ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Е.Л. Бельченко

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СВЯЗНЫХ МНОГОЛЕТНЕ-МЕРЗЛЫХ ПОРОД

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Б 158222 Дб

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель	
Л.А. ПУЧКОВ	ректор МГГУ, чл.-корр. РАН
Зам. председателя	
Л.Х. ГИТИС	директор Издательства МГГУ
Члены редсовета	
И.В. ДЕМЕНТЬЕВ	академик РАЕН
А.П. ДМИТРИЕВ	академик РАЕН
Б.А. КАРТОЗИЯ	академик РАЕН
В.В. КУРЕХИН	академик РАЕН
М.В. КУРЛЕНЯ	академик РАН
В.И. ОСИПОВ	академик РАН
Э.М. СОКОЛОВ	академик МАНВШ
К.Н. ТРУБЕЦКОЙ	академик РАН
В.В. ХРОНИН	профессор
В.А. ЧАНТУРИЯ	академик РАН
Е.И. ШЕМЯКИН	академик РАН

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

8413343

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Е.Л. Бельченко

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СВЯЗНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Рекомендовано Министерством образования Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Горное дело», специальности «Физические процессы горного производства»

СПГГИ (ТУ)
ГЛАВНАЯ
БИБЛИОТЕКА

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА
2000

Главная библиотека
СПГГИ(ТУ)
Р
3001797

УДК 622.02
ББК 33.14
Б 44

Рецензенты:
кафедра «Разработка россыпных месторождений»
Московской государственной геологоразведочной академии
(зав. кафедрой проф., докт. техн. наук *В.П. Дробаденко*);
проф., докт. техн. наук *В.Ж. Аренс*

Бельченко Е.Л.

Б 44 Физические процессы при разработке связных многолетнемерзлых пород: Учеб. пособие. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2000. — 199 с.

ISBN 5-7418-0183-8

Приведены сведения о геологических и геокриологических особенностях многолетнемерзлых связных пород и их физических свойствах, о движении жидкости в водоводах, об истечении жидкости из насадок. Рассмотрены физическая сущность процесса добычи россыпного золота методом промывки, параметры движения пульпы и осаждения частиц золота в промывочных шлюзах. Описаны техника и технология добычи россыпного золота методом промывки. Рассмотрена физическая сущность гидроиглового оттаивания мерзлых пород, даны расчет режимов и параметров этого процесса, описание техники и технологии гидроиглового оттаивания связных мерзлых пород. Изложен процесс промерзания связных пород, приведен расчет параметров промерзания и теплоизоляции пород с целью предотвращение их промерзания, дана технология теплоизоляционных мероприятий.

Для студентов специальности «Физические процессы горного производства». Может быть полезно горным инженерам.

УДК 622.02
ББК 33.14

ISBN 5-7418-0183-8

© Е.Л. Бельченко, 2000
© Издательство МГГУ, 2000

ПРЕДИСЛОВИЕ

"Богатства России Сибирью прирастать будут". Эти слова М.В. Ломоносова стали пророческими, если принять во внимание, что под Сибирью М.В. Ломоносов понимал территории, расположенные восточнее Урала. Эти территории воистину являются кладовой России. Здесь Россия добывает абсолютное большинство нефти, газа, золота и цветных металлов.

Особенностью этих территорий является то обстоятельство, что они почти на 50 % представлены многолетнемерзлыми породами. Суровость климата в районах распространения толщи многолетнемерзлых пород определяется не только низкими температурами воздуха, но и продолжительностью холодного периода года. Некоторые характеристики отдельных районов по климатическим условиям приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатель	Пос. Комсомольский	Пос. Алискерово	Долина р. Большой Тарын	Город Сусуман	Пос. им. Гастелло	Город Мирный	Город Алдан
Среднегодовая температура воздуха, °С	–10,9	–13,3	–15,6	–13,5	–11,3	–6,3	–5,2
Характерная среднегодовая температура горных пород, °С	–5	–6	–7	–6	–5	–2,5	–1,5
Сумма градусосуток:							
положительных	766	801	1370	1202	1166	1598	1582
отрицательных	4746	5668	7013	6140	5305	3966	3638

