрывается обычно рогожей.

Пар посредством вентиля пускается в паровую иглу постепенно. Если при погружении иглы встречаются небольшие камни, то паровая игла несколько приподнимается и с силой опускается вниз. Иногда, особенно в конце пропаривания, прибегают к легким ударам по верху паровой иглы. Небольшое приподнимание паровой иглы также применяется при засорении отверстия ее; приподнимая паровую иглу, пар выталкивает забивший отверстие грунт и таким образом очищает иглу. Факт забивания грунтом отверстия паровой иглы почти всегда указывает на недостаточное давление пара.

В исключительных случаях паровую иглу приходится вынимать и прочищать стальной шпилькой. Чтобы избежать засорения отверстия паровой иглы при пропаривании мерзлоты, следует применять давление не ниже 6 *ат*.

Из вышеизложенного ясно, что для обслуживания одной паровой иглы достаточно трех рабочих (два внизу с клещами и один вверху на козлах). Верхний рабочий может обслуживать несколько паровых игл одновременно, так как, заложив иглу в гнездо *c* и закрыв закладкой *d*, он может отойти от этой паровой иглы для обслуживания других. Кроме того его помощь делается излишней, когда верхушка паровой иглы опускается ниже горизонта *ab*.

Пропарка отверстия на глубину 6—7 *м*, не считая передвижки козел и установки трубы, требует в супесчаных и суглинистых грунтах времени от 15 до 25 мин. Случайные камни, песчаные и гравелистые прослойки увеличивают время пропарки.

Затрачивать на пропаривание больше времени, чем это указано выше, не следует, так как чем дольше мы задерживаем паровую иглу в грунте, тем больший объем его оттаивает и тем более потребуется времени на его обратное замерзание, с чем, конечно, приходится счи-

таться при дальнейшем возведении сооружения. Надо отметить, что длительное пропаривание мерзлого грунта облегчает и ускоряет погружение сваи. В этих случаях свая может опуститься в пропаренный грунт без единого удара бабы под действием собственного веса. Однако из сказанного выше понятно, что соблазняться этой эффективностью длительного пропаривания никоим образом не следует.

После погружения иглы на необходимую глубину мы рекомендуем задержать паровую иглу под паром в этом положении не более 1 мин.

Пропаривание грунта, кроме того, рекомендуется не доводить до проектной глубины забивки сваи, а прекращать его, не доходя этой отметки на 10—15 *см*, с тем чтобы это расстояние было пробито и пройдено острием сваи в мерзлом грунте и чтобы при достижении свай проектной отметки получался нулевой отказ. Дело в том, что после окончания пропаривания мерзлого грунта процесс оттаивания его некоторое время будет продолжаться.

Наблюдаются иногда случаи, когда при пропаривании мерзлого грунта пар от погружаемой паровой иглы проникает в соседнюю скважину, расположенную в 1—1,5 *м* от пропариваемой. В этом случае пар находит более легкий путь в какой-либо прослойке грунта. При дальнейшем погружении паровой иглы это явление обыкновенно прекращается.

При пропаривании грунтов для забивки в них свай нужно вести особый журнал, где отмечаются дата пропарки, температура наружного воздуха, диаметр паровой иглы и наконечника, общее время пропаривания, давление пара в котле, задержки при углублении паровой иглы, время этих задержек, глубина от дневной поверхности, общая глубина пропарки. Задержки при производстве пропаривания необходимо знать строителю, так как при длительном пропаривании на известной глубине в этом месте, конечно, создается более сильно пропаренная область. В журнале пропаривания грунта отмечаются прочие обстоятельства, нарушавшие нормальный ход работ.

Вслед за бригадой, ведущей пропаривание, идет бригада проводящая забивку свай.

Сваи забиваются в пропаренный грунт или в тот же день или на другой. На третий день откладывать забивку сваи рискованно, так как при нормальном (неизлишнем) пропаривании обратное замерзание талого грунта может значительно затруднить забивку, а иногда и сделать ее невозможной без дополнительного пропаривания.

Процесс забивки в общем ничем не отличается от обычного. Сваи забиваются до нулевого отказа или до отказа, весьма близкого к нулю.

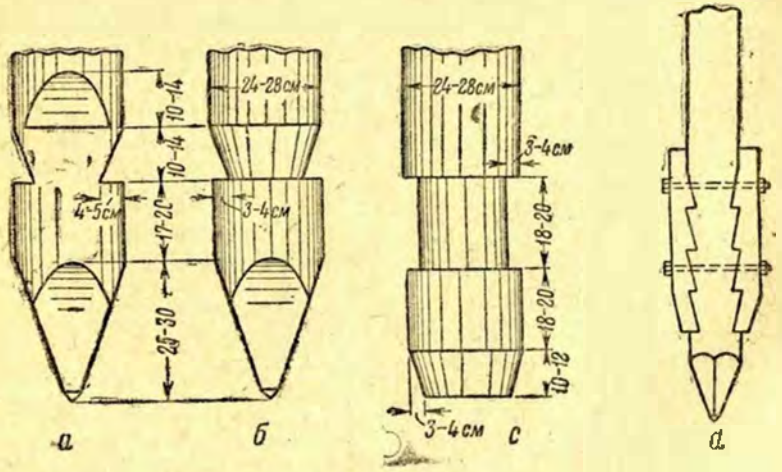
Из самого процесса и принципа забивки свай в вечно мерзлые грунты ясно, что обычные формулы, которыми пользуются при забивке свай (Герсеванова, Брикса и др.) здесь не применимы. В случае забивки в вечно мерзлые грунты свая делается полноценной лишь постепенно, по мере обратного замерзания вечно мерзлого грунта у сваи и примерзания этого грунта к ней.

Несущая способность сваи на сжатие определяется по ослабленному ее сечению и проверяется на продольный изгиб, причем у границы

вечной мерзлоты свая рассматривается как заделанная. В случае горизонтальных сил, действующих на нее, свая в этом случае работает как балка, заделанная в горизонте верхней поверхности вечной мерзлоты. При работе на скручивание свая рассчитывается по обычно применяемым для этого формулам. Реактивный же момент от заделки, сопротивляющийся кручению, определяют, полагая прочность смерзания сваи с вечно мерзлым грунтом равной от 0,5 —1 *кг/см²* в зависимости от минимальной температуры вечно мерзлых слоев, примерзших к свае (см. предыдущий параграф).

Сваи забиваются комлем вниз. Перед забивкой они должны быть очищены от коры. Обтесывать и сглаживать сучки и неровности в той части сваи, которая будет находиться в вечной мерзлоте, не следует.

В нижней части сваи в целях увеличения ее сопротивления выдергиванию можно делать зарубки, как это показано на фиг. 188, *а*, *b*, *с*.



Фиг. 188

Цель этих зарубок следующая: во время забивки сваи полужидкий грунт, образовавшийся при пропаривании, заполняет эти углубления; когда свая забита, то грунт, заполнивший углубления, замерзает; при развитии выдергивающих сил во время пучения этот грунт работает на срезывание. При отсутствии углублений или зарубок вместо работы грунта на срезывание мы имели бы работу на складывание примерзшего к свае грунта относительно последней. Выше мы уже указывали, что прочность смерзания грунта с деревом меньше, чем сопротивление мерзлого грунта срезыванию.

Вполне целесообразным теоретически является также искусственное увеличение поверхности сваи в пределах вечной мерзлоты, как изображено на фиг. 188, *d*. Однако такой прием требует лишней работы, материала и лишнего пропаривания. Последнее же связано с более медленным вмерзанием.

Та часть поверхности свай, которая будет находиться в активном слое, выше горизонта вечной мерзлоты, должна быть по возможности гладкой. Кроме того, весьма полезно пропитать ее противогнилостными составами, а также обильно смазать смолой.

Если забивка свай ведется с августа по ноябрь включительно, т. е. непосредственно перед периодом и в период интенсивного пучения, то есть опасность, что сваи могут подвергнуться действию выдергивающих сил пучения раньше, чем они достаточно вмерзнут в грунт. Кроме того, от времени забивки свай до их нагрузки весом сооружения проходит обыкновенно некоторый промежуток времени, когда на сваю в период пучения действуют только выдергивающие силы. Все это должно быть, конечно, учтено составителями проекта и строителями.

Если есть опасность, что свая может подвергнуться действию выдергивающих сил пучения до надежного вмерзания в грунт, то ее после забивки рекомендуется обнажить на высоту деятельного слоя (1,5—2 *м*) и обвернуть толем, предварительно покрыв ее слоем технического вазелина. После наложения толя на сваю в один слой делается обвязка шпагатом или проволокой. Такое обвертывание толем по вазелину является вполне надежным средством против выдергивания цилиндрических и вообще призматических стержней в течение 1—2 лет, и только наше незнание, на какой срок надежно действует такой изолирующий слой обвертывания, не дает возможности рекомендовать его в известных случаях вообще как средство борьбы с пучением.

При густом расположении свай в плане и намеченной забивки их в период с августа по ноябрь включительно выгоднее в месте забивки свай предварительно вырыть траншею или котлован необходимых глубины (от 1,5—2,0 *м*) и формы и после забивки свай засыпать его, предварительно обвернув сваи толем, как сказано выше.

Не следует обмазывать вазелином сваи перед забивкой, так как случайное попадание вазелина на ту часть сваи, которая будет находиться в вечной мерзлоте, может ослабить прочность смерзания, что повредит прочности ее заделки. То, что сказано о деревянных сваях, вполне приложимо и к железобетонным.

Чтобы обеспечить работу замерзшего грунта на срезывание, при выдергивании железобетонных свай пучением, а также в целях развития поверхности в нижней части сваи, где в первую очередь происходит замерзание, нижним концам свай можно придать форму, указанную на фиг. 189.

В нижних частях свай устраиваются желобки a, a' и b, b'. Эти желобки необходимы, чтобы во время забивки сваи дать возможность разжиженному грунту, находящемуся под сваей, поступать наверх, что должно облегчить забивку. Аналогичные желобки следует устраивать и в тех деревянных сваях, которые имеют в нижней части правильную форму.

Бывали случаи, когда под сваей развивались при забивке столь значительные напряжения, что свая приподнималась после забивки вверх. При забивке свай комлем вверх, понятно, такое явление

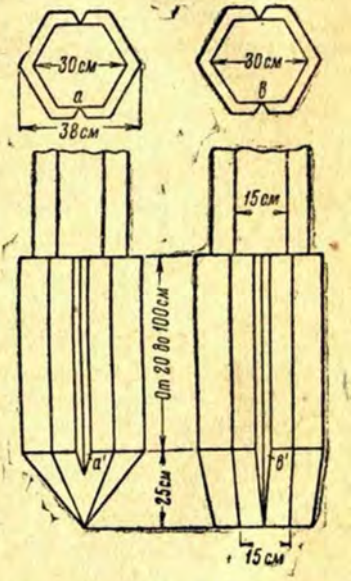
может происходить наиболее часто. При забивке свай ведется обычный журнал.

Устройство каких-либо схваток и подкосов между забитыми сваями в пределах деятельного слоя нужно признать нежелательным. В самом деле, примерзший к подобного рода схваткам грунт при дальнейшем замерзании и пучении нижележащих слоев будет стремиться поднять с собой и вмерзшие в него схватки и тем самым может увеличить выдергивающую силу, действующую на сваи.

В условиях площадки Сковородинской станции сваи следует забивать (как показывают опыты и исследования, описанные в главе III) на глубину не менее 5 *м* от поверхности земли.

Грунты площадки состоят из пылеватых суглинков, реже супесков, которые описаны в главе III и в других главах этого труда. Наиболее высокая температура вечно мерзлых слоев, в которые вмерзает свая, не выше —0,3° на глубине 3,2 *м* и не выше—0,5° на глубине 6,0 *м*. При других условиях надежная глубина забивки может быть иная. Так, при большей величине наибольшего протаивания забивка сваи должна быть глубже.

В связи с проделанными опытами можно сказать, что в условиях, аналогичных сковородинским, при отсутствии вертикальной нагрузки на сваю последняя во избежание выдергивания должна быть забита так, чтобы в вечной мерзлоте находилось не менее 2,5 *м*.



Фиг. 189. Нижние концы железобетонных свай

Окончательно глубина забивки свай при других условиях, как и заглубление фундаментных столбов, решается на основании данных о наибольшем протаивании, о прочности смерзания и т. д., полученных при окончательных изысканиях или путем забивки пробных свай. Способы получения этих данных подробно изложены в главах III, V и др. Особое внимание следует обращать на наличие таликов, которые иногда наблюдаются в слое вечно мерзлых грунтов.

При исследовании бурением или шурфованием талики при отсутствии грунтовых вод определяются по легкости разработки: бур легко и быстро проходит такие слои; при рытье шурфов такие слои сравнительно легко разрабатываются лопатой вместо кирки и лома, употребляемых при разработке вечно мерзлых грунтов. Выше уже говорилось, что такие талые грунты наблюдаются иногда при температуре — 0,1° или —0,2°. Иногда легко разрабатываются мало влажные грунты (при влажности от 14 до 16% по отношению к весу естественного образца). Эта легкость разработки грунта независимо от причины,

се определяющей (грунт мало влажный, грунт действительно талый), должна учитываться строителями.

Мы уже говорили, что постоянные реперы Сковородинской станции, заглубленные на 7 *м* от дневной поверхности, являются незыблемыми. Но подобные же реперы, изготовленные с такой же тщательностью по тем же правилам и в том же Сковородине экспедицией Госгеосъемки примерно в 1 *км* от площади опытной мерзлотной станции, оказывались иногда выпученными. Весьма возможно, что здесь репер экспедиции попал частично в толщу талика, где прочность смерзания или отсутствовала или была сильно понижена, если встретился мало влажный грунт. Если прочность смерзания является пониженной вследствие небольшой влажности грунта, то казалось бы, что этому делу могло помочь искусственное увлажнение грунта, происходящее, например, при пропаривании грунта для забивки свай. Но этот вопрос

Фиг. 190. Схема расположения пропаренных отверстий при исследовании вмерзания свай (Сковородинская НИМС)

является пока не изученным, и рассчитывать на пользу такого увлажнения можно лишь при устойчивых отрицательных температурах этого слоя (не выше —0,5°).

Забитые описанным выше способом сваи являются полноценными, как уже сказано, лишь после окончания процесса их вмерзания в вечную мерзлоту.

Как показывают предварительные обследования, вмерзание сваи идет снизу независимо от времени года, когда свая забита. Но так как наиболее низкие температуры на глубине 5—6 *м* развиваются в мае и июне, то и наиболее интенсивного вмерзания сваи можно ожидать в это время.

Для выяснения времени и характера вмерзания свай был проделан следующий опыт. В августе и сентябре 1936 г. на территории Сковородинской станции был пропарен при помощи паровой иглы на глубину 6 *м* грунт в 63 точках, как показано на фиг. 190. Так как было интересно выяснить вмерзание не только одиночных свай, но и групп

(кустов) свай, то кроме одиночного пропаривания отверстия в точке *A* были пропарены группа *B*, состоящая из 4 точек, группа *C*, состоящая из 9 точек, и, наконец, группа *D*, состоящая из 49 точек.

Точки пропарки в каждой из групп находились в расстоянии 1,5 *м* одна от другой. В некоторые из этих пропаренных в мерзлоте отверстий (на фиг. 190 точно показано, в какие) были вставлены на глубину 6 *м* железные трубки с заделанными внизу концами, в которых и наблюдалась температура на глубинах 2,5; 3,2; 4,5 и 6 *м*. Кроме этих отверстий, в целях контрольного измерения температур на тех же глубинах в грунте, не подвергавшемся пропарке, были пробурены отверстия *I*, *II*, *III*, *IV*, в которые были тоже вставлены железные трубки.

Выборки из журналов наблюдений за температурами на указанных глубинах в перечисленных выше отверстиях приведены в табл. 33 и 34.

В табл. 33 даны температуры, наблюдавшиеся в одиночной скважине *A*, в группах *B* и *C* и в контрольных скважинах *I*, *II* и *III*.

В табл. 34 даны аналогичные данные относительно температур в группе *D*, состоящей из 49 скважин.

Для вмерзания нижней части сваи требуется от 1,5 до 2 месяцев, после чего можно начинать нагрузку сваи. Что же касается полного восстановления термического режима, то таковой восстанавливается не ранее 6—7 месяцев, если только сваи не занимают сплошь большой площади. Так, если сваи равномерно расположены на квадрате сечением 9×9 *м* (как они расположены в группе *D*), то восстановление температурного режима будет происходить несколько медленнее (табл. 34).

Из сказанного о вмерзании и восстановлении термического режима вытекает, что наиболее подходящим временем для забивки свай является время с февраля по июнь, т. е. период, начало которого совпадает с замиранием процессов пучения, а конец отстоит от начала нового периода пучения примерно на 5 месяцев.

Свая, забитая в этот период, до начала пучения успеет вмерзнуть, и термический режим приблизится к нормальному. Такой свае уже не опасны будут выдергивающие силы, которые разовьются при пучении. Кроме того, при нормально развивающемся строительстве на сваи в течение такого срока будет передана и часть или вся нагрузка воздвигаемого сооружения.

В худшем положении, о чем уже сказано, будут сваи, забитые, например, в сентябре, так как до начала пучения они не успеют вполне надежно вмерзнуть в вечную мерзлоту: отрицательные температуры вечной мерзлоты не достигнут своей нормальной величины, и прочность смерзания будет ослабленной. В таких случаях, весьма возможно, придется применять иногда предохранительные меры в виде обвертывания толем, смазывания смолой и т. д., как об этом сказано выше.