Характерными показателями принято считать суммы положительных и отрицательных градусосуток, указанных в табл. 1. Они представляют собой суммы среднесуточных температур воздуха за холодный и теплый периоды года. Как видно из таблицы, сумма отрицательных градусосуток значительно превышает сумму положительных. Поэтому для естественного промерзания поверхности пород условия значительно более благоприятны, чем для естественного оттаивания. Оттаянные искусственным способом в летнее время породы зимой могут снова промерзнуть на большую глубину. Величина этого промерзания в значительной степени зависит от среднемесячной отрицательной температуры воздуха (табл. 2).

Для открытых горных работ наиболее благоприятен теплый период года, но его кратковременность требует весьма интенсивной организации производства. В свою очередь интенсивная работа может быть организована только при наличии достаточного количества подготовленных к разработке пород. Мерзлые породы можно готовить к разработке в летний период предыдущего года с использованием различных способов оттайки. Однако оттаянные летом породы зимой неизбежно промерзнут снова на такую глубину, при которой их разработка станет невозможной. Значит, промерзший слой с наступлением весны снова придется оттаивать, либо надо обеспечить предохранение талых пород от промерзания в зимний период.

Промерзание верхней части талых пород изменяется от 1—1,5 м до 3,5—4 м. Эта величина зависит от температуры воздуха, длительности промерзания, высоты и плотности снега, состава и влажности пород. В существенной степени она также зависит от наличия и толщины растительного слоя. Поэтому заранее снимать растительный слой с участков, которые подлежат разработке в будущем

Таблица 2

Район	Средняя отрицательная температура воздуха (°С) по месяцам						
	X	XI	XII	I	II	III	IV
Амурская область:							
пос. Джелинда	2,1	17,1	26,9	28,2	21,8	12,5	0,8
пос. Сковородино	3,7	17,8	27,4	28,7	22,6	13,9	1,8
Иркутская область:							
г. Бодайбо	2,6	13,7	29,5	33,3	25,6	15,6	4,0
пос. Усть-Кут	2,3	14,9	24,5	25,2	22,1	12,3	2,3
Красноярский край:							
г. Канск		10,4	16,2	19,7	18,3	10,0	
г. Ачинск		9,4	15,9	17,4	15,6	9,6	0,2
Читинская область:							
г. Нерчинск	1,1	15,0	25,9	29,1	23,0	13,3	0,2
Якутия:							
г. Алдан	6,4	20,7	26,8	27,6	23,9	16,1	6,1
пос. Алпах-Юнь	13,6	31,1	39.4	42,9	37,3	25,6	13,9
пос. Усть-Нера	14,6	34,4	46,4	48,9	42,8	30,6	12,2
Магаданская область:							
пос. Усть-Омчуг	10,9	26,4	33,1	35,2	31,9	24,2	11,4
пос. Ягодный	11,7	26,6	33,9	35,1	32,1	25,4	13,5
г. Сусуман	15,1	30,4	38,0	39,8	35,6	28,1	14,0
Чукотский национальный округ:							
пос. Красноармейский	10,6	19,9	25,6	27,5	28,0	24,0	16,2
г. Билибино	13,3	25,5	31,7	32,6	33,2	28,0	18,0

году, не всегда целесообразно. Лучше это сделать ранней весной, как только среднесуточные температуры перейдут через ноль. Однако сохранить растительный слой не всегда возможно, поскольку предохранению от промерзания часто подлежат участки, на которых горные работы уже проводились. Таким образом, на предохраняемых участках чаще всего естественная теплоизоляция отсутствует и создаются наиболее благоприятные условия для глубокого промерзания. Очагами глубокого промерзания являются также канавы, траншеи и котлованы, особенно имеющие значительную глубину. Поэтому их проведение лучше осуществлять ближе к весне, когда промерзание практически заканчивается.

Предохранение от промерзания не только обеспечивает необходимый объем подготовки мерзлых пород к разработке, но и позволяет существенно увеличить продолжительность сезона горных работ, а тем самым и полноту использования техники.

Полное предохранение от промерзания, как правило, не имеет смысла. Небольшой слой мерзлых пород на поверхности талого массива может и не создать трудностей для разработки, особенно при использовании мощной техники. Кроме того, сама по себе задача полного предохранения может оказаться трудноосуществимой и потребовать очень больших материальных затрат. Поэтому, производя расчеты, необходимо заранее установить допустимую глубину промерзания. Например, для работы средней драги (с емкостью черпака 210—250 л) в теплое время, т.е. при положительной температуре воздуха, слой мерзлых пород толщиной 0,8—1 м не является серьезным препятствием. В то же время, если драга работает еще при отрицательных температурах воздуха, этот слой не должен превышать 0,4 м. Слой мерзлой породы толщиной 0,3—0,4 м не создает больших

трудностей для работы мощных экскаваторов. Кроме того, такой слой всегда можно предварительно разрыхлить при помощи навесных или прицепных тракторных рыхлителей.

В наибольшей степени проблемы промерзания или оттаивания характерны при разработке связных аллювиальных пород при добыче россыпного золота.

В настоящее время золото в России добывают главным образом на россыпных месторождениях в суровых климатических условиях (Чукотка, Якутия, Магаданская обл.), где до девяти месяцев в году аллювиальные золотоносные породы находятся в мерзлом состоянии. Основная технология добычи золота — это промывка золотоносных аллювиальных пород на полигонах и получение шлихового золота с последующим его обогащением на стационарных обогатительных фабриках.

В указанных выше регионах добычи золота аллювиальные золотоносные породы находятся в мерзлом состоянии и только верхний их слой оттаивает за летний период на глубину не более 2 м. Оттаявшие за летний период породы зимой снова промерзают на всю глубину.

Добыча россыпного золота из аллювиальных пород методом промывки в районах Чукотки, Якутии, северной части Магаданской области является малоэффективной из-за длительности периода года с отрицательными температурами и короткого срока промывочного сезона (максимум четыре месяца). Для этих регионов главной проблемой добычи золота при разработке золотоносных аллювиальных пород методом промывки является увеличение сроков промывочного сезона.

Решение этой проблемы может быть осуществлено за счет более раннего его начала. Для этого необходимо к началу сезона с положительными температурами воз-

духа (середина мая — начало июня) создать запас талых аллювиальных золотоносных пород и интенсивно проводить мероприятия по оттаиванию многолетне- и сезонномерзлых пород. Это можно обеспечить за счет создания в предыдущем промывочном сезоне специальных утепленных складов (отвалов) талых пород, а также за счет проведения мероприятий по интенсификации оттайки мерзлых пород: взрывное и механическое их рыхление, оттаивание за счет солнечной радиации и гидрооттаивание.

Глава 1

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СВЯЗНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

1.1. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

1.2. ПОДГОТОВКА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД К РАЗРАБОТКЕ

1.3. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД

1.1

Инженерно-геокриологическая характеристика многолетнемерзлых горных пород

Наука, изучающая закономерности строения, развития и распространения мерзлых пород и грунтов, а также их физических свойств, называется геокриологией, или мерзлотоведением. Раздел мерзлотоведения — инженерное мерзлотоведение — изучает вопросы, связанные с использованием мерзлых грунтов для строительства и разработки мерзлых горных пород.

Многолетнемерзлые породы широко распространены на земном шаре и охватывают значительную часть территории России (до 47 %). В европейской ее части многолетнемерзлые породы выявлены в пределах Кольского полуострова, Малоземельской и Большеземельской тундр, Полярного Урала и на морских островах. В азиатской части они охватывают морские острова и простираются от побережий морей Ледовитого океана на севере до горных районов Монголии и Китая. Площади, занятые многолетнемерзлыми породами, обычно называют многолетней криолитозоной.