Успешность работы зависит главным образом от организации работ по быстрой и рациональной передвижке приборов пропаривания

Таблица 33

№ скважины и дата пропаривания	Глубина в м	1936 г.			1937 г.				1938 г.	
		21/VIII	16/IX	21/XII	20/I	30/IV	27/VIII	30/X	28/II	28/IV
№ 1, 8/VIII 1936 г.	2,5	0,0	+0,6	0,0	−0,1	−0,5	−0,2	0,0	−0,6	−1,3
	3,2	0,0	0,0	0,0	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	−0,3	−0,8
	4,5	—	−0,1	−0,3	−0,3	−0,3	−0,4	−0,3	−0,5	−0,6
	6,0	−0,3	−0,5	−0,5	−0,6	−0,6	−0,5	−0,4	−0,7	−0,7
№ 2, 8/VIII 1936 г.	2,5	+0,9	+1,6	0,0	0,0	−0,3	−0,2	+0,1	−1,5	−1,3
	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	−0,2	−0,2	−0,1	−0,2	−0,6
	4,5	—	0,0	−0,2	−0,4	−0,4	−0,5	+0,2	−0,3	−0,4
	6,0	−0,2	−0,5	−0,5	−0,6	−0,6	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5
№ 6, 9/VIII 1936 г.	2,5	+1,3	+1,9	−0,2	−0,2	−0,3	−0,2	+0,8	−1,5	−1,2
	3,2	−0,1	−0,1	−0,3	−0,2	−0,2	−0,1	+0,1	−0,2	−0,4
	4,5	—	−0,2	−0,5	−0,4	−0,3	−0,3	+0,2	−0,4	−0,3
	6,0	−0,4	−0,6	−0,6	−0,6	−0,5	−0,4	−0,4	−0,5	−0,5
№ 10, 9/VIII 1936 г.	2,5	+0,4	+1,8	0,0	−0,1	−0,4	−0,3	0,0	−1,6	−1,3
	3,2	−0,1	0,0	−0,2	−0,2	−0,2	−0,3	−0,1	−0,4	−0,6
	4,5	—	−0,1	−0,4	−0,3	−0,3	−0,4	−0,4	−0,2	−0,4
	6,0	−0,4	−0,1	−0,6	−0,6	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5
№ 11, 9/VIII 1936 г.	2,5	0,0	0,0	−0,1	−0,1	−1,5	−0,6	−0,2	−3,1	−2,1
	3,2	0,0	0,0	−0,2	−0,2	−0,9	−0,7	−0,4	−1,3	−1,7
	4,5	—	0,0	−0,5	−0,5	−0,5	−0,7	−0,5	−0,6	−1,0
	6,0	−0,4	−0,5	−0,6	−0,6	−0,7	−0,7	−0,6	−0,7	−0,7
№ 13, 9/VIII 1936 г.	2,5	0,0	0,0	−0,1	−0,1	−1,7	−0,7	−0,3	−2,7	−2,1
	3,2	0,0	0,0	−0,3	−0,2	−0,8	−0,7	−0,5	−1,2	−1,7
	4,5	—	0,0	−0,4	−0,5	−0,6	−0,7	−0,6	−0,6	−0,8
	6,0	−0,1	−0,5	−0,6	−0,6	−0,6	−0,7	−0,7	−0,7	−0,7
Контр. I, август 1936 г.	2,5	0,0	−0,1	−0,1	−0,1	−0,9	−0,5	−0,2	−0,5	−1,5
	3,2	−0,2	−0,4	−0,3	−0,3	−0,4	−0,5	−0,4	−0,3	−1,1
	4,5	—	−0,6	−0,4	−0,6	−0,5	−0,5	−0,5	−0,4	−0,7
	6,0	−0,6	−0,6	−0,7	−0,7	−0,7	−0,6	−0,5	−0,6	−0,7
Контр. II, август 1936 г.	2,5	−0,3	−0,4	−0,5	−0,2	−1,6	−0,6	−0,3	−0,9	−1,7
	3,2	−0,3	−0,6	−0,6	−0,3	−0,9	−0,7	−0,5	−0,4	−1,3
	4,5	—	−0,6	−0,7	−0,6	−0,6	−0,8	−0,7	−0,6	−0,8
	6,0	−0,6	−0,8	−0,9	−0,7	−0,7	−0,8	−0,8	−0,7	−0,7
Контр. III, октябрь 1937 г.	2,5	—	—	—	—	—	—	+0,4	−0,3	−0,9
	3,2	—	—	—	—	—	—	−0,3	−0,2	−0,3
	4,5	—	—	—	—	—	—	−0,4	−0,4	−0,4
	6,0	—	—	—	—	—	—	−0,5	−0,5	−0,5

Таблица 34

№ скважины и дата пропаривания	Глубина в м	1936 г.			1937 г.					1938 г.	
		2/X	24/X	23/XI	28/I	4/III	28/IV	30/VIII	29/X	27/II	29/VIII
№ 15, 23/IX	2,5	+2,2	+1,0	+0,2	0,0	−0,2	−0,8	−0,4	−0,1	−3,1	−1,8
	3,2	—	—	−0,1	0,0	−0,1	−0,2	−0,3	−0,3	−0,4	−1,2
	4,5	0,0	0,0	−0,1	−0,2	−0,1	−0,2	−0,4	−0,3	−0,3	−0,4
	6,0	0,0	0,0	−0,2	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5
№ 21, 26/IX	2,5	+2,4	+1,0	−0,1	−0,2	−0,2	−0,5	−0,2	+0,3	−1,6	−1,5
	3,2	—	—	−0,2	−0,2	−0,2	−0,1	−0,2	−0,1	−0,3	−0,6
	4,5	−0,1	−0,1	−0,4	−0,2	−0,2	−0,2	−0,3	−0,2	−0,3	−0,3
	6,0	−0,1	−0,2	−0,5	−0,5	−0,5	−0,4	−0,4	−0,4	−0,4	−0,4
№ 25, 23/IX	2,5	+2,7	+1,1	+0,4	0,0	−0,2	−0,6	−0,3	0,0	−2,7	−2,0
	3,2	—	—	0,0	0,0	−0,1	−0,2	−0,2	−0,2	−0,3	−1,2
	4,5	0,0	0,0	0,0	−0,0	−0,1	−0,1	−0,1	−0,1	−0,2	−0,2
	6,0	0,0	0,0	0,0	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	−0,3	−0,3
№ 37, 25/IX	2,5	+2,2	+0,6	0,0	−0,1	−0,4	−0,1	−0,3	+1,0	−2,9	−2,1
	3,2	—	—	−0,1	−0,1	−0,2	−0,3	−0,3	−0,3	−0,2	−1,4
	4,5	−0,2	−0,2	−0,3	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	−0,3	−0,3
	6,0	−0,1	−0,2	−0,2	−0,3	−0,4	−0,3	−0,3	−0,3	−0,3	−0,4
№ 39, 25/IX	2,5	+1,4	+0,8	+0,1	−0,2	−0,6	−0,8	−0,3	−0,1	−3,2	−2,2
	3,2	—	—	0,0	0,0	−0,2	−0,2	−0,3	−0,2	−0,5	−1,6
	4,5	0,0	0,0	−0,1	−0,1	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	−0,4	−0,3
	6,0	0,0	0,0	−0,2	−0,2	−0,3	−0,3	−0,3	−0,3	−0,4	−0,3
№ 41, 27/IX	2,5	+3,0	+0,3	0,0	−0,1	−0,5	−1,1	−0,3	−0,1	−2,9	−1,9
	3,2	—	—	−0,1	−0,1	−0,1	−0,2	−0,3	−0,3	−0,3	−1,3
	4,5	−0,2	0,0	−0,1	−0,1	−0,2	−0,1	−0,3	−0,3	−0,2	−0,3
	6,0	−0,1	0,0	−0,2	−0,3	−0,3	−0,3	−0,4	−0,4	−0,3	−0,4
№ 53, 25/IX	2,5	+2,7	+0,4	+0,1	−0,1	−0,3	−1,1	−0,4	+0,1	−2,8	−2,0
	3,2	—	—	−0,2	−0,1	−0,1	−0,2	−0,4	−0,3	−0,4	−1,5
	4,5	0,0	0,0	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	−0,4	−0,4	−0,4	−0,6
	6,0	0,0	0,0	−0,2	−0,4	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5
№ 57, 25/IX	2,5	+0,5	+1,1	−0,1	−0,1	−0,4	−0,9	−0,3	+0,3	−2,9	−1,9
	3,2	—	—	−0,1	−0,1	−0,1	−0,2	−0,3	−0,1	−0,2	−1,2
	4,5	0,0	0,0	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	−0,2	−0,1	−0,2	−0,2
	6,0	0,0	0,0	−0,3	−0,3	−0,3	−0,6	−0,3	−0,3	−0,3	−0,3
№ 63, 27/IX	2,5	+1,3	+0,7	+0,1	−0,1	−0,2	−0,7	−0,3	−0,1	−2,5	−1,7
	3,2	—	—	0,0	−0,1	−0,1	−0,1	−0,3	−0,2	−0,3	−0,9
	4,5	0,0	0,0	0,0	−0,2	−0,1	−0,2	−0,3	−0,3	−0,3	−0,4
	6,0	0,0	0,0	−0,1	−0,4	−0,4	−0,4	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5

и копра. Если планом работ предусмотрено быстрое и удобное маневрирование с иглой и копром, то за 7-часовой рабочий день с одной иглой и одним копром можно забить от 10 до 12 свай.

Описанный выше способ забивки свай в связи с только что отмеченной возможностью оттаивания при помощи холодной воды, вероятно, является не единственно возможным и, возможно, не самым дешевым. Дело дальнейших исследований найти лучшие, наиболее дешевые и наиболее простые пути.

Описанный способ забивки свай имеет то несомненное достоинство, что он является проверенным на практике, так как применялся на строительстве в г. Игарке, в Сковородине и пр. при сооружении промышленных и гражданских зданий.

§ 43. О сохранении вечной мерзлоты под фундаментами и о возможности ее оттаивания под ними

Все описанные выше типы фундаментов в пучащих грунтах (отдельные опоры, заякоренные в вечной мерзлоте, заякоренные ленточные фундаменты, забитые в вечную мерзлоту вмерзшие сваи) требуют, конечно, сохранения вечной мерзлоты, а это в свою очередь требует знания законов распространения тепла как в деятельном слое, так и в слое вечной мерзлоты, как в талом и мерзлом состоянии, так и в процессе перехода из одного состояния в другое.

К сожалению, законы распространения тепла в мерзлых и талых грунтах, а равно в различного рода массивах в условиях нахождения последних в деятельном и вечно мерзлом слое до сих пор весьма мало изучены и во многих случаях недостаточно еще проверены практикой; в этом вопросе часто приходится итти ощупью.

Ряд фактов, правда немногочисленных, позволяет предполагать, что при заглублении бетонных фундаментов толщиной до 1 *м* на глубину 1,5 *м* и более ниже верхней границы вечной мерзлоты при холодном, неутепленном подполье, высотой не менее 0,4 *м* или при фундаментах в виде отдельных столбов размерами не свыше 1,5 × 1,5 *м* протаивания под фундаментами не будет наблюдаться. Этим, вероятно, объясняется и то важное обстоятельство, что устои и быки жел.-дор. мостов, заглубленные в грунт на 4,0 *м*, при наличии деревянной подушки из двух рядов брусьев сечением 20 × 20 *см*, уложенных накрест, работают устойчиво, без всяких деформаций.

Если наблюдаются деформации мостовых устоев и быков, таким образом устроенных, то причину нужно искать в аномалиях залегания вечной мерзлоты или в особенностях гидрогеологического режима, которые наблюдаются у водотоков рек, т. е. там, где устраиваются мосты.

Высказанные выше соображения не распространяются, конечно, на фундаменты из другого материала и других размеров. Так, бутовые фундаменты являются, повидимому, несколько более теплопроводными (72, стр. 26): под источниками тепла, занимающими большую площадь, протаивание, вероятно, может быть более глубоким и т. п.

При устройстве же полов нижнего этажа непосредственно на земле, т. е. при отсутствии подполья, надежная глубина, при которой не будет протаивания, как увидим ниже, соответствует заложению подошвы фундаментов не менее чем на 3 *м* ниже верхней границы вечной мерзлоты.

Сказанное справедливо для более или менее нормальных температурных условий здания, когда температура воздуха внутри не превышает +20° и когда непосредственно возле стен нет значительных источников тепла (например, кузнечных горнов, котлов и т. п.). Радиаторы парового или водяного отопления предполагаются при этом отделенными от стен изоляцией из асбеста, пробки или какой-либо другой. То же относится к горнам, котлам и т. п., если они не могут быть удалены от стен. Эти замечания, конечно, не относятся к деревянным фундаментам в виде отдельных стульев или свай.

Можно считать, что по деревянным фундаментам тепло грунтам не передается, а если и передается, то во всяком случае не интенсивнее, чем по окружающим их грунтам. Это обстоятельство в связи с данными опыта позволяет установить для случая деревянных фундаментов пока следующие практические правила.

В помещении с подпольем высотой от 0,5 до 1,0 *м* и выше (считая это расстояние от уровня земли в подполье и до нижней кромки половых балок) могут происходить любые тепловые процессы, которые не понижают верхней границы вечной мерзлоты под подпольем. Но для этого должно быть соблюдено следующее условие: поверхность пола с обыкновенным термическим сопротивлением (около) трех не должна нагреваться свыше +20° (зимой). Эти требования к температуре пола и его термическому сопротивлению могут быть заменены другими требованиями, а именно, чтобы средняя годовая температура подполья оставалась отрицательной и не превышала —1°. Что же касается цоколя, то никаких особых требований к нему не предъявляется. Он может быть даже образован шлаковой засыпкой толщиной 0,5 *м* между двумя щитами из досок, как это фактически сделано в доме Сковородинской станции. Точно так же никаких особых требований не предъявляется и к поддержанию какого-либо особого режима в подполье, например проветривания его зимой и закрытия на летнее время, как этого требуют Цытович и Сумгин (60, стр. 392).

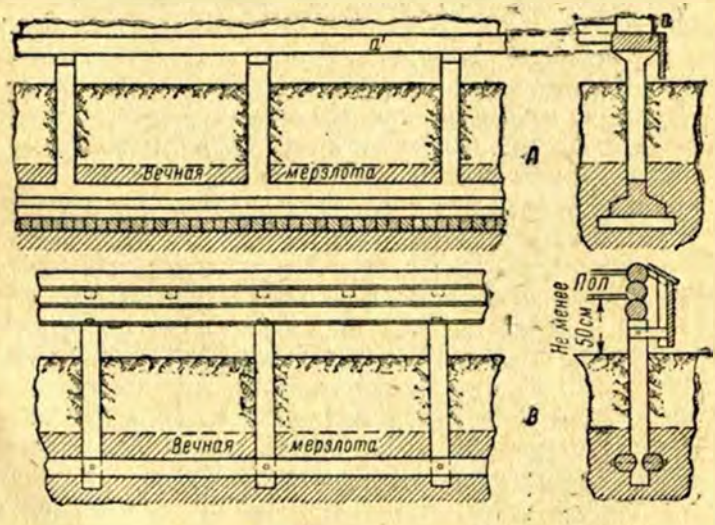
Все перечисленные требования легко выполняются в жилищном строительстве, а также в строительстве общественных зданий и тех промышленных и производственных, где внутренний температурный режим близок к жилищному или характеризуется более низкими температурами.

Под перечисленными выше зданиями при наличии подполья вечная мерзлота будет сохраняться. Иное получается по методам расчета устойчивости состояния режима мерзлоты, предложенным Цытовичем и Сумгиным (60, стр. 392 и далее). Если подсчитать по их методу термический баланс грунтов под зданием Сковородинской станции, существующей уже 7 лет, и грунтов вне здания, то окажется, что вечно мерзлый грунт под зданием станции должен за этот срок значительно про-

таять и станции должно грозить разрушение, несмотря на углубленные на 5 *м* в землю опоры.

А между тем (см. главу IV) действительная верхняя граница вечной мерзлоты под зданием станции поднялась на 0,9 *м* и уже несколько лет удерживается на этом уровне; столбы фундаментов станции не испытывают никаких деформаций. Вопреки указаниям Цытовича и Сумгина отдушины в цоколе этого здания открываются летом и закрываются на зиму. Открытие подполья летом и энергичное проветривание его делаются совершенно необходимыми из-за конденсации водяных паров. Конденсационная вода при закрытых отдушинах подполья с наступлением тепла буквально течет с отпотевших половых балок, и энергичное проветривание делается необходимым.

Здесь не приводится расчет термического режима для Сковородинской станции по методу Цытовича и Сумгина, так как все данные для



Фиг. 191. Фундаменты и цоколи

этого расчета как по температуре и влажности грунтов, так и по устройству полов и подполья имеются в настоящей книге. Читатель может проделать его сам, руководствуясь методикой, изложенной в труде Цытовича и Сумгина «Основания механики мерзлых грунтов». Здесь интересно отметить только следующее. В главе VIII указанной книги (60, стр. 308) говорится о возможности деградации вечной мерзлоты, т. е. о возможности постепенного уничтожения «запасов холода, оставшихся нам в наследство от эпохи с более холодным климатом». В главе X той же книги при подсчете количества тепла Q_1, теряемого грунтом в период охлаждения на открытой площадке, и количества тепла Q_2, получаемого грунтом в период нагревания на той же площадке, имеется указание авторов (60, стр. 394), что в условиях вечной мерзлоты обычно $Q_1 > Q_2$; это должно иметь следствием образование запасов холода, что указывает на явление, обратное деградации.

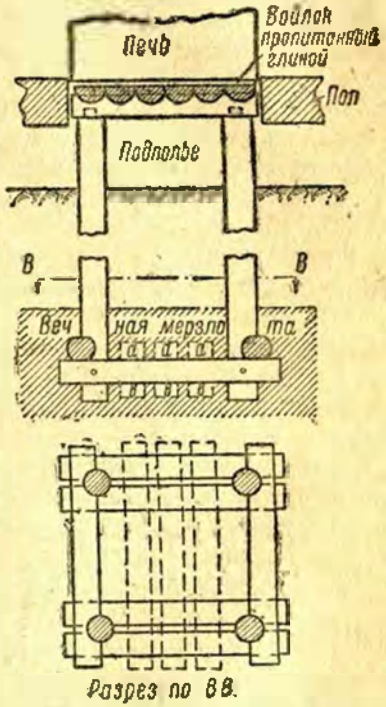
Кроме метода Цытовича и Сумгина для расчета термического режима фундаментов имеются и другие, например расчет, предлагаемый Швейковским. Но, к сожалению, Сковородинская станция, не имея работы Швейковского, не могла проверить его в натуральных условиях, что, конечно, было бы очень важно, так как в печати этот способ оценивается как строгий и точный («Метеорология и гидрология», 1937 г., № 1).

Ниже рассматривается ряд конструкций фундаментов.

На фиг. 191 показаны схемы двух фундаментов с подпольем: железобетонного и деревянного. Железобетонный фундамент (фиг. 191, *А*) имеет одиночную деревянную подушку, которая использована для уменьшения передаваемого на грунт давления, для чего поперечные брусья выступают за пределы железобетонной ленты. Железобетонные стойки перекрыты железобетонной плитой *а*, на которой и возводятся стены здания.

В деревянной конструкции (фиг. 191, *В*) показано устройство висячего цоколя. Он не доходит до земли на 10—15 *см* и потому не деформируется пучащим грунтом.

Зазор между цоколем и поверхностью грунта может быть заложен доской изнутри и засыпан сухим грунтом (песком, гравием) или шлаком. Печи в зданиях с подпольем можно устраивать или на сваях или по чертежу, изображенному на фиг. 192. Обе конструкции фундаментов под печи испытаны на практике и дали вполне удовлетворительные результаты.



Фиг. 192. Фундамент под печь

Обрезки *а*, *а*, укладываются при необходимости уменьшить давление на вышележащий грунт при пучении. Обрезки *в*, *в* укладываются, когда нижележащий грунт слабый и нужно уменьшить на него давление

Рекомендуемые иногда фундаменты под печи в виде срубов или ряжей, заполненных внутри песком, шлаком или строительным мусором, хуже. Не надо забывать, что грунт в холодном подполье может пучить, а сруб или ряж слабо сопротивляются выдергивающим усилиям при пучении.

Рассмотрим далее некоторые вопросы, связанные со строительством зданий, в которых имеются значительные источники тепла. Здесь дело обстоит значительно труднее, в особенности когда полы нижнего этажа приходится располагать непосредственно на самой земле, а источник тепла (например, топки котельных или борова) заглублять в землю.

То же надо сказать о прокладке паропроводных, водопроводных, нефтепроводных и других труб у фундаментов зданий или сквозь эти фундаменты и т. п.

Мы не можем сказать вполне определенно, как будет распространяться тепло от таких установок, равно как и в тех случаях, когда внутри здания проектом намечаются значительные массивы фундаментов под котлы или под машины с тем или иным выделением тепла или когда источники тепла, например локомобильные топки, заглубляются в землю. Мы можем только полагать, что протаивание в таких случаях будет еще более глубоким, чем в тех, о которых мы говорили выше. Примеры такого протаивания нами уже приводились (см. главу IV, § 28).

Некоторые из приведенных фактов, а также протаивание под реками показывают, повидимому, на стабилизацию протаивания на известной глубине при неизменности определенных внешних условий.

Из сказанного ясно, насколько сложен этот вопрос, а также ясно, что достаточных данных для рационального проектирования объектов со значительным выделением тепла на вечно мерзлых пылеватых супесях и суглинках, повидимому, еще нет.

Ввиду недостаточной изученности вопроса о протаивании и изоляционных свойствах различных материалов, помещаемых в деятельном слое и в слое вечной мерзлоты, приходится итти на значительное заглубление фундаментов, а следовательно, и удорожание стоимости их или все источники тепла (например, заглубленные топки котлов, борова и т. п.) приподнимать над уровнем земли, создавая подполья, и устраивать искусственную вентиляцию, что опять-таки сильно удорожает строительство и дает сооружения, не отличающиеся простотой и изяществом.

Для решения этих задач и скорейшего выхода из этого затруднительного положения необходимы:

1) тщательное изучение изоляционных свойств различных материалов в условиях нахождения таковых в вечной мерзлоте и деятельном слое, учитывая при этом возможную разницу во влажности и температуре среды;

2) изучение в условиях различной влажности и температур вечной мерзлоты и деятельного слоя теплопроводности различных строительных материалов (бетона, бута, кирпича, кирпичной кладки и т. п.), что нужно выполнить в лабораториях с обязательной последующей проверкой в естественных условиях;

3) продумать вопрос применения таких типов котлов, двигателей, и других установок, выделяющих тепло, которые не требовали бы необходимости заглублять в землю топки и другие выделяющие тепло части и изоляция которых от грунтов была бы легко выполнима.

В настоящее же время, при современном уровне наших знаний о вечной мерзлоте, для строительства горячих цехов и для устройства зданий, где предполагается устройство полов непосредственно на поверхности земли, без подполья, и когда предусматривается наличие постоянных положительных температур внутри этих зданий, надлежит

по возможности избегать площадок, деятельный слой которых и вечная мерзлота под ними состоят из весьма влажных пылеватых суглинков и супесей.

Для указанных выше зданий и аналогичных им надо искать площадки по возможности с неглубоким залеганием коренных пород, для того чтобы основать фундаменты непосредственно на этих породах. Пример устройства фундаментов приблизительно в таких условиях дан в следующем параграфе. Но поскольку найти площадку с неглубоким залеганием коренных пород все же не всегда возможно и поскольку необходимость может заставить строить такие здания на вечно мерзлых пылеватых суглинках или супесях, задача о наиболее рациональном строительстве в этих условиях все же остается.

Весьма возможно, например, что при устройстве депо можно применить устройство полов на шанцах, т. е. с искусственно охлаждаемым небольшим по высоте подпольем, какие устраиваются иногда в холодильниках.

§ 44. Пример сооружения фундаментов на трещиноватой скале

Пусть обследование показало, что место для расположения здания, положим, силовой станции, представляет собой пологую площадку, покрытую травянистым покровом с мелкой порослью. Растительный слой на площадке, не превышающий 30 *см*, покрывает слой суглинка мощностью 3,5 — 4 *м*. Суглинок этот включает в себя гравий, гальку и щебенку, причем насыщенность суглинка этими включениями растет с глубиной. На глубинах 3,5 и 4 *м* суглинок переходит в разрушенную коренную породу. Этот слой сильно разрушенной породы (частью песчаников, частью глинистых сланцев) толщиной 0,5 *м* переходит далее на глубине 4 — 4,5 *м* в трещиноватую скалу.

Грунт в верхних слоях до глубины 1,5—2 *м* явно пучинистый. Грунтовые воды наблюдаются в небольшом количестве непосредственно под растительным слоем и в более значительном количестве ниже, причем в шурфах, вырытых в различных местах на глубину от 3 до 5 *м*, грунтовая вода стоит на глубине от 1,5 до 2,5 *м*.

Уровень грунтовой воды в шурфах весьма разнообразен. Движение грунтовых вод не изучено из-за краткости времени, отведенного для изысканий.

Вечная мерзлота начинается с глубины 3 — 3,5 *м*. Для устройства устойчивых фундаментов силовой станции и для правильного ее функционирования необходимо:

1) заложить фундамент на скале, допустив давление 2 — 3 *кг/см²*;

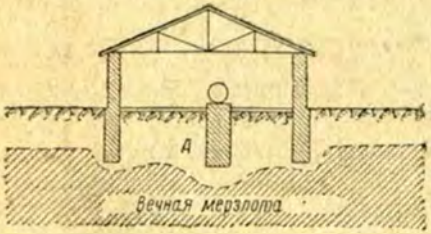
2) предохранить здание от образования непосредственно в нем или возле него наледей, на возможность появления которых указывает наличие грунтовых вод;

3) предохранить фундаменты здания от пучения.

Выполнение этих требований, конечно, вполне обеспечивает в данном случае нормальное существование фундаментов независимо от того, будет ли сохранен мерзлотный режим грунтов или будет нарушен в связи с протаиванием под зданием.

Ввиду недостаточной изученности гидрогеологических и мерзлотных условий было бы желательно сохранить и мерзлое состояние скалы под фундаментом, так как следствием протаивания скалы могло быть проникновение по ее трещинам воды под здание.

Здание силовой станции, являясь источником тепла, понижает горизонт вечной мерзлоты и создает в последнем некоторое углубление, как показано на фиг. 194. В случае, если пространство *А* заполнено водопроницаемыми грунтами, к которым нужно отнести и трещиноватую скалу, то в этом пространстве, как в чаше, возможно скопление воды. При известных условиях зимнего промерзания возможно поступление воды в здание с дальнейшим образованием наледей, примеры чего были приведены выше. Это накопление влаги под зданием, конечно, является нежелательным, поэтому было бы целесообразно уменьшить протаивание под зданием так, чтобы оно не достигало подошвы фундамента, как это показано на фиг. 193. В этом последнем случае можно



Фиг. 193. Возможное изменение вечной мерзлоты под зданием

Фиг. 194. На фигуре показано положение, при котором дальнейшее понижение границы вечной мерзлоты нежелательно

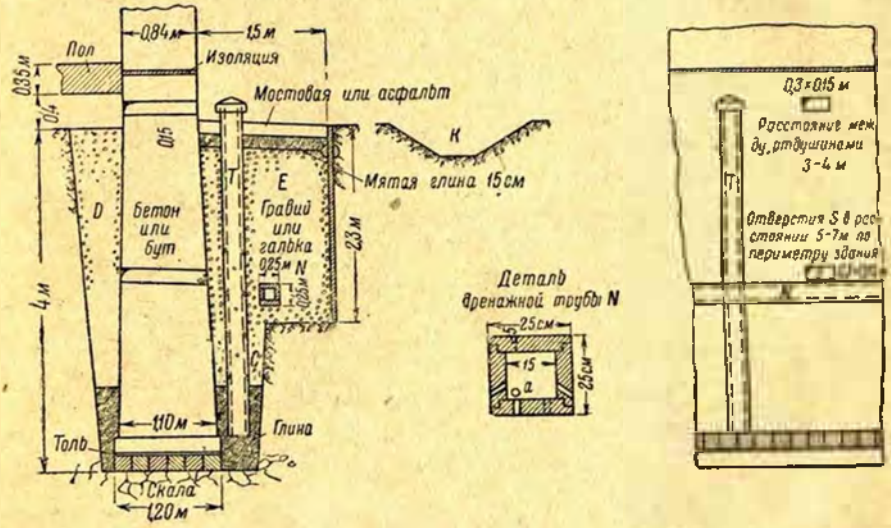
было бы посредством дренажа ограничиться отводом грунтовых вод только снаружи здания, так как в пространство *А* эти воды попасть не могли бы. В связи с изложенным к конструкции фундаментов и пола предъявляется еще дополнительное требование: без удорожания строительства предотвратить протаивание ниже подошвы фундаментов.

Учитывая то, что сказано выше о протаивании, перейдем к рассмотрению схемы фундамента, намеченного в этих условиях.

На фиг. 195 представлен схематический проект одного из возможных решений задачи, удовлетворяющего поставленным выше условиям. Сплошной бетонный фундамент заглубляется на 4 *м* от поверхности земли и основывается на скале. Под фундамент уложена деревянная подушка из брусьев сечением 20 × 20 *см*, шириной 1,2 *м*. Между двумя рядами брусьев проложен толь. Подполье — высотой 30—40 *см* — соединяется с наружным воздухом рядом отдушин размерами 30 × 15 *см*. Укладка брусьев и устройство подполья сделаны в целях возможно полного сохранения мерзлого режима.

Для предохранения здания от проникновения в него грунтовых вод и образования наледей фундамент дренирован. Для этого снаружи вокруг фундамента вырывается траншея *Е* шириной около 1,5 *м*,

которая засыпается галькой или гравием, а сверху покрывается слоем мятой глины, поверх которой устраивается мостовая или асфальтированный тротуар с небольшим уклоном в сторону от здания. Глубина траншеи примерно равна глубине максимального протаивания грунта. Гравий, находящийся в траншее *E*, во избежание заиливания ограждается деревянной стенкой устроенной из досок толщиной 5 *см*, из которых некоторые (одна доска на 1 — 1,5 *м* длины стенки) имеют ряд отверстий, просверленных под углом 45°, как это видно из фиг. 195. Сверху эти доски соединяются парными схватками из пластин. В низу траншеи над границей наибольшего протаивания укладывается деревянная труба *N* для отвода грунтовых вод.



Фиг. 195. Фундамент на трещиноватой скале

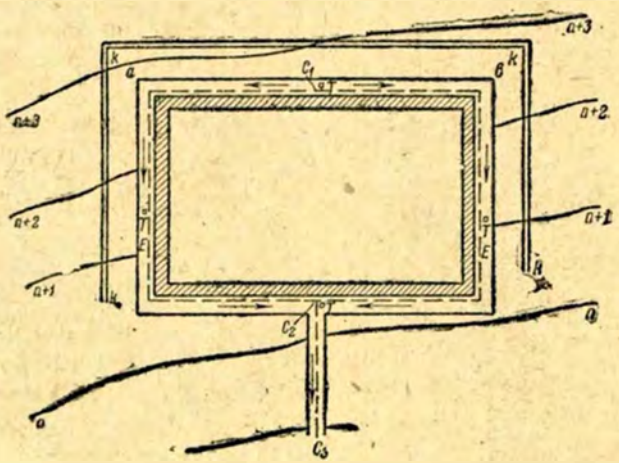
Трубы, как видно из фиг. 196, образуют вокруг здания замкнутый контур, в данном случае четырехугольный. Эти трубы укладываются с небольшим уклоном в обе стороны от некоторой точки C_1 и сходятся у точки C_2, как это показано стрелками. В точке C_2 эти трубы соединяются в одну C_2C_3, которая и отводит грунтовые воды от здания в то место, где образование наледи не угрожает зданию.

Внутри труб укладывается паропроводная трубка на тот случай, если постепенное намерзание закупорит сделанные в трубах отверстия и дренаж перестанет действовать. Там, где есть достаточное количество электрической энергии, возможен подогрев такой трубы электричеством. Следует отметить, что возможность такой закупорки у здания маловероятна и может иметь место редко. Наиболее опасным участком обыкновенно является конец отводящей воду трубы C_2C_3. У выходного конца мы имеем наиболее вероятное место закупорки по-

степенным обледенением, и здесь предусмотреть прогрев паром или электричеством необходимо.

Трубы *N* укладываются в деятельном слое над верхней границей вечной мерзлоты. Так как при укладке в вечной мерзлоте возможно постепенное обледенение, а следовательно, при неблагоприятных условиях и более или менее постоянный подогрев. Для надзора за правильным функционированием дренажа устанавливается несколько вертикальных труб *T* (фиг. 195 и 196), которые дают возможность наблюдать за горизонтом грунтовых вод у самого фундамента здания и за состоянием, в котором находятся эти воды (замерзают они или нет и если замерзают, то на какой глубине).

Трубы выполнены из досок, осмолены, в стенках их сделаны наклонные отверстия (фиг. 195). Вверху эти трубы снабжены деревянными



Фиг. 196. План дренажа водоотводной канавы

крышками. Пространства *D* и *C* между котлованом и фундаментом внизу забиваются плотно мягкой глиной на высоту около 1 *м*, а выше засыпаются гравием.

Заделка внизу глиной предусмотрена для того, чтобы в случае, например, скопления вод снаружи здания в месте *C* эти воды под напором не проникли под подошву фундамента и не попали в область, ограниченную фундаментами.

Возможен, однако, и другой случай (о чем уже сказано выше), когда грунтовые воды могут проникнуть непосредственно в область, ограниченную фундаментами снизу вследствие, например, случайного оттаивания вечной мерзлоты где-нибудь под фундаментами стен, машин, у труб и т. п. На этот случай предусмотрена засыпка гравием или вообще дренирующим грунтом области *D* и устройство в одном горизонте наклонных отверстий в теле фундамента в расстоянии примерно 5 *м* одно от другого. В случае появления таких грунтовых вод, (т. е. в области, ограниченной фундаментами здания) эти воды будут

переливаться через отверстия и отводиться в сторону дренажными устройствами снаружи фундамента.

Кроме отвода грунтовых вод необходимо предусмотреть и отвод поверхностных вод, для чего запроектирована канава *k*, ограничивающая здание с нагорной стороны в виде буквы *П*, как видно на фиг. 196. Опасаться действия на фундамент выпучивающих сил грунта не приходится, так как обезвоженный гравий не пучит, поэтому в данном случае возможно устройство не только бетонного фундамента, но и бутового, несмотря на то, что бут слабо сопротивляется растягивающим усилиями и что стенки из бута неровны и потому мало пригодны, если имеет место пучение. Только деревянная стенка (фиг. 195), ограничивающая гравий в пространстве *E*, может деформироваться силами пучения и потребует иногда ремонта.

Конечно, предполагаемое решение не является единственным и, весьма возможно, не является наилучшим, но во всяком случае оно разрешает поставленную задачу и уже применено на практике.

§ 45. О значении времени года при устройстве фундаментов

Выше в вопросе о наилучшем времени года для забивки свай выяснено, что лучшим временем года для этих работ является период с января по июнь включительно, с тем чтобы до начала пучения могло произойти вмерзание свай в вечную мерзлоту.

Это соображение имеет место и при устройстве фундаментов других типов в пучинистых грунтах. Так, деревянные или железобетонные фундаменты в виде отдельных столбов или ленточные, которые должны быть заякорены в вечной мерзлоте, будучи установлены перед началом пучения (например, в августе или сентябре), не дают гарантии незыблемости на первый год, так как они засыпаются талым грунтом, который может не успеть замерзнуть к началу пучения. Но это замечание не относится к тем случаям, когда вертикальные силы нагрузки превышают выдергивающие силы пучения и фундаментные столбы не работают на растяжение.

Для того чтобы осуществить замерзание заякоренных частей в вечно мерзлом грунте, могут быть применены разные приемы. Фундаменты могут быть устроены после процесса пучения, т. е. в декабре—феврале, и могут быть засыпаны мерзлым грунтом. В последующем при оттаивании деятельного слоя вода проникает в пористый грунт и там замерзает. Но можно произвести засыпку талым грунтом с утрамбовкой и последующим естественным промораживанием.

Фундаменты, устроенные весной (в апреле, мае и даже в начале июня), будучи засыпаны талым грунтом, могут подвергнуться вмерзанию в вечную мерзлоту так, как это происходит со сваями, если только объемы, засыпаемые землей, не особенно велики.

Фундаменты, выполненные перед началом пучения, могут быть первый год несколько приподняты пучением из земли. Если же подобная деформация совершенно недопустима, то в этом случае должны быть приняты меры, аналогичные мерам, рекомендованным выше для

свай, т. е. часть этих фундаментов, находящаяся в деятельном пучинистом слое, либо вовсе должна не засыпаться до промерзания грунта, охватывающего якори в пределах вечной мерзлоты, либо в пределах деятельного слоя перед засыпкой котлована должна обмазываться вазелином и обвертываться толем.