Среднегодовая температура воздуха на всей территории распространения многолетнемерзлых пород характеризуется отрицательными значениями. В прибрежных районах, где сказывается действие североатлантических течений, климат более мягкий. В глубине материка климат резко-континентальный. Зимой наиболее низкие температуры наблюдаются в Верхоянской впадине и Оймяконской котловине, где скапливаются массы холодного воздуха. Летом наиболее низкая температура устанавливается на арктическом побережье и наиболее высокая — у южных границ распространения многолетнемерзлых грун-

тов. На побережьях Берингова и Охотского морей летом удерживается более низкая температура, чем на тех же широтах континентальных районов. Продолжительность периода с отрицательной температурой составляет 180—240 суток. Продолжительность периода, в течение которого среднемесячные температуры имеют положительные значения: на морских островах — 1,5 месяца, на арктическом побережье — 2—3 месяца, в континентальных районах — 4—4,5 месяца, на побережье Охотского моря — 5 месяцев.

Среднегодовая скорость ветра в прибрежных районах составляет 6—8 м/с и более. В континентальных районах скорость ветра значительно ниже и составляет в Якутске 2,4, а в Верхоянске — 1,7 м/с.

Относительная влажность воздуха изменяется от 85—90 % на побережье до 50—60 % в континентальных районах.

Осадки выпадают в основном в летнее время. Среднегодовое количество осадков колеблется на большей части территории в пределах 100—300 мм и лишь на западе и северо-востоке достигает 400—500 мм. Толщина снежного покрова составляет в районах среднего течения Енисея 80—90 см, на Чукотском полуострове — 60—70 см, на побережье — 30—50 см, на островах — 20—25 см. На побережье, где снег откладывается при сильных ветрах, снежный покров имеет высокую плотность.

Различные климатические условия в районах распространения многолетнемерзлых пород обусловливаются разницей в теплоприходе. В северных районах пониженный теплоприход объясняется низким стоянием солнца над горизонтом, продолжительной полярной ночью, в связи с чем большое количество тепла, получаемого за счет радиации, теряется на излучение. Снижение теплоприхода связано также с высокой отражательной способ-

ностью снега и расходом тепла на его таяние. Суммарная солнечная радиация всегда неравномерна.

Радиационный баланс в высоких широтах почти круглый год имеет отрицательные значения, и только влияние полярного бассейна сохраняет эти области от прогрессирующего охлаждения. В районах южнее 79° северной широты отрицательный радиационный баланс удерживается в течение холодного периода, а летом повсеместно он имеет положительные значения.

Многолетнемерзлые породы имеют сплошное, прерывистое или островное расположение. В направлении с севера на юг число и размеры талых зон (таликов) возрастают. Талики располагаются также под водоемами, в местах выхода подземных вод и на морских берегах, где грунты и грунтовые воды засолены и температура их промерзания понижена.

По глубине многолетнемерзлые породы залегают непрерывно или переслаиваются талыми. Нижняя граница мерзлой толщи в направлении с юга на север постепенно понижается, достигая в северной части материка глубины 500—600 м и более. Наблюдаются локальные изменения ее мощности, обусловленные крупными изменениями рельефа и другими причинами.

Ближе к югу и юго-западу многолетняя криолитозона приобретает островной характер. В зависимости от соотношения площадей, занятых мерзлыми и талыми породами, принято подразделять толщи многолетнемерзлых пород следующим образом:

- криолитозона сплошного распространения — площадь талых пород не более 5 %;
- прерывистого распространения — талики занимают до 50 % территории и окружены мерзлыми зонами;
- массивно-островного распространения — крупные массивы многолетнемерзлых пород занимают менее 50 % общей площади территории;

- островного распространения — участки мерзлых толщ в виде островов имеют менее 10 % общей площади.

Поверхностный слой толщи многолетнемерзлых пород даже в самых северных районах подвергается сезонному оттаиванию. Мощность слоя сезонного протаивания зависит от интенсивности прогревания поверхности. На глубину сезонного протаивания оказывают влияние рельеф поверхности, наличие растительности и ее характер, затененность местности, состав и влажность грунтов, мощность снежного покрова, гидрологический режим и др.