§ 46. Об учете возможности поднятия мерзлоты под зданием

Здесь нелишне отметить еще следующий способ заякоривания фундамента в вечной мерзлоте, который тоже применялся на практике. Этот способ, удешевляющий строительство, основан на том факте, что под сооружениями с подпольем и температурным режимом жилого помещения вечная мерзлота в пылевато-илистых грунтах поднимается на 0,8 — 0,9 *м*. Ввиду этого якори деревянных фундаментов не заглубляются в вечную мерзлоту, а устраиваются непосредственно на ее поверхности либо с небольшим заглублением в ней (25 — 30 *см*).

Поднявшаяся вечная мерзлота в первый же год схватывает их и делает незыблемыми. В этом случае все замечания о значении времени года, высказанные выше, остаются в силе.

Второе, на что необходимо обратить внимание, — это желательность устройства более широкого и более длинного подполья, для чего цоколь здания должен по возможности дальше отстоять от фундаментных стоек, в особенности с южной стороны. Это требование основывается на том, что верхняя граница вечной мерзлоты поднимается главным образом вследствие отсутствия инсоляции.

§ 47. Предложения разных авторов по строительству фундаментов

Предложения Цытовича и Сумгина по строительству в условиях вечной мерзлоты частично уже рассмотрены нами ранее. Рассмотрим предложения, рекомендуемые в сборнике № 8 под названием «Вечная мерзлота и железнодорожное строительство» (13, стр. 45 и далее), так как они и до сих пор иногда применяются на практике.

В сборнике имеются правильные замечания относительно того, что попытки осушения пылеватых грунтов путем закрытого дренажа или устройством канав, кюветов, отепляющих коллекторов дают иногда лишь кратковременные улучшения, но вносят затруднения в обеспечение правильной работы осушительных устройств и увеличивают ежегодные расходы по ремонту и содержанию их. Точно так же дана правильная критика засыпки фундаментов песком, щебнем, шлаком и т. д. как меры против пучения, которая кроме вреда ничего не приносит.

В остальном материалы сборника можно подразделить на предложения, рекомендующие следующие меры:

а) против оттаивания вечной мерзлоты под фундаментами;

б) против неравномерной осадки сооружений;

в) против неравномерного выпучивания.

Все пункты первого раздела «а» недостаточно конкретны. Так, в пункте 1 предлагается выбирать котлован на глубину до мерзлоты

и устраивать искусственное основание из мало теплопроводного материала (например, кварцевого песка, паровозного шлака или щебня из обожженной глины), но не указывается, для каких это фундаментов рекомендуется (деревянных, бетонных и т. д.). Не дается толщина искусственного основания, и не оговорено, что и песок и шлак теряют свои изоляционные свойства при пропитывании их водой.

В пункте 2 предлагается закладывать фундаменты на большую глубину, чем та, на которую может распространяться оттаивание. Это правильно, но нет указаний, каким образом это может быть осуществлено, так как именно глубина распространения оттаивания нам пока неизвестна. Соображения по пункту 8 вызывают сомнения. Этот пункт предлагает основывать полы первого этажа на слое песка или шлака толщиной 25 — 35 *см* с прикрытием войлоком, залитым асфальтом. Что этим достигается, — не вполне ясно, так как фундаменты (например, под машинами, а также под стенами) будут проводить тепло независимо от находящегося возле них пола. Что же касается самого пола, то он все равно может проводить тепло в незначительной мере при значительных постоянных источниках тепла, расположенных на нем.

В пункте 10 предлагается укладывать под зданием промораживающие трубы. Это предложение является весьма сомнительным в практическом отношении.

Пункты раздела «б» страдают теми же недостатками.

Здесь в пункте 1 рекомендуется против неравномерной осадки облегчение веса сооружений. Если это относится к фундаментам, основанным на вечной мерзлоте, на скале, на плотно слежавшемся гравии и т. д., то это предложение совершенно неверно. Неверным оно является и при заложении фундаментов в деятельном слое, например в пылеватых суглинках. Даже при самой незначительной нагрузке южная сторона здания будет садиться больше, чем северная, о чем сказано выше.

В пункте 3 рекомендуется применять подвижные металлические конструкции, что также является практически мало приемлемым и, пожалуй, совершенно ненужным.

Устройство треугольных ростверков под зданием, называемое «американским способом», пригодно лишь для очень небольших и легких зданий.

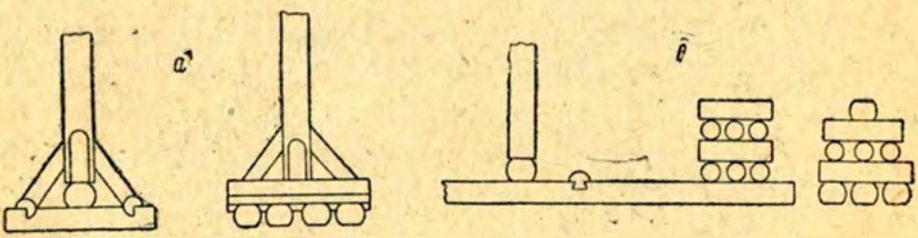
Предложения по разделу «в», предлагающие рецептуру против неравномерного выпучивания сооружения, имеют в виду борьбу с выпучиванием вообще, независимо от его неравномерности. Например, в пункте 2 рекомендуется штукатурка вгладь стенок фундамента, что является совершенно правильным.

Что касается пункта 3 этого раздела, где предлагается смазка боков фундамента салом и дегтем, то здесь следует отметить, что, имея в виду не уничтожение неравномерности, а уничтожение пучения, рекомендуемые мероприятия являются сомнительными в том отношении, что продолжительность действия этих смазок совершенно не выяснена. В пункте 5 предлагается по возведении фундаментов засыпать котло-

ваны песком, щебнем гравием и т. д., что и до сих пор часто применяется. Но эта нерациональная мера, как сказано выше, правильно оценена самим сборником (13, стр. 46). Засыпка из гравия или гальки может быть рассматриваема как мера против пучения, только при условии обезвоживания.

Но во всех рассмотренных выше разделах есть пункты, значение и важность которых следует подчеркнуть. Эти пункты указывают на необходимость отвода воды от сооружения и из-под него. Отвод как поверхностных, так и грунтовых вод является, конечно, одним из важнейших условий для правильного функционирования сооружений, выстроенных в районе вечной мерзлоты, и должен осуществляться везде, где это только возможно. К сожалению, как уже отмечено выше, пылеватые и глинистые грунты слабо отдают воду, и меры к обезвоживанию этих грунтов, как правило, ни к чему не приводят.

Предлагаемые в сборнике меры борьбы с вредным воздействием наличия неглубокого залегания вечной мерзлоты на устойчивость сооружения являются необоснованными, а иногда и совершенно неправильными.



Фиг. 197. Типы деревянных фундаментов, применявшиеся на строительстве в Игарке

Нельзя согласиться с таким приведенным в сборнике положением: «чем глубже мерзлота, тем меньше число и интенсивность деформаций» (13, стр. 50). Предлагаемое далее углубление горизонта вечной мерзлоты путем снятия дерна и торфа является скорее неизбежным, чем необходимым. Предложение осушать грунт до глубины максимального его оттаивания противоречит высказанному выше в той же статье положению и, как отмечено, для пылевато-илистых грунтов не достигает цели.

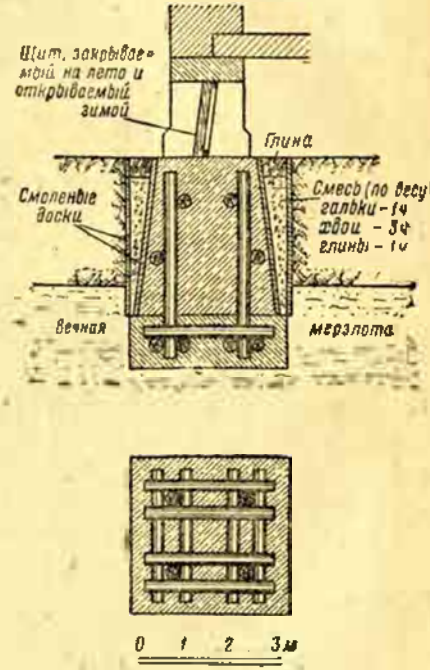
По нашему мнению, нерациональными являются в ряде случаев и те типы фундаментов (кроме свай), которые приведены в сборнике «За индустриализацию советского востока» (23, стр. 70), так как они (фиг. 197) не предусматривают возможной работы фундаментных столбов на растяжение и могут применяться, строго говоря, лишь там, где нагрузка на фундаментные столбы превышает выдергивающие силы выпучивания.

Благополучное существование сооружений, построенных на этих фундаментах, по крайней мере в течение первых лет, о которых имеются сведения, вероятно, объясняется следующими обстоятельствами:

1) превышением нагрузки на фундаментные столбы над силами выпучивания, о котором сказано выше, и тем обстоятельством, что столбы засыпались смесью из грунта и опилок, что должно было уменьшить силы пучения;

2) значительным поднятием мерзлоты в пределах подполья этих домов, так что деятельный, пучащий слой делался весьма незначительным, а низ фундаментов вмерзал в поднявшуюся вечную мерзлоту.

Вероятно, нецелесообразны фундаменты и искусственные основания, которые приведены выше (фиг. 175 и 176), не говоря уже об их высокой стоимости. В самом деле, мы уже знаем из предыдущего (см. главу IV) о сомнительности изоляции из дерева, если не гарантировать его сухое состояние. Нам неизвестно, испытаны ли положительные изоляционные свойства песка или гравия, смешанных со мхом. Мы полагаем, что автор проекта, повидимому, рассчитывает на сухое состояние этой смеси, которая ограждается отчасти деревянной изоляцией, а отчасти слоем глины. Однако нет никакой уверенности в том, что эта изоляция не будет расстраиваться и разрушаться при пучении прилегающего к ней пучинистого грунта.



Фиг. 198. Фундаменты в условиях вечной мерзлоты (по Левитскому)

Таким образом, фундаменты, устроенные по типу, данному на фиг. 175 и 176, несмотря на их сложность и дороговизну, не дают никакой гарантии в их незыблемости.

В значительной мере сомнительным является и предложение по устройству фундаментов в районах вечной мерзлоты, которые приведены у Левитского (70, стр. 184 и далее). Так, набивные сваи вряд ли следует применять в условиях вечной мерзлоты. Приводимые Левитским математические обоснования по устройству таких свай мало убедительны. На фиг. 198 отметим конструкцию фундамента, приведенного в книге Левитского. Эта конструкция представляет отдельный столб сечением 3,3 × 3,3 *м* при глубине заложения около 4,5 *м* (70, стр. 196) и при высоте подполья 2 *м*. Фундамент, как видим, имеет значительные размеры и, повидимому, предназначен для больших сооружений. В пределах деятельного слоя и отчасти слоя вечной мерзлоты он огражден смесью из гальки, хвои и глины в пропорции (по весу) 1 : 3 : 1, смесь заключена между смолеными досками и прикрыта сверху слоем глины. Наличие этого ограждения показывает, что грунт,

для которого предназначается этот фундамент, пучит, так как если бы этого не было, то устройство какого-либо ограждения было бы излишним.

Едва ли намечаемое ограждение является устойчивым, потому что внешний ряд досок будет расстраиваться при пучении прилегающего к нему грунта; изоляционная смесь, несмотря на точность рецептуры, тоже вызывает сомнения.

То, что рекомендует Левитский в своем курсе оснований и фундаментов, рекомендует в своем труде и Рощин (74, стр. 248, 250).

При рассмотрении этих рекомендованных типов фундаментов, к сожалению, нельзя установить, являются ли они только проектами автора, еще нигде не осуществленными, или же взяты из практики и где-то уже с успехом применялись.

Теперь несколько замечаний о «деградирующей вечной мерзлоте».

В § 38 мы указывали, что во «Вр. Т. У.» метод уничтожения вечной мерзлоты при ее деградации считается и технически целесообразным и экономически выгодным. Там же мы отметили, что вечная мерзлота в Сковородине представляет, так сказать, классический пример деградирующей вечной мерзлоты. Однако из приведенных в § 42 табл. 33 и 34 можно видеть, как после оттаивания эта «деградирующая» вечная мерзлота восстанавливается. Возникает вопрос, как же при такой деградирующей вечной мерзлоте итти к ее уничтожению и что понимать под этим термином?

Если принять во внимание факт протаивания деятельного слоя на оголенной площадке всегда на одну и ту же величину и факт поднятия вечной мерзлоты под домами, то указания на техническую целесообразность и рентабельность уничтожения такой мерзлоты при строительстве делаются более чем сомнительными.

На основании опыта строительства в условиях Сковородина можно определенно сказать, что строить надо так, как если бы никакой деградации не было.

В заключение еще раз отметим, что наиболее не выясненными вопросами, требующими настоятельной, скорейшей и всесторонней разработки, являются вопросы о распространении тепла в деятельном слое и вечной мерзлоте при различных условиях влажности, температуры и гранулометрического состава, а также вопросы теплопроводности и стойкости различного рода материалов и изоляции в условиях нахождения последних в деятельном слое и в вечной мерзлоте.

ГЛАВА VII

ДОРОЖНОЕ ПОЛОТНО И ИСКУССТВЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ

§ 48. Дорожное полотно. Устройство дорожного полотна на марях. Борьба с наледями

Если сопоставить неудачи, постигшие строителей при возведении земляного полотна и искусственных сооружений, с неудачами при строительстве жилищных и промышленных зданий, то окажется, что наибольшее число неудач падает именно на последние сооружения, а земляное полотно и искусственные сооружения на железных дорогах деформируются значительно менее.

Если же из неудач по сооружению земляного полотна отбросить все те, которые не вызываются наличием вечной мерзлоты, но которые иногда приписываются ей, то на долю неудач, связанных с вечной мерзлотой, придется не так уж много.

В отношении устройства земляного полотна и искусственных сооружений нужно повторить то, что уже сказано по поводу жилищного и промышленного строительства, а именно, что универсальных решений для строительства насыпей, выемок мостов и труб в условиях вечной мерзлоты нет и что в значительном числе случаев они возводятся и должны будут возводиться так, как если бы никакой вечной мерзлоты не было.

Наиболее характерной особенностью для насыпей и выемок в районах вечной мерзлоты будет то обстоятельство, что под насыпями граница вечной мерзлоты будет подниматься и при некоторой высоте насыпи входить в эту насыпь, а в выемках граница вечной мерзлоты будет опускаться вниз.

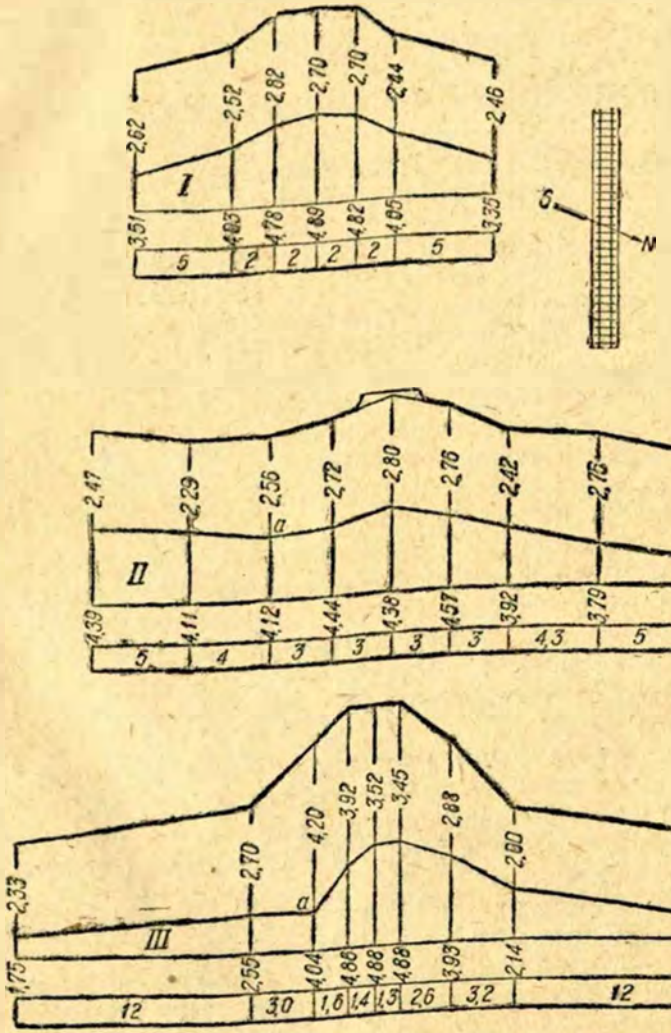
На фиг. 199 даны три профиля невысоких насыпей жел.-дор. земляного полотна, на которых показана глубина протаивания, обнаруженная во второй половине октября 1934 г. Величина глубины протаивания показана на ординатах фиг. 199. Горизонтальный масштаб вдвое меньше вертикального. Ориентация относительно стран света жел.-дор. полотна, соответствующего этим профилям, почти одна и та же и показана на схематическом плане в верху фиг. 199; таким образом, на фигуре левые откосы насыпи обращены почти на юг.

Рассмотрение этих профилей приводит к следующим заключениям:

1) протаивание насыпи больше, чем протаивание прилежащей территории;

2) протаивание с южной стороны (если один из склонов насыпи имеет южную или почти южную экспозицию) больше, чем с северной;

3) в случае южной экспозиции одной из сторон какой-либо насыпи при оттаивании имеется тенденция к образованию с южной стороны у подошвы насыпи талого углубления *а*, показанного на про-



Фиг. 199. Поднятие вечной мерзлоты под насыпью

филях *II* и *III* (фиг. 199). Такого рода углубления наблюдаются и с южной стороны; очень вероятно, что у больших насыпей эти талые углубления больше, чем у насыпей меньшего размера.

Все эти обстоятельства могут иметь влияние на режим насыпи при насыщенных влагой, а также и при водопроницаемых грунтах, т. е.

при пылеватых суглинках и пылеватых супесях со значительной влажностью. В этих случаях в углублениях *а* можно ожидать скопления грунтовых вод и переувлажнения вследствие этого грунтов у подошвы насыпи с южной стороны, что в свою очередь может повести к оползням. Если при возведении насыпи возникают опасения такого рода, то необходимо принять меры к тому, чтобы углубления *а* не образовывалось. Здесь рекомендуется устройство бермы с южной стороны из мало теплопроводного материала, например растительной земли, торфа, а если возможно, то и шлака. Торф как материал, способный к воспламенению, необходимо покрыть дерном. Для других материалов покрытие дерном является тоже желательным, чтобы уменьшить возможную циркуляцию воздуха в них.

Из профилей фиг. 199 мы видим, что мерзлота только тогда может войти в тело насыпи и подняться выше дневной поверхности, когда высота насыпи превысит толщину деятельного слоя. Это значит, что на Дальнем Востоке в насыпях из пылеватых суглинков вечная мерзлота может подняться выше дневной поверхности только при высоте насыпи более 2,5 *м*. Для грунтов щебенистых и песчаных высота насыпи должна быть еще более.

Все сказанное не играет роли для насыпей, возводимых на грунтах иного рода (щебенистых, песчаных и т. п.) и грунтах непереувлажненных, в которых содержание влаги меньше полной влагоемкости грунта. В этих случаях возведение насыпей ничем не отличается от возведения таковых в обыкновенных условиях, и поэтому нет необходимости останавливаться на этом вопросе.

Ниже рассмотрим случаи возведения насыпей на марях и в районах распространения включений чистого льда. Марями на Дальнем Востоке и в Забайкалье называются кочковатые торфянистые и моховые болота, весьма часто расположенные на пологих склонах. Эти болота на сравнительно небольшой глубине подстилаются вечно мерзлыми грунтами, а иногда и льдом. Покрывающая их вода часто имеет медленное движение по направлению склона.

Попытки осушения таких болот и возведения на них насыпей требуют осмотрительности. Известны случаи, когда для спуска воды и осушения местности на территории, покрытой марью, устраивались канавы глубиной 0,5 — 0,7 *м*. Эти канавы, исполняя свое назначение, просуществовали благополучно лишь до первых ливней, во время которых они превратились в огромные овраги глубиной более 2 *м*. Еще большее развитие эти овраги имели в ширину, причем растительный слой, скрепленный мохом и корнями нависал с обеих сторон над этим оврагом.

Малые уклоны канав и донные запруды, при которых исключается быстрое движение воды по дну, а также укрепление боков канав дерном или торфом могут предупредить такие размывы, которые при наличии погребенных льдов могут принять значительные размеры, ликвидация которых будет стоить больших средств.

Этот факт разрушительного действия поверхностных вод надо иметь в виду при закладке резервов. Кроме того, снятие мохового и расти-

тельного покрова понижает горизонт вечной мерзлоты и создает в местах снятия значительное протаивание, при котором переувлажненные грунты, по большей части подстилающие на марях растительный слой, превращаются в полужидкую массу, мало пригодную для возведения на ней насыпи. В связи с этим предварительное удаление растительного покрова, практикуемое иногда при возведении насыпей в этих условиях, как показал опыт, приводит весьма часто к неудовлетворительным результатам.

Понижение верхней границы вечной мерзлоты при осушении болота и снятии мохового покрова при пылеватых суглинках, которые наиболее часто встречаются в таких условиях, достигает величины протаивания, наблюдающегося в обыкновенных условиях, т. е. при отсутствии заболоченности. Так, для условий Сковородина, где на марях вечная мерзлота залегает не глубже 1 — 1,5 *м*, в случае осушения и снятия мохового покрова можно ожидать понижения горизонта вечной мерзлоты до 2,5 — 2,7 *м*.

Фиг. 200. Насыпь на «мари»

Не следует также упускать из виду того обстоятельства, что устройство насыпи может повлиять и на гидрологический режим пересекаемой ею местности. Оно может повлиять как на направление тока поверхностных вод, иногда медленно текущих по мари, расположенной по слабо покатой местности, так и на направление течения грунтовых вод, которые наблюдаются в деятельном слое, иногда у самой границы вечной мерзлоты.

Если насыпь расположена параллельно движению, т. е. по направлению движения грунтовых вод (что возможно только в редких случаях), то, конечно, такая насыпь особых изменений в режим грунтовых или поверхностных вод не внесет.

Иначе обстоит дело, если направление насыпи будет перпендикулярно к направлению движения грунтовых вод или будет проходить под некоторым углом (фиг. 200). При поверхностных водах такое расположение насыпи может создать значительную заболоченность с одной стороны насыпи и осушить район с другой стороны насыпи — вниз по направлению потока. Осушение в свою очередь может понизить верхнюю границу вечной мерзлоты и ввести в деятельный слой пласты, ранее бывшие вечно мерзлыми. Эти же пласты иногда, например в условиях Сковородина, являются сильно переувлажненными, и переход их в талое состояние создает в деятельном слое мало устойчивую область.

Скопление воды за насыпью в районе *c* (фиг. 200) будет иметь след-

ствием движение воды вдоль насыпи. Эта движущаяся вода в свою очередь может влиять на понижение горизонта вечной мерзлоты.

На фиг. 200 схематически показано изменение мерзлотного режима при возведении насыпи в описанных выше условиях. Линия *ab* представляет залегание верхнего горизонта вечной мерзлоты в естественных условиях. Пунктиром показан измененный горизонт вечной мерзлоты. Под насыпью вечная мерзлота поднялась, а по бокам опустилась (с одной стороны — под влиянием движущейся воды). Штриховкой показаны области, где грунт, бывший ранее вечно мерзлым, перешел в талое состояние. Если этот вечно мерзлый грунт, как это часто бывает, был переувлажненным (содержание влаги свыше 22% по отношению к весу естественного образца), то создаются условия, весьма благоприятные для оползней. Чтобы избежать оползней, воду следует отвести канавкой *d* и устроить с обеих сторон насыпи небольшие бермы по возможности из мало теплопроводных материалов. На фиг. 200 эти бермы схематически показаны пунктиром.

Нечто подобное может произойти и с грунтовыми водами. Насыпь, расположенная перпендикулярно их движению, может иногда изменить это движение так, что под насыпью вода проходить не будет, а пойдет параллельно направлению насыпи. Это может произойти тогда, когда грунт под насыпью уплотнится после осадки настолько, что закроет пути, по которым ранее возможно было движение воды.

Такое нарушение гидрологического режима не понижает горизонта вечной мерзлоты, но может иметь следствием появление вдоль насыпи наледей, как это имело место в Сковородине, после того как была проложена одна подъездная ветка.

В значительно худших условиях в районах распространения вечной мерзлоты могут быть выемки. При устройстве выемок частично или полностью выбирается деятельный слой, а нередко приходится врезаться и в вечную мерзлоту. Все это, как выяснено выше, сопровождается понижением верхней границы вечной мерзлоты и переходом некоторых вечно мерзлых областей в грунте в пределы деятельного слоя. Если же грунты этой области, бывшие ранее вечно мерзлыми, переувлажнены, то все необходимые условия для сползания откосов выемки и разжижения полотна имеются при этом налицо.

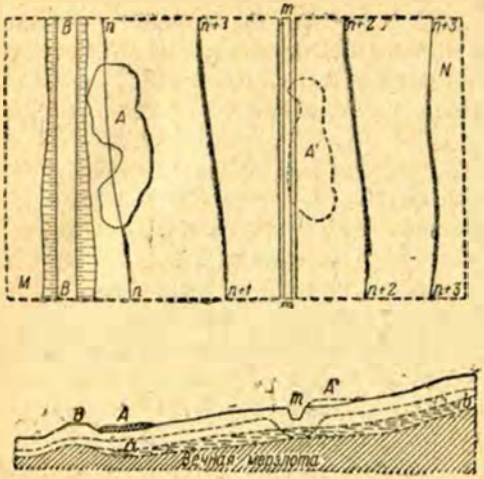
Выходом из этого положения может быть лишь полная замена грунта почти на всю глубину протаивания, что, конечно, является весьма дорогим средством.

В случае, если выемка пересекает водоносные пласты деятельного слоя, появление наледей у выемки или возле нее становится неизбежным. Борьба же с наледями требует затрат и пока не всегда дает надежные результаты.

Сумгин и Цытович рекомендуют так называемые мерзлотные пояса, впервые предложенные В. Г. Петровым и применяемые в Амуро-Якутской магистрали (60, стр. 319, и 63, вся книга).

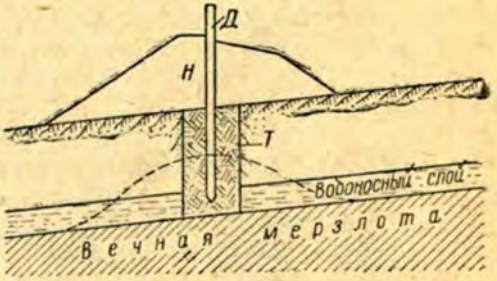
Идея устройства этих поясов заключается в следующем. Пусть *MN* (фиг. 201)— район, в котором образуется наледь *A*; *nn*, $n+1$, $n+2$— горизонтали; *ab* — водоносный слой. Если перед началом замо-

розков (что является необходимым условием успеха) удалить с полоски *mm* растительный слой и сделать небольшую канаву глубиной 0,7 — 1 *м*, то при наступлении морозов наиболее интенсивное промерзание будет, конечно, в месте канавы *mm*, как показано на разрезе пунктиром. Это промерзание, соединившись под канавой *mm* с вечной мерзлотой, прекратит приток грунтовых вод в район ниже этой канавы, где находится насыпь *BB*, и наледь образуется либо в канаве либо выше ее — в районе *A'*, показанном пунктиром.



Фиг. 201. Мерзлотный пояс по В. Г. Петрову

Опыт показывает, что устройство такой канавы, или, как ее называют, мерзлотного пояса, в первый год приносит существенную пользу, и наледь действительно образуется в том месте, где этот пояс устроен. Однако в последующие годы дело иногда меняется, и мерзлотные пояса, устроенные указанным выше способом, весьма часто перестают действовать. Это происходит потому, что под канавой мерзлотного пояса, как вообще под всяким углублением, вечная мерзлота, как мы уже неоднократно выясняли, опустится, и во время наступления следующего зимнего промерзания перемычки под канавой слияния зимнего промерзания с вечной мерзлотой не получится. Ток грунтовых вод при этом может обогнуть нижнюю границу зимнего промерзания и наледь может вновь появиться на старом месте, что, как показывает опыт, и случается.



Фиг. 202. Мерзлотный пояс с ядром из глины

Сумгин и Цытович весьма резонно рекомендуют определенный уход за таким мерзлотным поясом, заключающийся в том, чтобы с ранней весны эту канаву закрывать нетеплопроводным материалом, а осенью этот материал снимать. Вероятно, выполнение этого указания должно помочь делу.

Единственным, но весьма существенным недостатком описанного способа является его дороговизна. Повидимому, целесообразнее было

бы пойти по другому пути, сделав, например, так, как показано на фиг. 202.

Вместо канавы *mm* вырывается траншея *T* шириной 1 — 1,5 *м* так, чтобы она перерезала водоносный слой и входила на 0,2 — 0,25 *м* в вечную мерзлоту. Эта траншея заполняется глиной или даже увлажненными до полной влагоемкости местными тяжелыми пылеватыми суглинками, тщательно утрамбованными. В грунт, заполняющий траншею, забивается шпунтовый ряд из досок *D*, а затем с двух сторон этого ряда устраивается насыпь *H*, как показано на фиг. 202.

Обойтись одним барьером из поднявшейся вечной мерзлоты, образование которого можно вызвать устройством насыпи *H*, без устройства засыпки в траншее *T* вряд ли возможно. Грунтовые воды, поднявшись до высшей отметки этого мерзлого порога, могут свободно через него переливаться и дальше, соединившись со старым руслом, образовать наледи там, где они раньше были.

Очень возможно, что практика показала бы, что достаточно одной траншеи *T* с указанным заполнением.

До обстоятельной проверки этих схем на деле приходится от рекомендации того или иного способа воздержаться.

Из сопоставления устройства насыпей и выемок в условиях вечной мерзлоты при наличии марей и грунтов, состоящих из пылеватых суглинков и пылеватых супесей, очевидно, что, где только возможно, следует устраивать насыпи и избегать выемок.

Еще в большей мере это применимо к тем местам, где встречаются погребенные льды и вообще включения льда, о характере и разнообразии которых мы говорили в предыдущих главах. В таких районах следует по возможности избегать трассировать жел.-дор. линии и уходить в другие места.

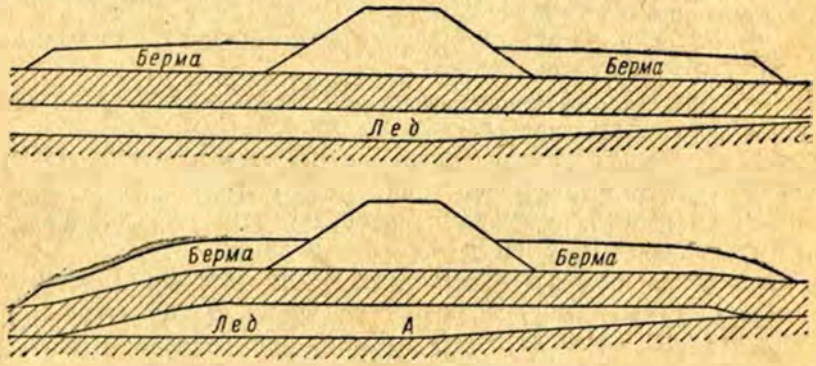
При устройстве выемок, резервов, канав, а также при снятии торфяного и мохового покрова верхняя граница вечной мерзлоты опускается и часть вечно мерзлых грунтов переходит в деятельный слой. Если же в состав вновь образующегося деятельного слоя при этом попадает какое-либо включение льда, то он тает, а вышележащий грунт оседает.

Обнаружить предварительно путем изысканий все включения при современном состоянии методики этого дела пока совершенно невозможно, а потому и при изысканиях и постройке в таких условиях нужна большая осторожность. Включения льда можно встретить на различных глубинах. Так, подр. Тындой были найдены включения льда мощностью 2,25 *м*, верхняя граница которых находилась на глубине 0,9 *м*. В Игарке при бурении скважины в 62 *м* глубиной были встречены два включения чистого льда: одно на глубине 4,2 *м*, другое на глубине 16 *м* (23, стр. 56).

При возведении насыпей в таких условиях следует консервировать вечную мерзлоту и включения льда, что может быть достигнуто сооружением с двух сторон насыпи изоляционных берм, о которых говорилось выше. Размер этих берм должен быть назначен в зависимости

от глубины и мощности подземного льда. При глубине залегания последнего на 3,5 *м* и более под слоем торфа, илистых песков, пылеватых супесков и суглинков наличие льда можно не принимать во внимание. При глубине же от 3,0 до 3,5 *м* следует ограничиться незначительными по высоте и ширине бермами. Высоту их можно назначать равной высоте кочкарника, обычно имеющегося на марях, а ширину — равной 4 — 5 *м* у склонов с южной экспозицией и 3 — 4 *м* у склонов с другими экспозициями. Целью устройства таких берм является скорее не консервирование, а регулирование формы поднятия вечной мерзлоты, что тоже весьма важно для получения рациональной формы поднятия.

Можно отметить, что опасение норильских строителей, которых наличие льда, погребенного на глубине 25 *м*, заставило искать другую строительную площадку, было, по всей вероятности, совершенно неосновательно (см. заметку в «Правде» от 27 августа 1937 г.).



Фиг. 203. Устройство берм у насыпи в случае нахождения льда под ней

При глубине залегания льда меньше 3 *м* бермы у насыпей должны быть устроены из мха или торфа высотой не менее 1 *м*. В природных условиях лед, прикрытый торфом в 1 *м*, сохраняется. Что же касается ширины бермы, то таковая должна быть определена в зависимости от мощности ледяного слоя: чем тоньше слой, тем меньше ширина бермы. Расчет можно вести, например, на то, чтобы в случае протаивания льда за пределами бермы эта последняя, оседая, могла прикрыть находящийся под ней лед и предохранить его от дальнейшего разрушения, как это показано на фиг. 203.

К числу консервирующих вечную мерзлоту мероприятий нужно отнести и противопожарные мероприятия, охраняющие насыпь, бермы и прилегающий участок от палов и лесных пожаров. К этим мерам нужно отнести покрытие всех моховых и торфяных пространств, прилежащих к насыпи или изоляционной берме, песком, а потом растительной землей и дерном, а также устройство оголенных от растительности поясов надлежащей ширины, отступя 10 — 15 *м* от края бермы.

Окончательные размеры изоляционных берм более точно определяются после подробного исследования как по оси трассы, так и в поперечном направлении.

Эти исследования могут внести изменения и уточнения в схему фиг. 203, которую нужно рассматривать лишь как поясняющую высказанные выше соображения.

Из сказанного видим, насколько осложняется вопрос при устройстве земляного полотна в случае неглубокого залегания погребенных льдов, а потому участков с такими льдами надо всемерно избегать.

Возможно, что при возведении высоких насыпей имеет значение время возведения насыпи. Так, если высокая насыпь возводится в августе, то полностью или частично протаявший к этому времени деятельный слой покрывается талыми грунтами насыпи, почему промерзание этой насыпи и поднятие вечной мерзлоты в ней будут происходить иначе, чем при возведении ее зимой, когда промерзший деятельный слой уже соединился с вечной мерзлотой. В результате возведения насыпи зимой мы получаем мерзлый массив насыпи, покоящийся на мерзлом основании. С наступлением тепла произойдет оттаивание ее на некоторую глубину, которая будет обусловлена гранулометрическим составом и влажностью грунтов насыпи. Что же касается вечной мерзлоты, то ее верхняя граница будет определена величиною этого протаивания в октябре.

Интересное описание насыпи высотой 6 *м*, сооруженной зимой, и ее дальнейшего режима можно найти в книге Костенко «Вопросы трассирования и строительства жел.-дор. линий в районах вечной мерзлоты», изд. 1938 г., стр. 17. Этот пример может служить хорошей иллюстрацией к сказанному.

В труде Евдокимова-Рокотовского (34, стр. 83 — 85) не приведено ни одного примера поднятия верхней границы мерзлоты под насыпью, но даны два примера опускания верхней границы вечной мерзлоты под насыпями высотой 13 и 5,5 *м*.