По температурному фактору мерзлая толща подразделяется на зону аккумуляции, характеризующуюся сезонными колебаниями температуры, мощностью обычно 8—15 м, и зону нулевых годовых амплитуд с постоянной, не меняющейся в течение года температурой. В этой зоне с глубиной среднегодовая температура повышается в соответствии с величиной геотермического градиента, который колеблется в пределах 0,02—0,035 °С/м. В зоне аккумуляции температура грунта непрерывно изменяется. Период и амплитуда ее зависят от географического расположения местности, метеорологических факторов, толщины снегоотложений, времени года, глубины от поверхности грунта и других условий тепло- и массообмена. На глубине решающее влияние на температуру оказывают длительно действующие факторы, и в первую очередь период действия холодных температур наружного воздуха.

Разница между среднегодовой температурой воздуха данного района и температурой в зоне нулевых годовых амплитуд не превышает 5 °С. Величина температуры в зоне годовых нулевых амплитуд колеблется от 0 до –16 °С. В частности, температура в данной зоне составляет: в Воркуте — от 0,3 до –1,5 °С; Якутске — от –3 до –7; в верховьях Колымы — от –5 до –10 °С. Характер изменения

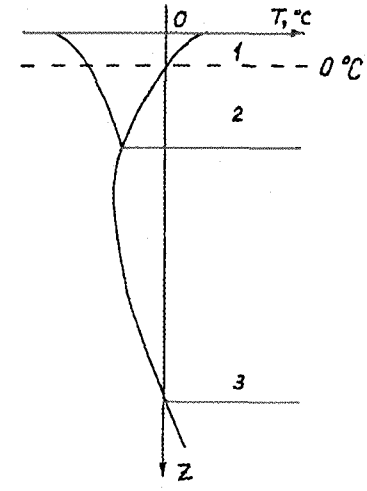


Рис. 1.1.1. *Распределение температуры T по глубине Z мерзлого массива горных пород:*
1 — слой сезонного промерзания; *2* — слой постоянных температур; *3* — нижняя граница вечной мерзлоты

температуры по глубине в толще мерзлых пород показан на рис. 1.1.1.

Геологическое строение криолитозоны разнообразно. На значительной ее части распространены дисперсные толщи, образованные преимущественно четвертичными и третичными отложениями, а в отдельных случаях и более древними породами.

На равнинах Центральной Якутии, а также в ее южной части мощность дисперсной толщи составляет от 40 до 100—120 м, на террасах крупных рек — 10—50 м. Для северных низменностей Западной и Восточной Якутии характерно чередование районов с мощностью рыхлой толщи от 10—70 м до 400 м и более.

Таким образом, дисперсные толщи различной мощности распространены практически на всей территории криолитозоны.

1.2 Подготовка многолетнемерзлых пород к разработке

Основные россыпные месторождения в России сосредоточены в районах многолетней криолитозоны, т.е. в районах Крайнего Севера и приравненных к ним областях

и регионах. Россыпные месторождения, или россыпи, являются вторичными месторождениями, образовавшимися в результате разрушения коренных рудных тел, и представляют собой рыхлые отложения обломочных пород, сцементированных льдом в условиях криолитозоны. Относительно исходной коренной залежи россыпи разделяются на элювиальные, делювиальные и аллювиальные. По масштабам промышленной разработки основное значение имеют аллювиальные россыпи четвертичного периода.

Различные типы россыпей характеризуются следующими общими элементами:

- продуктивный пласт, или так называемые пески, представляющие собой слой рыхлых отложений с достаточным для промышленного освоения содержанием полезного компонента;
- отложения торфа, не содержащие полезных ископаемых и перекрывающие сверху продуктивный пласт;
- поверхность коренных пород, или плотик, являющаяся основанием продуктивного пласта.

По мощности продуктивный пласт изменяется в пределах от нескольких метров до десятков метров, торфа — от долей метра до 50—150 м.

В аллювиальных россыпях золото находится в свободном состоянии и характеризуется сильной степенью окатанности. Основными технологическими параметрами, определяющими эффективность извлечения золота при обогащении песков, являются его гранулометрический состав и форма частиц (табл. 1.2.1). Эти параметры положены в основу классификации золота. В россыпях содержатся частицы золота самых различных размеров — от самородков с массой, измеряемой килограммами, до пылевидных частиц. Основную массу в россыпях составляют частицы крупностью 0,1—4 мм.

Таблица 1.2.1.

Золото	Величина золота по ситовому (седиментационному) анализу
Самородки	Масса более 1 кг
Мелкие самородки	Масса 1—0,5 4 кг
Крупное	4—2 мм
Среднее	2—1 мм
Мелкое	1—0,25 мм
Весьма мелкое	0,25—0,1 мм
Тонкое	0,1—0,05 мм
Пылевидное	< 0,05 мм

Помимо крупности важное технологическое значение при промывке имеет форма частиц золота. По форме частицы золота разделяются на следующие виды:

- комковидные изометрические или близкие к сферической форме;
- плоские пластинчатые;
- удлиненные (палочкообразные, лентовидные).

Учет влияния формы частиц на их поведение в гидродинамических и гравитационных процессах при промывке песков представляет собой серьезную проблему.

Россыпные месторождения разрабатываются как открытым, так и подземным способом с применением различных технологий ведения горных работ. Наибольшее распространение получили гидравлическая и дражная разработки россыпей, в которых энергия воды используется практически во всех технологических процессах: размыве песков в забое, безнапорном и напорном гидротранспорте, а также в обогащении песков. В случае гидравлической разработки обогащение песков осуществляется на переставных промывочных приборах, оснащенных в большинстве случаев только шлюзами. Полученный на промывочных установках черновой концентрат доводится до состояния шлихового золота на обогатительных фабриках.

Особенность разработки россыпных месторождений в условиях Крайнего Севера и приравненных к нему районах связана с необходимостью разупрочнения многолетнемерзлых горных пород с целью приведения их в состояние, при котором возможны их разработка и обогащение существующими технологическими средствами. Для этого при разработке вскрышных пород (торфов) и песка на гидравлических и дражных разрезах применяют комплекс мероприятий по рыхлению многолетнемерзлых пород, предохранению их от сезонного промерзания и оттаиванию мерзлой толщи. Характеристика и области применения различных способов разупрочнения мерзлых пород приведены в табл. 1.2.2.

Естественное оттаивание представляет в настоящее время наиболее простой и дешевый способ разупрочнения мерзлых пород. Для его интенсификации используют различные покрытия, в частности прозрачные пленки, битумную эмульсию, синтетические смолы и лаки. Последние наносят на поверхность мерзлых пород напылением. Эффективность таких покрытий достаточно велика. Например, покрытие мерзлой толщи синтетической прозрачной пленкой позволяет интенсифицировать процесс оттаивания в 1,3—1,5 раза, при этом среднесуточная температура пород под пленкой на глубине 5—20 см на 1,5—9 °С выше, чем на участках без пленочного покрытия.

Покрытия из различных материалов также используют при предохранении поверхностного слоя россыпи от сезонного промерзания. В частности, широко применяют покрытия из водовоздушных и полимерных пен, создаваемых специальными пеногенераторами, производительность которых доходит до 250 м³/ч. В водовоздушной пене твердой фазой является лед, а газообразной — воздух. Естественно, такое пенное покрытие наносится в период устойчивых отрицательных температур. Глубина промерзания при использовании пенных покрытий уменьшается в 2—2,5 раза. Толщина пенного покрытия может достигать 1 м. Технология образования пенных покрытий заклю-