В книге не указано время возведения этих насыпей и нет данных о гидрологическом режиме до и после их возведения. Если предположить, что насыпь высотой 13 *м* была возведена поздним летом или ранней осенью на водоносном слое, то возможно, что существование тока воды в этом слое помешало поднятию вечной мерзлоты.

Вообще же вопрос об изменении вечно мерзлого режима при возведении насыпей до сих пор не может считаться достаточно изученным.

Здесь мы не будем разбирать вопросов о пучении, так как хотя пучение в районах распространения вечной мерзлоты и происходит более интенсивно, все же оно не является специфически связанным с вечной мерзлотой. Кроме того, вопрос о пучении и борьбе с ним имеет значительное освещение, например в трудах Научно-исследовательского института главного управления шоссейных дорог (59-й сборник) и у других авторов.

§ 49. Устройство мостовых устоев и быков в условиях вечной мерзлоты

Выше мы рассмотрели характерные деформации мостов и труб и указали на то, что эти сооружения относительно благополучно работают в районах распространения вечной мерзлоты.

Еще Н. С. Богданов — один из первых авторов, описавших строительство на вечной мерзлоте, — указывает (54, стр. 159), что деформаций устоев мостов почти не бывает, а если они и встречаются, то бывают очень незначительными.

Аналогичное утверждение мы находим и в сборнике № 8 ЦПН, где отмечается (13, стр. 93), что чем тяжелее и массивнее сооружение, тем менее вероятно его пучение при прочих равных условиях, и что пучины, например, каменных быков железных мостов наблюдаются только при низких насыпях — высотой не более 3 *м* — и главным образом при пролетах 6,4 и 10,67 *м* и в очень редких случаях при пролетах 21,34 *м*.

К. Д. Морозов, посвятивший вопросу о строительстве мостов в условиях вечной мерзлоты целую книгу (7, стр. 30), отмечает то же.

Если из тех случаев деформаций мостовых опор, которые описаны поименованными выше авторами, выбросить те случаи, к вечной мерзлоте никакого отношения не имеющие, то число аварий, связанных с наличием вечной мерзлоты, будет еще меньше.

Из сказанного, повидимому, вытекает, что в большинстве случаев строительства мостов с бутовыми и бетонными опорами обычно применяемые типы устоев и быков являются в условиях вечной мерзлоты вполне удовлетворяющими своему назначению.

Переход к специальным типам опор может быть вызван не самым фактом наличия вечной мерзлоты, а особым характером ее залегания или термического режима в связи с неблагоприятными для обычных типов опор гидрологическими, геологическими и топографическими условиями.

Сказанное является существенным лишь для мостов пролетами до 12 *м* и насыпей, высота которых не превышает 4 *м*, а в редких случаях для мостов с пролетами до 25 *м*. Таким образом, задача состоит не в поисках и изобретении каких-либо особых универсальных типов устоев и быков для районов распространения вечной мерзлоты, а в выяснении для мостов указанных нами пролетов тех особых условий, встречающихся, вообще говоря, не часто, при которых применение обычных типов не может быть допущено.

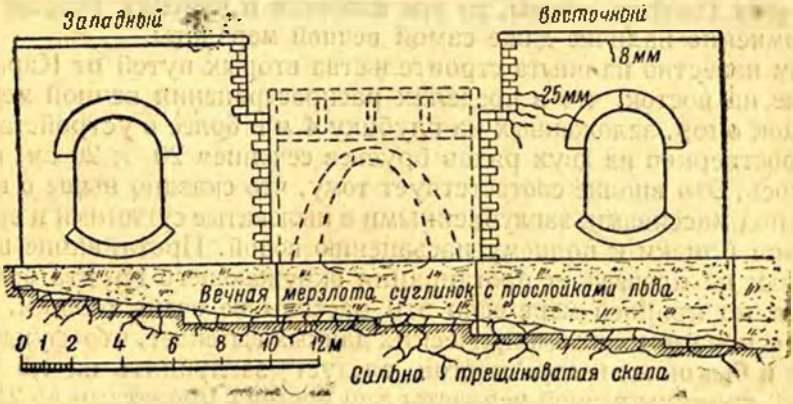
Собранный исследовательский материал в этом направлении беден, и анализ условий, при которых произошла та или иная деформация, или отсутствует или является весьма неполным.

Следует также обратить внимание на то, что при описании деформаций каменных мостовых опор отсутствуют или почти отсутствуют случаи, отмечающие просадки устоев и быков, а это в свою очередь

указывает, что опускания верхней границы вечной мерзлоты или не происходит или, если и происходит, то в таких грунтах, где переход из мерзлого состояния в талое не лишает их несущих свойств, как это бывает в пылеватых влажных грунтах.

Наиболее подробно описан случай осадки мостовых устоев у Евдокимова-Рокотовского (34, стр. 134) и у Морозова (7, стр. 24). На фиг. 204 даны эти устои.

Мост построен в 1912 г. Отверстие моста равно 8,55 *м* (4 *сажс*). Высота устоев (по масштабу) ~ 9,5 *м*. «Фундамент устоя заложен на сильно трещиноватой скале с прослойками льда, обработанной уступами» (цитируем по Морозову). Глубина заложения передних стенок устоев (по масштабу): восточного 3 *м*, западного 2,2 *м*. Евдокимов-Рокотовский условия заложения и появления трещин



Фиг. 204. Трещины в устое жел.-дор. моста

описывает так: «После небольшого слоя растительной земли и торфяного грунта залегает суглинок с прослойками песка. Еще ниже сильно трещиноватая полуразрушенная, а местами даже совершенно разрушенная, превратившаяся в глину скала (гранит). Во многих местах в скале пробиваются ключики воды, а в одном месте, у восточного устоя, там, где образовались трещины, у обреза фундамента выбился целый ручеек. При заложении руководствовались степенью трещиноватости скалы, и поэтому очертание подошвы фундамента дано не горизонтальное, а уступами».

«В 1926 г., т. е. 14 лет спустя после постройки, в восточном устое появились трещины. В июне 1926 г. одна из таких трещин, бывшая до того времени едва заметной, волосной, за 19 дней увеличилась до 8 *мм*. В августе западный устой д а л о с а д к у на 10 *мм*, на восточном устое в это же самое время трещина за 12 дней увеличилась до 25 *мм*».

Морозов указывает, что несколько осел и восточный устой. «Очевидно,— добавляет он, — что разрушение произошло вследствие воздействия вечной мерзлоты, главным образом за счет ее оттаивания».

В то же время Евдокимов-Рокотовский отмечает, что причина наблюдаемых деформаций, выразившихся, как сказано, в трещинах восточного устоя и в осадке западного устоя, совершенно неясна.

Этот единственный случай деформации оседающей мостовой опоры, описанный двумя авторами, вряд ли можно отнести за счет влияния вечной мерзлоты. Указанные деформации скорее можно приписать влиянию ключиков и ручейков, происхождение и режим которых остался, повидимому, невыясненным, чем протаиванию под передними стенками устоев вечной мерзлоты, так как протаивание должно было бы произойти в ближайший же год после сооружения опор.

Если допустить, что геологический разрез, приведенный на фиг. 204, относится ко времени изысканий, когда устоев не было, то и тогда на долю деятельного слоя даже при наличии мари надо дать слой толщиной от 0,6 до 1,5 *м*. Что же касается ключиков и ручейков в скале, о которых говорят авторы, то эти ключики и ручейки вообще ставят под сомнение наличие даже самой вечной мерзлоты.

Нам известно из опыта строительства вторых путей от Карымской и далее на восток, что в пределах распространения вечной мерзлоты просадок опор, заложенных на глубину 4 *м* и более с устройством под ним ростверков из двух рядов брусьев сечением 20 × 20 *см*, не наблюдалось. Это вполне соответствует тому, что сказано выше о протаивании под массивами, заглубленными в пылеватые суглинки и супески, если они близки к полному насыщению водой. Протаивание в таких массивах не превышает протаивания окружающего грунта более чем на 1 *м*, по крайней мере если эти массивы не очень велики.

На основании этих эмпирических данных вытекает, что фундаменты устоев и быков жел.-дор. мостов следует заглублять на 1,5 *м* ниже верхней границы вечной мерзлоты для мостов с пролетами до 25 *м*, что вполне обеспечивает от протаивания нижележащие вечно мерзлые слои.

Опытом оправдано устройство под фундаментами устоев и быков сплошной деревянной подушки из двух рядов просмоленных брусьев сечением 20 × 20 *см*, уложенных накрест. Эта подушка должна выступать за пределы очертаний фундамента не менее чем на 0,25 *м* со всех сторон. Подушки во время производства работ предохраняют вечную мерзлоту от влияния положительных температур воздуха (безразлично, ведутся ли работы летом без тепляка или зимой в тепляке) и от теплоты при экзотермии, которая возникает в кладке в процессе твердения бетона. С другой стороны, эти подушки предохраняют и кладку от воздействия отрицательных температур вечно мерзлых грунтов.

При соблюдении указанных условий, оправданных опытом, можно не опасаться протаивания нижележащих слоев, но, конечно, только в том случае, если в отношении температурного режима вечной мерзлоты и гидрологических условий нет каких-либо особенностей, которые давали бы основание для таких опасений и которые должны быть выявлены изысканиями. Например, если грунт на глубине заложения фундамента и ниже представляет переувлажненный суглинок, бога-

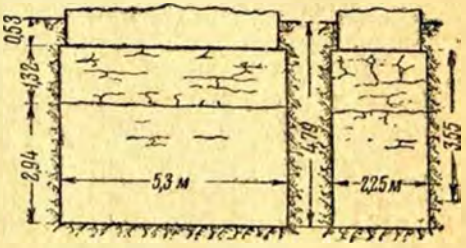
тый прослойками чистого льда с температурой около —0,1°, то, если есть возможность, следует углубиться до слоев с более низкой температурой (не выше —0,2°) и уменьшить напряжение на грунт до 1,0 *кг/см*² или устроить свайное основание.

Говоря о температурах —0,1 и — 0,2°, мы полагаем, что это самые высокие температуры из наблюдавшихся на интересующих нас глубинах в течение года.

Если в деятельном слое над вечной мерзлотой имеются грунтовые воды, которые тоже должны быть выявлены изысканиями, то изменение их режима может повести к оттаиванию.

Следует отметить, что рекомендуемые нами данные о глубине заложения опор не распространяются на скалу, слежавшийся плотный гравий и т. п., где протаивания можно не опасаться, как это выяснено в главе VI.

Что же касается теоретических попыток установления расчетом глубины протаивания под подошвой фундаментов искусственных сооружений, то формулы, предлагавшиеся в свое время Цытовичем, были подробно рассмотрены Евдокимовым-Рокотовским (34, стр. 177 — 180), который пришел к выводу, что «метод расчета, предложенный Цытовичем, к опорам мостов не применим», с чем приходится только согласиться.



Фиг. 205. Горизонтальные трещины в фундаменте бычка

Рассмотрим вопрос о прочности мостовых опор при действии растягивающих сил, возникающих при пучении. В качестве примера приведем разрыв среднего быка четырехпролетного моста (4 × 6,39) б. Западно-Амурской ж. д. Этот случай разобран тремя авторами, а Морозовым он приводится как пример неопровержимого воздействия вечной мерзлоты «не только на первый год существования сооружения», но и после.

Согласно акту от 19 февраля 1912 г. бычок (13, стр. 66) заложен на разборной скале с дресвой. Глубина заложения 4,46 *м* от обреза фундамента и 4,79 *м* от поверхности земли. Водоотлива при копке котлована не было. Ввиду пучения и появления трещин зимой 1926/27 г. фундамент бычка был обнажен на глубину 3,55 *м* от обреза его. В нижней трети фундамента трещин не обнаружено. В верхней трети кроме вертикальных трещин имеется ряд горизонтальных; наиболее широкая из них расположена на расстоянии 1,32 *м* от обреза фундамента.

Фиг. 205 дает понятие о размерах этого бычка и о характере трещин по Евдокимову-Рокотовскому (34, стр. 132). В июне 1927 г. выпученный бычок дал осадку, и трещины почти совершенно сомкнулись.

У Евдокимова-Рокотовского и у Морозова проводятся расчеты прочности опор. Ниже мы даем подсчет по Евдокимову-Рокотовскому:

«Если допустить, что в момент разрыва фундамента грунт примерз к фундаменту на всю высоту от поверхности земли до места разрыва, то площадь примерзания равняется $1\,523 \cdot (132 - 20) = 170\,576$ *см*² как минимум и $1\,523 \cdot (132 + 53) = 281\,755$ *см*² как максимум.

Вес верхней части бычка Q_1	90 882 *кг*
» пролетного строения Q_2	8 309 »
Временная нагрузка от поезда Q_3 .	54 340 »
Временное сопротивление разрыву бутовой кладки на цементном растворе 1 : 3, считая по 10 *кг/см*² $121\,054 \times 10$	1 210 540 »
Итого	1 364 071 *кг*

Таким образом, при пучении грунта и при отрывании верхней части фундамента по горизонтальной щели от нижней части фундамента надо было преодолеть силу в 1 364 071 *кг*. Отсюда мы можем определить силу смерзания грунта с кладкой. Эта сила будет равна в пределах от 8,00 *кг/см*² до 4,85 *кг/см*²».

Для ясного представления о том, как происходило пучение, как и когда появлялись трещины, каковы были при этом внешние условия, нехватает ряда данных. В описании ничего не сказано о верхней границе вечной мерзлоты, о характере и влажности грунтов; нет данных о пучении до 1926 — 1927 гг., о размерах пучения, о том, после каких деформаций были обнажены фундаменты этого бычка, обнажалась ли часть боковой поверхности этого бычка или же он был обнажен полностью. Ничего не сказано и о его дальнейшей судьбе: был ли он переложен, продолжалось ли пучение и т. д. Ввиду неполноты данных приходится в дальнейшем делать некоторые допущения.

Если в течение 14 лет (1916 — 1932 гг.) ничего не предпринималось с этим бычком, то нужно полагать, что пучения и трещин либо вовсе не было либо они были весьма незначительными.

На основании всего изложенного в этой книге выдергивающую при пучении силу, действующую на бычок, нужно считать не превышающей 150 *кг* на 1 *пог. см* периметра бычка, что дает усилие, равное

$$P_1 = 150 \cdot 1\,523 = 228\,000 \text{ кг}.$$

Этим усилием может быть приподнята верхняя часть бычка вместе с пролетным строением и временной нагрузкой от проходящего поезда, так как эта нагрузка равна 153 500 *кг*.

Если допустить, что разрыв бычка произошел во время отсутствия поезда на мосту, то разрывающее усилие Q будет равно

$$Q = P_1 - (Q_1 + Q_2) = 228\,000 - (90\,882 + 8\,309) = 128\,809 \text{ кг}$$

или

$$\tau = \frac{128\,809}{121\,054} \approx 1{,}06 \text{ кг/см}^2.$$

Конечно, напряжение 1,06 *кг/см²* ничтожно, и кладка среднего качества могла бы противостоять такому напряжению. Но мало вероятно, что разрывающее усилие в 128,8 *т*, приложенное по периметру, равномерно распределяется по всей площади поперечного сечения бычка, а также что это усилие равномерно распределено и по периметру. Если это так, то вполне возможно, что в некоторых местах, прилежащих к внешней поверхности, развивались напряжения, значительно превышающие 1,06 *кг/см²*, следствием чего было появление небольших, может быть волосных, трещин. Нет ничего невероятного в том, что в эти трещины потом попадала вода, которая при замерзании увеличивала их, и т. д. Весьма возможно также, что небольшие трещины существовали в кладке независимо от выдергивающих усилий.

Такой постепенный процесс разрушения кладки рассматриваемого бычка, повидимому, является более вероятным, чем допущение какого-то особо интенсивного пучения на двенадцатый или на четырнадцатый год его существования.

При постепенно увеличивающейся из года в год трещине должен был наступить рано или поздно момент, когда выдергивающая сила пучения могла оторвать верхнюю часть бычка от нижней и в процессе этого пучения приподнять эту часть над нижней. После того как разрыв бычка произошел, пучение в большей или меньшей степени должно было бы повторяться из года в год.

Если бы такие сведения были, они подтвердили бы правильность высказанных выше предположений как о процессе разрыва, так и о величине выдергивающих сил. Наличие горизонтально направленных трещин и при этом самых крупных указывает на то, что, по всей вероятности, эти трещины обусловлены моментами перерыва работ при возведении кладки, создающими в ней наиболее слабые места.

В рассмотренном примере сопротивление выдергиванию верхней части бычка равнялось 99 000 : 1 523 = 65 *кг* на 1 *пог. см* периметра в отсутствии временной нагрузки и 153 000 : 1 523 = 100 *кг* на 1 *пог. см* периметра в присутствии таковой. И та и другая цифры меньше 150 *кг* на 1 *пог. см* периметра.

Из изложенного мы делаем вывод, что только те бычки и устои будут благополучны, т. е. будут противостоять силам пучения, у которых вес надземной части и соответствующей части веса пролетных строений, деленный на периметр сечения подземной части опоры, выраженный в сантиметрах, будет больше 150 *кг* или иного напряжения выдергивающих сил, которое должно быть определено экспериментально при изысканиях. Только в таком случае не опасны горизонтальные волосные трещины, которые могут появляться и развиваться независимо от вечной мерзлоты и наличия пучения. Если же частное от деления указанных выше сил на периметр опоры меньше 150 *кг*, то можно опасаться разрыва подземной опоры и ее пучения.

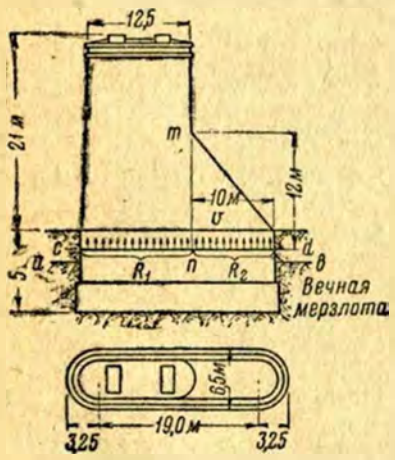
В последнем случае, если пренебречь работой кладки опоры на растяжение, нужно будет отказаться от применения обыкновенных типов опор и прибегнуть к заякориванию и к созданию такой конструкции опоры, которая работала бы на разрыв.