Таблица 1.2.2

Характеристика способа	Разновидность (вариант) способа	Область применения
Естественная оттайка		
Оттаивание происходит в результате непосредственного воздействия тепла солнечной радиации на верхний слой мерзлых пород	1. Послойная оттайка	Разработка россыпи послойным способом (тонкими слоями) при помощи бульдозеров и реже колесных скреперов представляет собой основной и самый дешевый из применяемых в настоящее время способов разработки мерзлых россыпей в теплое время
Технические мероприятия осуществляются с целью сокращения теплопотерь и повышения эффективности оттайки	2. Накопление талого слоя	Разработка россыпи экскаваторами сразу на всю мощность или «мощными» (не менее 1,5—2 м) слоями. Применяется главным образом для продления сезона вскрышных работ. Использование бульдозеров в этом случае менее целесообразно. При накоплении в течение нескольких сезонов должно сочетаться с предохранением от промерзания. Для ускорения естественной оттайки применяют покрытие участков оттайки пленками
Искусственная оттайка		
Оттаивание происходит под воздействием тепла, получаемого от специальных теплоносителей, которые искусственно вводятся в массив мерзлых горных пород	1. Затопление поверхности	Применяется для оттайки горной массы на дражных полигонах в условиях умеренно сурового климата. Должно сочетаться со средствами предохранения от промерзания в зимнее время

Продолжение табл. 1.2.2

Характеристика способа	Разновидность (вариант) способа	Область применения
	2. Игловая гидрооттайка	Оттаивание мерзлой горной массы в больших масштабах для дражных работ и разработки при помощи экскаваторов. Работы по оттайке производятся в теплое время года
	3. Фильтрационно-дренажная оттайка	Область применения та же, но для пород, обладающих (в талом состоянии) значительной фильтрационной способностью. Вода для оттайки может подаваться системой фильтрационных канав, дождеванием, комбинированным способом и т.д.
	4. Игловая парооттайка (или оттайка горячей водой)	Применяется для ликвидации сезонной мерзлоты в дражных разрезах или для оттайки мерзлых пород на строительных площадках
	5. Оттайка при помощи электрического тока	В горном производстве применялась только в экспериментальном порядке. В перспективе может использоваться, так как позволяет ликвидировать сезонность работ по оттайке. Находит применение в отдельных случаях на строительных площадках. Может применяться в сочетании с игловой гидрооттайкой
	6. Комбинированные способы оттайки	Сочетание игловой гидрооттайки с предварительным рыхлением мерзлого массива при помощи БВР, гидроразрывом пласта пород, а также с электрооттайкой

Продолжение табл. 1.2.2

Характеристика способа	Разновидность (вариант) способа	Область применения
	7. Оттаивание открытым огнем	Самый дорогой и малоэффективный способ. На горных работах не применяется. Иногда используется строителями для проходки траншей или небольших котлованов в зимнее время
	Механическое рыхление	
Рыхление производится тракторами или бульдозерами при помощи навесных механических рыхлителей	1. Глубокое (на глубину более 0,5 м)	Послойная разработка разрыхленных мерзлых пород бульдозерами или колесными скреперами
		Интенсификация бульдозерных работ при разработке «трудных» пород (например, при зачистке плотика или выемке плотных глинистых песков)
	2. Мелкое (на глубину 0,2—0,3 м)	Интенсификация естественной послойной оттайки. Повышение эффективности бульдозерной или скреперной разработки плотных глинистых пород
	Взрывное рыхление	
Рыхление осуществляется в результате взрывов зарядов ВВ, заложенных в специальные скважины (шпуры, выработки)	1. Мелкошпуровое	Все подземные работы при разработке многолетнемерзлых россыпей. Канавные и другие горноподготовительные работы в зимнее время. Рыхление трудноразрабатываемых песков

Окончание табл. 1.2.2

Характеристика способа	Разновидность (вариант) способа	Область применения
	2. Взрывными скважинами	Подготовка мерзлых пород к открытой разработке в осенне-зимний период, когда строение россыпи неблагоприятно для естественной оттайки (большое количество глинисто-илистого материала). Применяется при необходимости срочного проведения открытых работ для начала сезона оттайки
	3. Взрывными выработками	Применяется редко, главным образом при необходимости организации взрыва «на выброс»

Примечание. Среди специалистов существует мнение, что затопление водой не может считаться способом оттайки, а является только одним из способов предохранения талых пород от зимнего промерзания. Тем не менее в районах со сравнительно мягкими климатическими условиями именно затопление (многолетнее) применялось для обеспечения драг талой горной массой.