Сила, которой должно противостоять заякоривание, равна выдергивающей силе, т. е. периметру, выраженному в сантиметрах и помноженному на 150 *кг/см*, за вычетом веса всей опоры и веса части пролетного строения.

Сила, которая будет разрывать опору в некотором сечении в пределах деятельного слоя и которая должна быть воспринята ее конструкцией, также равна выдергивающей силе без веса верхней части опоры до рассматриваемого сечения, включая в вес последней и давление, передаваемое пролетным строением.

Вряд ли следует принимать в расчет то, что бутовая кладка может работать на растяжение.

Несколько лучше дело обстоит с бетоном. Однако и в нем при огромных колебаниях температуры воздуха и грунта, которые, например, наблюдаются на Дальнем Востоке и в Забайкалье, возможно появление трещин, главным образом в рабочих швах кладки. Остановимся теперь на возможности появления вертикальных трещин, рассмотрев для примера те, которые могут отделить ледорез от основного массива — быка. Этот пример покажет, от каких причин могут появляться такие трещины. Последние могут появиться от действия выдергивающих сил пучения, почему и ледорез у быка должен быть на них рассчитан.



Фиг. 206

Рассмотрим бык, показанный на фиг. 206. Этот бык взят из книги Морозова (7, стр. 43). Размеры проставлены нами приблизительно по интерполяции, так как схема вычерчена не в масштабе.

Если по периметру *cd* действуют выдергивающие силы в 150 *кг* на 1 *пог. см* периметра, то на участке *nd* создается выдергивающее усилие, равное приблизительно 345 *т*, которое будет стремиться срезать объем *V*, ограниченный линией *nmd*, по плоскости *mn*. Этой срезывающей силе будет сопротивляться вес срезаемой части *V* плюс сопротивление срезанию кладки по плоскости *mn*; в плоскости *nd* предполагаем в запас прочности трещину. Вес кладки в объеме *V*, если считать объемный ее вес равным 1,8 *т/м*³, будет приблизительно равен 650 *т*. Следовательно, срезания в плоскости *mn* опасаться не приходится; даже если бы в плоскости *mn* тоже была трещина, то и тогда объем кладки *V* не был бы поднят выдергивающими силами.

Сказанное является только примером того, как можно учитывать разрушающее действие сил выпучивания и где они могут проявиться.

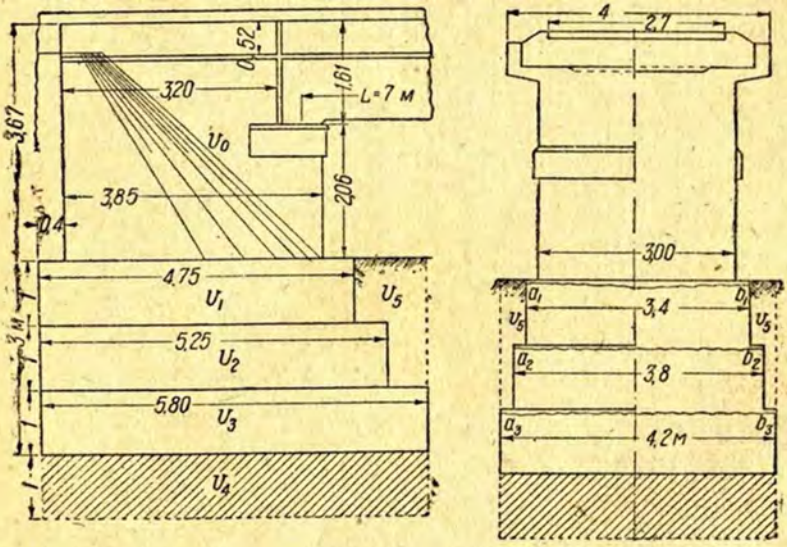
Таким образом, мы выяснили основные условия, при которых можно не опасаться протаивания под каменными мостовыми опорами и их разрыва силами пучения, причем мы имели в виду устои и

быки обычного типа, без введения в их конструкцию каких-либо особенностей, если не считать деревянного ростверка внизу.

Что касается горизонтальных сил пучения, на которые указывают некоторые авторы и которые, по их мнению, могут развиться у задней стены устоя, примыкающей непосредственно к насыпи, то вопрос об этих силах является, как сказано в предыдущих главах, мало разработанным.

Однако все, что мы об этом пока знаем, заставляет думать, что таких сил, в особенности в насыпях, не развивается.

Тем не менее в устоях с обратными стенками (если предположить, что пространство, образованное этими стенками, будет замкнуто сзади водонепроницаемыми грунтами насыпи) по крайней мере теоре-



Фиг. 207

тически может образоваться, так сказать, мешок, где будет скопляться вода. Эта вода будет пропитывать грунт, который, замерзая, будет раздвигать обратные стенки, разрушая устой.

При возникновении таких опасений рекомендуется сзади устоя устраивать дренаж, т. е. если существуют обратные стенки, то пространство между ними и за устоем засыпать дренирующим слоем так, чтобы скопление воды стало невозможным.

Выше уже отмечались те условия, когда уместно отходить от обычных типов мостовых опор. Этот отход может быть вызван:

1) опасением, что грунт под опорой протает или даст осадку вследствие слишком высокой температуры вечной мерзлоты, не обеспечивающей ее сопротивляемости;

2) ее слоистостью;

3) опасением, что опора будет разорвана силами пучения.

В первом случае, как уже сказано, придется либо заглубить опору до слоев с более низкой температурой либо применить устройство свайного основания. Местные условия, техническая возможность выполнения и экономика подскажут надлежащий выбор. Во втором случае надо применить заякоривание опоры в мерзлоте и создание конструкции, работающей на растяжение. Рассмотрим примеры.

На фиг. 207 дан (если не считать заштрихованной части внизу) проект одного из типовых устоев Забайкальской дороги. Пусть этот проект надлежит применить в следующих условиях:

1) грунт — пылеватый суглинок, весьма пучинистый;

2) выдергивающая сила, развивающаяся при пучении, не превышает 150 *кг* на 1 *пог. см* периметра;

3) глубина наибольшего протаивания 2,4 *м*;

4) наибольшая температура вечно мерзлого грунта на глубине 4 *м* равна —0,3°.

Тогда наименьшее заглубление должно быть равно 2,4 + 1,5 = = 3,9 *м*. Таким образом, глубина 3 *м*, намечаемая проектом, мала. Принимаем глубину заложения равной 4 *м*.

Данные, характеризующие устой, следующие:

Вес 37 $м^3$ кладки V_0 части устоя выше обреза фундамента, считая вес 1 $м^3$ бетона в 2 *т*	r_0=74,0 *т*
Вес 16,2 $м^3$ слоя V_1	r_1=32,4 »
» 20,0 $м^3$ слоя V_2	r_2=40,0 »
» 24,4 $м^3$ слоя V_3	r_3=48,8 »
» добавочного слоя V_4	r_4=48,8 »

Периметры, выраженные в сантиметрах, в плоскостях a_1b_1, a_2b_2 и a_3b_3 соответственно равны:

$$P_1 = 1\,630 \text{ см};$$
$$P_2 = 1\,810 \text{ см};$$
$$P_3 = 2\,000 \text{ см}.$$

Выдергивающие усилия q_1, q_2, q_3, получающиеся от умножения периметров на удельное напряжение выдергивания, равное 150 *кг/см*, соответственно будут равны:

$$q_1 = 245 \text{ т};$$
$$q_2 = 272 \text{ т};$$
$$q_3 = 300 \text{ т}.$$

Последняя цифра весьма проблематична, так как на глубине свыше 2,0 *м*, если и развиваются выдергивающие силы пучения, то вряд ли они достигают столь больших значений (см. главу III).

Однако, поскольку обоснованных данных к изменению этой величины нет, значение q_3 оставляем равным 300 *т*.

Площади ω_1, ω_2 и ω_3 сечений фундамента по a_1b_1, a_2b_2 и a_3b_3 будут соответственно равны:

$$\omega_1 = 475 \cdot 340 = 161\,000 \text{ см}^2;$$
$$\omega_2 = 525 \cdot 380 = 200\,000 \text{ см}^2;$$
$$\omega_3 = 580 \cdot 420 = 244\,000 \text{ см}^2.$$

Если предположить, что при растяжении можно допустить напряжение на бетон 1,5 $кг/см^2$, то сопротивление на разрыв по сечениям ω_1 и ω_2 будет равно:

$$P_1 = \omega_1 \cdot 1{,}5 = 241\,000 \text{ кг} = 241 \text{ т};$$
$$P_2 = \omega_2 \cdot 1{,}5 = 300\,000 \text{ кг} = 300 \text{ т}.$$

Прежде всего надлежит разрешить вопрос, может ли весь устой, как одно целое, нагруженный пролетным строением, противостоять выдергивающим силам.

Вес всего устоя равен

$$R_0 = \Sigma r = 244 \text{ т}.$$

Пусть вес пролетного строения, передающийся на опору, равен

$$R_1 \approx 28 \text{ т}.$$

Тогда общий вес будет равен

$$R = 272 \text{ т}.$$

Эта сила R больше выдергивающей силы q_1 равна силе q_2 и несколько меньше выдергивающей силы q_3, равной 300 $т$. Однако если принять во внимание, что выдергиванию устоя будут также противостоять вес грунта в объеме V_5, часть веса конуса и часть веса насыпи за устоем, то нетрудно убедиться, что запроектированный устой при заглублении на 4 $м$ силами пучения не будет выдернут.

Остается проверить прочность устоя по сечениям a_1b_1, a_2b_2 и a_3b_3.

Когда зимнее промерзание достигнет верхней части фундамента V_1, то выдергивающие силы могут быть приложены где-то по боковой поверхности этого объема. Эти силы будут стремиться разорвать устой силой $q_1 = 245 \text{ т}$, которой будут противодействовать вес части пролетного строения, передающийся на устой, вес устоя над обрезом фундамента и часть веса объема V_1, которым мы пренебрежем. Наконец, сопротивление разрыву по сечению ω_1.

Сумма этих сил будет равна

$$r_0 + R_1 + P_1 = 74 + 28 + 241 = 343 \text{ т},$$

что больше $q = 245$ $т$.

Итак, если не опасаться, что в теле V_1 (верхней части устоя) могут появиться сплошные трещины, и считать, что бетон будет работать на разрыв, то никакого выдергивания и разрыва устоя не произойдет.

К такому заключению придем, если произведем аналогичную проверку для сечений $a_2\ b_2$ и $a_3\ b_3$.

При указанных выше силах бетон фактически будет работать на растяжение в сечении $a_1\ b_1$ с напряжением, равным

$$n_1 = \frac{q_1 - (r_0 + R_1)}{w_1} = \frac{245 - (74 + 28)}{161} = \frac{143}{161} \approx 0{,}9\ кг/см^2.$$

Иначе говоря, даже кладка среднего достоинства из довольно тощего бетона может выдерживать такое напряжение. Поэтому при устройстве устоя рассмотренного типа с заглублением на 4 *м* можно совершенно не бояться деформаций пучения в первые годы его существования.

Появление деформаций трещин возможно и впоследствии, но не в пределах вечной мерзлоты, а в пределах деятельного слоя, где вода, попавшая в волосные трещины, может периодически замерзать и постепенно разрушать монолитность устоя.

Из изложенного видно, что при устройстве каменных опор мостов нужно принимать все меры против появления трещин в подземной их части, которая должна поэтому возводиться, в особенности в пределах деятельного слоя, не менее тщательно, чем надземная часть.

Таким образом, тщательное выполнение, легкое конструктивное армирование сеткой у поверхности тех частей фундамента устоя, которые лежат в пределах деятельного слоя, затирка и железнение еще сырой поверхности непосредственно после снятия опалубки — вот те требования, которые должны быть соблюдены, если учитывать и вводить в расчет сопротивление бетона на растяжение. Если же считать, что бетон на растяжение не работает, тогда должна быть поставлена арматура, которую нетрудно рассчитать.

Рассмотрим напряжение на грунт. Если учесть, что ростверк должен выступать на 25 *см* с каждой стороны основания, то площадь передачи давления будет равна $630 \cdot 470 = 296\,000\ см^2$. Тогда давление на грунт для данного пролета от постоянной нагрузки будет всего около 1 $кг/см^2$.

Из всего вышеизложенного вытекает, что искать специальных типов опор для районов распространения вечной мерзлоты в общем не приходится, но, конечно, имеющиеся типы должны быть проверены и соответственным образом приспособлены, что в равной мере относится и к обычным немерзлотным условиям.

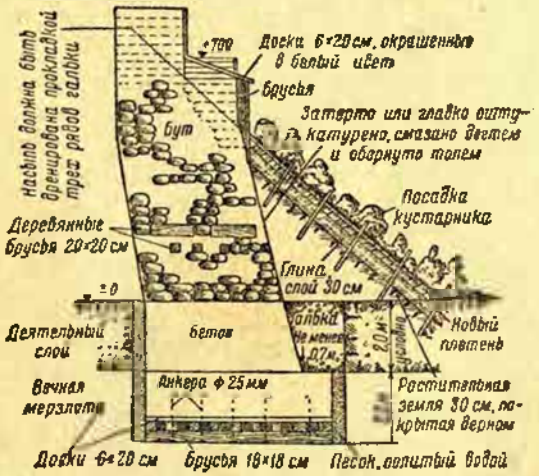
Перейдем теперь к рассмотрению некоторых типов опор, предлагаемых Морозовым. Прежде всего укажем на некоторые общие сомнительные положения в его труде. Так, например, Морозов считает, что «на некоторой глубине от поверхности земли лежит зона постоянной температуры 0°С, соответствующая верхней грани вечной мерзлоты» (7, стр. 13), что, без сомнения, совершенно неверно.

В другом месте (7, стр. 21) он пишет: «Грунтовые воды в вечной мерзлоте — явление нормальное». С этим тоже нельзя согласиться. Далее (7, стр. 54) Морозов утверждает, что уже одно повышение гра-

ницы вечной мерзлоты в насыпи у задней части устоя способно вызвать наклон устоя в сторону водотока.

Рекомендуя совершенно правильно устройство под опорами деревянного ростверка (7, стр. 60, 61), Морозов советует брусья для ростверка брать сырыми, причем он указывает, что такой ростверк является превосходной изоляцией, что, как мы видели выше, не вполне соответствует истине.

Рассмотрим теперь некоторые типы опор, которые Морозов считает рациональными. Начнем с обсыпного устоя. Прежде всего отметим, что обсыпные устои применяются при больших сравнительно пролетах и насыпях, т. е. в тех случаях, где вечная мерзлота, по данным опыта, никакого влияния не оказывает.



Фиг. 208. Устой моста (по К. Д. Морозову)

Второе, что нужно отметить, — это то, что засыпка грунтом передней части устоя, хотя бы даже на небольшую высоту, при рекомендованной выше глубине заложения послужит лишь в запас прочности и не является необходимой.

Отметив это, перейдем к рассмотрению эскиза рационального устройства каменного обсыпного устоя, взятого из книги К. Д. Морозова (7, стр. 64) и изображенного на фиг. 208. В этом эскизе сконцентрированы все рецепты, предлагаемые Морозовым.

Выше мы видели, что обычный устой, изображенный на фиг. 207, с весьма небольшими изменениями является вполне приемлемым в условиях вечной мерзлоты. А если это так, то к чему же вся та, несомненно дорогая, а иногда и вредная сложность, которую предлагает Морозов.

К совершенно излишним мероприятиям нужно отнести в данном случае следующие:

1) обшивку досками, окрашенными в белый цвет, так как мало того, что эта обшивка совершенно не нужна, она к тому же дорога, требует постоянного ухода и вдобавок огнеопасна;

2) ивовый плетень по слою растительной земли и глины и насаждение кустарника, так как они если и не вредны, то совершенно излишни;

3) признавая правильным по указанным выше в этой главе причинам требование затирки и гладкой оштукатурки поверхностей устоя, находящихся в земле, смазку дегтем и обвертывание толем нужно считать пока требованиями, совершенно не обоснованными, лишь осложняющими конструкцию; применять эту смазку и обвертывание как меру против пучения нельзя хотя бы уже потому, что срок полезного действия этих мер неизвестен;

4) неясно, зачем оказались необходимыми песок, политый водой, и слой гальки у передней стенки устоя и притом толщиной не менее 0,7 *м*; и того и другого может не быть на месте постройки, и, повидимому, нет никакого основания выполнять это требование проекта и производить излишние расходы, если неясно, какие выгоды от этого получаются; предвидя при засыпке песком повышенную прочность смерзания, Морозов ничем не обосновывает этой необходимости;

5) неясно, что достигается устройством анкеров, связывающих деревянный ростверк со слоем бетона, находящимся в вечной мерзлоте; к этому надо добавить, что ростверк этот, по совету Морозова, должен быть еще «сколочен ершами» (7, стр. 60).

Все указанные мероприятия, являясь средствами весьма сомнительной полезности, лишь усложняют и удорожают конструкцию.

К мерам не только сомнительным, но, возможно, и вредным, сокращающим срок нормального функционирования сооружения, нужно отнести закладку в тело устоя деревянных брусьев. Уложенные в пределах переменной влажности, где температура дважды в год переходит через нуль, они могут, оттаивая и замерзая, способствовать расстройству кладки. Такое явление пришлось наблюдать автору этих строк при разрушении бетонной трубы на одной из железных дорог.

Таким образом, предлагаемое Морозовым рациональное устройство каменного обсыпного устоя является сложным, излишне дорогим, совершенно не обоснованным и потому нерациональным.

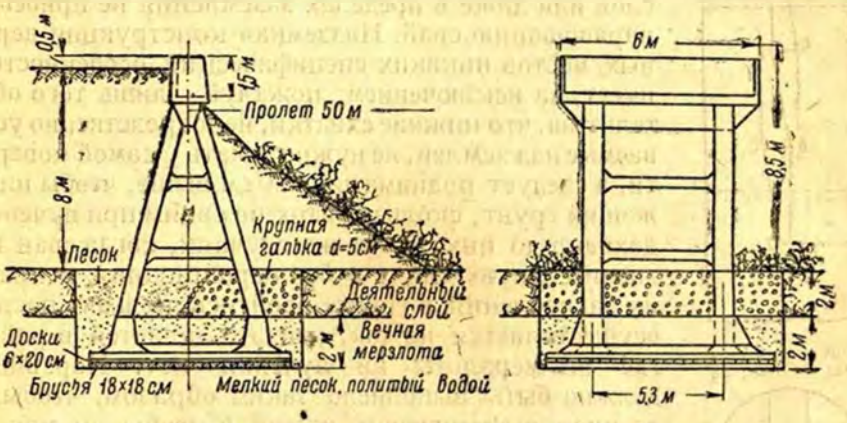
Более совершенным является предлагаемый Морозовым рамный железобетонный устой, изображенный на фиг. 209.

В самом деле, поверхность смерзания с деятельным слоем в этом устое относительно невелика, а заякоривание в вечной мерзлоте легко может быть сделано надлежащей прочности.

Если выкинуть из схемы ненужные засыпки песком и галькой, а также рекомендованную побелку, обмазку дегтем и несколько изменить в пределах деятельного слоя очертание железобетонных ног, то, по нашему мнению, возражений против такой конструкции не должно быть. Что же касается очертания ног, то внутренние их грани в пределах деятельного слоя лучше сделать вертикальными.

Некоторые специалисты по мостостроению указывают как на недостаток на небольшую массу таких устоев, но вряд ли это замечание является существенным, так как необходимые размеры и масса должны диктоваться и определяться надлежащим расчетом.

И из чертежа и по сути дела ясно, что при применении таких устоев откос насыпи, обращенный к отверстию моста, должен быть сделан в крайнем случае полуторным, а возможно, и еще более пологим, тогда как при обыкновенных устоях, играющих роль подпорной стенки, этот откос может быть сделан одиночным. Кроме того, при применении устоев обычного типа можно вовсе отказаться от засыпки передней грани устоя. Из этого следует, что такие железобетонные устои не применимы при малых пролетах; кроме того, применение их будет всегда связано с увеличением длины пролетных строений. Но выше



Фиг. 209. Железобетонный устой (по К. Д. Морозову)

уже отмечалось, что для строительства опор мостов свыше 25 *м* в условиях вечной мерзлоты даже обычные типы опор являются вполне пригодными, и их применение не вызывает никаких возражений.

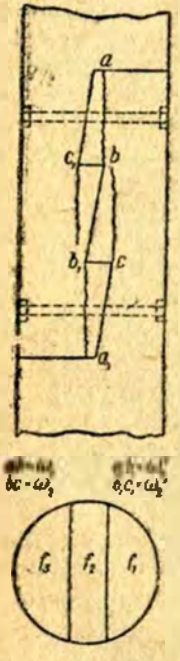
Таким образом, вопрос о том, какой из двух типов устоев применить в каком-нибудь конкретном случае—обычный или железобетонный (по типу, предлагаемому Морозовым), — должна решить экономика.

Что касается предлагаемого Морозовым рационального устройства устоя на сваях (7, стр. 69), то насыщение деревом бетонной части фундамента, находящейся в деятельном слое, является по указанным выше причинам весьма мало приемлемым, а применение гальки, глины, шпунта и т. п., пожалуй, совершенно излишне.

На разборе этих примеров мы и остановимся, так как в дальнейших примерах Морозов применяет при одинаковых условиях ту же рецептуру против пучения и протаивания, которая уже рассмотрена.

В отношении возведения деревянных мостов в районах вечной мерзлоты при нынешнем состоянии наших знаний о вечной мерзлоте можно, повидимому, остановиться в зависимости от характера их оснований на трех рассматриваемых ниже типах, которые и следует применять с учетом местных условий и технических возможностей.

А. Мосты на сваях. Первый тип, который рекомендуется для районов вечной мерзлоты, — это мосты на свайных основаниях. Сваи забиваются в вечную мерзлоту по правилам, рассмотренным в предыдущих главах.



Фиг. 210. Стык в пределах деятельного слоя или вечной мерзлоты

Здесь необходимо упомянуть о возможности наращивания свай. Самыми надежными деревянными мостами будут такие, у которых в пределах деятельного слоя или даже в пределах заземления не прибегают к наращиванию свай. Надземная конструкция деревянных мостов никаких специфических особенностей не имеет, за исключением, пожалуй, лишь того обстоятельства, что нижние схватки, непосредственно устраиваемые над землей, не нужно делать у самой поверхности, а следует поднимать на 20 *см* выше, чтобы нижележащий грунт, скользя вверх по сваям при пучении, не доходил до них. В тех же случаях, когда сваи имеют значительную длину и без наращивания в пределах их заглубления в грунте обойтись нельзя, последнее осуществляется не так, как это делается в районах, где ни мерзлоты ни пучения нет. Наращивание должно быть выполнено таким образом, чтобы стык не имел выступающих частей и чтобы он мог работать на растяжение, расчетная величина которого определяется так:

$$P = p\ 150 - P_1,$$

где P — расчетное растягивающее усилие;

p — периметр сваи в сантиметрах;

P_1 — давление на сваю от постоянной нагрузки в килограммах.

Стыки лучше располагать ближе к верхней границе вечной мерзлоты, где пучение менее интенсивно и где с выступающими частями можно не считаться. Конструкция рекомендуемого стыка показана на фиг. 210.

На растяжение, как видим, работает менее половины поперечного сечения сваи, а именно площадка f_1 нижней части сваи и площадка f_3 верхней части сваи, причем

$$f_1 n = f_3 n = (\omega_1 + \omega_2)\, \sigma_n,$$

где $(\omega_1 + \omega_2)$ — скалываемая площадь нижней части сваи;

$(\omega_1' + \omega_2')$ — то же верхней части сваи;

n — допускаемое напряжение на растяжение;

σ_n — допускаемое напряжение на скалывание в *кг/см²*.

Мост, устроенный на сваях, при надлежащей глубине забивки свай деформироваться не должен.

Б. Мосты с основаниями, заякоренными в вечную мерзлоту. Другой тип деревянных мостов, которые не будут деформироваться, — это мосты на заякоренных в вечную мерзлоту стойках или нижних частях рам. Заякоривание стоек или нижних частей рам и весь расчет на выдергивание таковых из слоя вечной мерзлоты производятся во всем по указаниям, изложенным в главе VI.

В. Мосты на ряжевых опорах. Третий тип мостов, который применялся и применяется на железных дорогах, — это мосты на ряжевых опорах. Эти мосты подвержены пучению, но они имеют то неоспоримое достоинство по сравнению с мостами, устроенными на стойках или даже на недостаточно заглубленных в земле сваях, что деформации их не нарастают. Эти мосты, после того как деформация пучения заканчивается (подъем и опускание), возвращаются в прежнее положение.

Мосты на тяжелых опорах могут быть применимы лишь тогда, когда устройство заякоренных опор или забивка в мерзлоту свай будут по местным условиям трудно осуществимы.

Мы не будем здесь касаться устройства в условиях вечной мерзлоты труб, так как этот вид искусственных сооружений является наиболее благополучным. Устройство труб в мерзлотных условиях ничем не отличается от устройства таковых в обыкновенных условиях, где вечной мерзлоты не существует.

То, что в отношении строительства труб в условиях вечной мерзлоты делалось и делается, сводится в общих чертах к следующему.

Трубы малых отверстий устраиваются из заранее заготовленных элементов длиной обыкновенно около 1 *м*, которые и укладываются на устроенный заранее фундамент, разделенный по длине трубы сквозными поперечными швами так, чтобы на каждый элемент такого фундамента укладывалось, например, по три звена трубы. У входного и выходного отверстия трубы крайние элементы разрезного фундамента имеют обычно большое заглубление порядка 2,0—3,0 *м* и развиваются в ширину для устройства оголовков. Отдельные звенья трубы подстилаются тощим бетоном, а сверху перекрываются рубероидом по гудрону.

Трубы больших отверстий устраиваются на месте и состоят из отдельных звеньев, поставленных на отдельных же фундаментах.

Настоящая глава представляет собой лишь попытку осветить затронутые в ней актуальные вопросы по возведению земляного полотна, устройству искусственных сооружений и по борьбе с наледями.

Изучение этих вопросов поставлено пока весьма слабо. К сожалению, Сковородинская мерзлотная станция лишена была возможности поставить эти исследования.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Сумгин М. И., Вечная мерзлота почвы в пределах СССР, НКЗ, Дальневосточная геофизическая обсерватория, Владивосток, 1927 г.

2. Вечная мерзлота. Сборник материалов № 80, Ленинград, изд. Академии наук, 1930 г.

3. Труды комиссии по изучению вечной мерзлоты, том I, 1932 г.

4. То же, том II, 1933 г.

5. То же, том III, 1934 г.

6. То же, том IV, 1935 г., изд. Академии наук, Ленинград.

7. Морозов К. Д., Проектирование и сооружение мостов в условиях вечной мерзлоты, Трансжелдориздат, 1936 г.

8. Городков Б. Н., Вечная мерзлота в северном крае, изд. Академии наук, 1932 г.

9. Сумгин М. И., Вечная мерзлота, изд. Академии наук.

10. Сумгин М. И., Физико-механические процессы во влажных и мерзлых грунтах, Москва, Транспечать НКПС, 1929 г.

11. Исследование грунтов. Сводка лабораторных работ под руководством проф. Крынина, вып. Гос. техн. изд-ва, 1930 г.

12. Исследование грунтов. Сводка лабораторных работ, 1929/30 г. Государственного научно-экспериментального ин-та, вып. III, Гос. техн. изд-во, 1931 г.

13. Вечная мерзлота и железнодорожное строительство. Сборник № 8, ОГИЗ, Гострансиздат, Москва, 1931 г.

14. Комаровский. Действие ледяного покрова на сооружения и борьба с ним, ч. II, Гос. энерг. изд-во, 1933 г.

15. Комаровский А. И. Структура и физические свойства ледяного покрова пресных вод, Гос. энерг. изд-во, 1932 г., Ленинград.

16. Материалы по исследованию мерзлых грунтов. Сводка лабораторных работ 1930 г. Ленинградского отделения Ин-та сооружений, бюллетень № 25, Ленинград, 1932 г.

17. Борьба с пучинами на жел.-дор. полотне. Сборник № 28 Ин-та пути НКПС, Желдориздат, 1933 г.

18. Проблемы мерзлотности и промораживания в строительстве, Главжелдорстрой НКПС, Новосибирск, 1933 г.

19. Альтберг, Донный лед, Изд. Гос. гидролог. ин-та, Ленинград, 1931 г.

20. Албенский, Полевые опыты по изучению промерзания грунтов, Ленинградский ин-т сооружений, Госстройиздат, ОНТИ, 1933 г.

21. Пархоменко С. Г., Программа для изучения явлений, связанных с мерзлотой почв и грунтов.

22. Труды Московского ин-та инженеров-транспортников, Москва, 1931 г., вып. XVII, ОГИЗ, Гострансиздат.

23. За индустриализацию советского востока, изд. Центрального бюро краеведения, Москва, 1934 г.

24. Бюллетень № 37 Ленинградского ин-та сооружений, июль 1932 г.

25. Технические условия проектирования и устройства основ и фундаментов в районе вечной мерзлоты. Проект. Ленингр. отд. Ин-та гражданских сооружений (на правах рукописи), 1930 г.

26. Колосков П. И., К методике наблюдений над температурой почвы, Благовещенск, типо-литогр. «Амурская правда», 1925 г.

27. Вершинин и Константинов. Физико-химические основы искусственной структуры почвы, 1935 г., Сельхозгиз, Ленинградское отделение.
29. Уиммлер Н., Оттайка мерзлых грунтов паром, изд. Союззолотоплатина, Иркутск, 1930 г.
30. Лебедев, Почвенные и грунтовые воды, Сельхозгиз, Москва — Ленинград, 1930 г.
31. Константы грунтов, вып. III иностранной технической литературы. ОГИЗ, Ленгострансиздат, 1933 г.
32. Келен, Исследование грунта и фундаменты. Гос. техн. изд-во, Москва, 1930 г.
33. Ховард Барнес, Ледотехника, ОНТИ, Гос. энерг. изд-во, 1934 г.
34. Проф. Евдокимов-Рокотовский, Постройка и эксплуатация инженерных сооружений в вечной мерзлоте, Томск, 1931 г., изд. Сибирского строительного ин-та.
35. Проф. Кравков С. П., Почвоведение, ОГИЗ, 1934 г., Гос. изд-во колхозной и совхозной литературы.
36. Глинка К. Д., Почвоведение, Гос. изд-во сельскохозяйств. колхозно-кооперативн. литературы, 1932 г., Москва — Ленинград.
37. Проф. Иванов Н. Н., проф. Охотин В. В., Дорожное почвоведение и механика грунтов, ОГИЗ, Гострансиздат, Ленинградское отделение, 1934 г.
38. Проф. Саваренский Ф. П., Гидрогеология, издание 2-е, ОНТИ, Изд. 1935 г.
39. Хвольсон, Курс физики, т. III, Петербург, изд. 1912 г.
40. Фокин К. Ф., доц. МИСИ, Строительная теплотехника ограждающих частей здания, Госстройиздат, 1933 г.
41. Bouyoucos, The amount of unfree water soils at different moisture.
42. Wintermeyer A. M., Public Roads, vol. 5, № 12, February, 1925.
43. Kokkonen P., Beobachtungen über die Struktur des Bodenfrostes (Helsinki), 1926.
45. Taber S. Journ. of Geol. 1930.
46. Федосов А. Е., Физико-механические процессы в грунтах при их замерзании. Трансжелдориздат, 1935 г.
47. Burton V. R., Engineering News record, Feb. 12, 1931.
48. Motl C. S., Engineering News record, Feb. 12, 1931.
49. Gignoux, Les sols polygonaux. Annales de Geographie, 15/XI 1931.
50. Wilkerson A. Y., American Museum Novitates.
51. Carthy the mining Magazine London, Apr. 10, 1914.
52. Сумгин М. И. Краткий курс дорожной геофизики, ОГИЗ, Гострансиздат, Москва, 1931 г.
53. Андрианов П. И. I. Коэфициенты расширения грунтов при замерзании. II. Температуры замерзания грунтов, изд-во Академии наук, 1936 г.
54. Богданов Н. С., Вечная мерзлота и сооружения на ней, изд. 1912 г.
55. Таблицы физических констант, обраб. Дорфмана, ГИЗ, 1928 г.
56. Кольрауш Ф., Краткое руководство к практическим занятиям по физике, изд. Mathesis, Одесса, 1924 г.
57. Цытович Н. А., Основы механики грунтов, ОНТИ, 1934 г., Главная редакция строительной литературы.
58. Bouyoucos G. Movement of soil moisture from... Journ. of Agricul. Reserch. 1923. Mar. 5.
59. Пучины на авто-гужевых дорогах и борьба с ними, Гострансиздат, 1936 г. Содержание: 1) проф. Иванов, О причинах появления пучин. 2) грунтовед Борисов, Пучины и меры борьбы с ними; 3) Бесков, Изучение пучин и борьба с ними в зарубежных странах; 4) С. Тэбер, Промерзание и оттаивание грунтов как фактор разрешения дорожных одежд; 5) Бертон и Бенкельман, Промерзание пылеватых грунтов в полевых и лабораторных условиях; 6) Г. Арон, Пучины на дорогах и предупреждение их появления; 7) Парадис, Предупреждение выпучивания

дорожных одежд; 8) Зиффферт, К вопросу об изучении пучин на дорогах; 9) Технические правила по борьбе с пучинами на авто-гуженых дорогах. Дорожн. научно-исследовательский ин-т главного правления шоссейных и железных дорог.

60. Цытович и Сумгин М. И., Основания механики мерзлых грунтов, изд. Академии наук, 1937 г.

61. Геология и полезные ископаемые Севера СССР. Труды первой геологоразведочной конференции Главсевморпути, т. III, Вечная мерзлота, изд. Главсевморпути, Ленинград, 1936 г. Содержание: 1) Сумгин М. И., Вечная мерзлота на севере СССР; 2) Ковнер С. С., К математической теории промерзания; 3) Яновский, К вопросу о методах исследования вечной мерзлоты; 4) Цытович Н. А., Принципы конструирования и расчета фундаментов; 5) Толстихин, Гидрогеологические условия водоснабжения.

62. Ковнер С. С., Об одной задаче теплопроводности, журнал «Геофизика», т. III, вып. 1, 1933 г.

63. Петров В. Г., Наледи на Амурско-Якутской магистрали, изд. Академии наук и Научно-исслед. автомобильнодорожного ин-та НКПС, Ленинград, 1930 г.

64. Бобков Н. В., Инженерно-геологические исследования в связи с проектированием различных инженерных сооружений, ОНТИ НКТП, Гос. геолого-развед. изд-во, Ленинград — Москва, 1932 г.

65. Цыбульский В. А., Инженерная геология, Гос. научно-техн. горное изд-во (в двух частях), 1932 г.

66. Государственный междуведомственный геодезический совет. Инструкция по закладке центров и реперов, ОНТИ НКТП СССР, 1935 г.

67. Шоклич А., Основания и фундаменты, перев. Рыдзиевского, под ред. Мелкумова, ОНТИ, 1936 г.

68. Инженеры Абелев Ю. М. и Воин Ш. Ц., Курс оснований и фундаментов, ОНТИ, 1934 г.

69. Проф. Васильев Б. Д., Основания и фундаменты, ОНТИ, изд. 1937 г.

70. Левитский Л. И., Основания и фундаменты, ОНТИ, Харьков — Днепропетровск, 1934 г.

71. Проф. Федоров А. Т., Свайные основания и сооружения, ОГИЗ, Госиздат, Москва — Ленинград 1933 г.

72. Гребер Г., Введение в теорию теплопередачи, изд. 2-е, Гос. энерг. изд-во, 1933 г.

73. Проф. Мачинский Д. В., Теплотехнические основы гражданского строительства, изд. 2-е, ОНТИ, Госстройиздат, 1932 г.

74. Инж. Рощин К. В., Курс оснований и фундаментов, Военно-транспортная академия РККА, Москва, 1935 г.

Примечание. Труды, отмеченные*, имелись в переводах: Воейкова П. Д., Денисовой М. Д., Пархоменко С. Г. и др.

Исправления в книге Быков и Каптерев «Вечная мерзлота и строительство на ней»

№	Страница	Строка		Напечатано	Должно быть
		Сверху	Снизу		
1	202	—	19	направлений	напряжений
2	222	—	16	теоретический	термический
3	304	—	13	$P_2 = 120$ *m*	$P_1 = 12{,}0$ *m*

№ 19682.