чается в послойном намораживании пены при челночном движении пеноукладчика вдоль линии заходки.

Для предохранения россыпи от сезонного промерзания применяют также затопление участков разработки и используют снежный покров достаточной толщины. Высота слоя воды на затопленных участках достигает 1,5—2,2 м, поэтому для создания зон затопления сооружают плотины и дамбы. Необходимую толщину снежного покрова обеспечивают путем применения снегозадерживающих преград, устанавливаемых перпендикулярно к направлению господствующих ветров.

Талые породы предохраняют от сезонного промерзания также путем рыхления их поверхностного слоя и об-

работки концентрированными солевыми растворами. При этом рыхление, или вспахивание, поверхностного слоя производят на глубину 0,35 м. Использование солевых растворов при температуре от 0 до –10 °С позволяет продлить сезон промывки песков на 10—15 дней. Расход солевого раствора зависит от льдистости пород и изменяется в пределах 10—60 л на 1 м² поливаемой поверхности при температуре –10 °С и содержании льда в 1 м³ породы 50—300 кг.

Помимо этого существует оригинальный способ предохранения пород от промерзания, заключающийся в создании воздушно-ледяного теплоизолирующего покрытия. В осенний период на полигоне образуют с помощью бульдозеров траншеи глубиной до 0,8 м с земляными гребнями между ними или же устанавливают на полигоне в шахматном порядке специальные треноги. Затем полигон затапливают водой. После образования на поверхности воды слоя льда толщиной 0,3—0,4 м воду спускают, в результате чего между слоем льда, удерживаемым гребнями или треногами, и поверхностью россыпи образуется воздушная прослойка высотой 0,8 м. При использовании этого способа промерзание полигона в зимний период практически исключается.

Следует отметить, что все способы предохранения россыпи от сезонного промерзания основаны на создании поверхностного слоя из искусственных или естественных материалов с достаточно низкой теплопроводностью.

Рассмотренные способы являются способами предварительного разупрочнения пород россыпи, дальнейшая их дезинтеграция производится на стадии обогащения. С позиции обогащения песков способы оттаивания более предпочтительны по сравнению с механическим рыхлением с помощью бульдозерной техники или взрывных работ. Механическое рыхление при большой глинистости песков не позволяет достичь достаточного разупрочнения

породы, поэтому в процессах обогащения значительная часть зерен полезного ископаемого теряется, будучи связанной с мелкими мерзлыми и глинистыми комками. При оттаивании массива песков достигается большая степень дезинтеграции породы и освобождения зерен полезного ископаемого.

1.3
Физические свойства мерзлых пород

Мерзлые и многолетнемерзлые горные породы являются сложными природными многофазными дисперсными образованиями, состоящими из различных по своим свойствам компонентов, находящихся в различном фазовом состоянии (твердом, жидком, газообразном). Физические свойства мерзлых пород определяют основные параметры техники и технологии разработки данных пород при добыче полезных ископаемых.

В мерзлотоведении в зависимости от агрегатного состояния воды в горных породах последние относят к талым или мерзлым породам. Сухие породы при отрицательной температуре называют морозными. Участки талых пород в толще мерзлых обычно называют таликами. По времени нахождения при отрицательных температурах мерзлые породы разделяются на кратковременно мерзлые (часы, сутки), сезонномерзлые (месяцы) и многолетнемерзлые (сотни, тысячи лет).

Твердые минеральные частицы мерзлых пород оказывают существенное влияние на их свойства. Породы, содержащие более 50 % минеральных частиц средним диаметром более 2 мм, относятся к крупнообломочным, а менее 50 % — к мелкодисперсным. Россыпные месторождения представляют собой скопления рыхлых пород, состоящие из минеральных частиц разной крупности. Гранулометрический состав рыхлых пород различают по так называемому условному диаметру (табл. 1.3.1).

Таблица 1.3.1

Фракция	Условный диаметр, мм
Валуны и камни (угловатые)	> 200
Галька и щебень	20—200
Гравий, дресва	2—20
Песок	0,05—2
Пылеватые частицы	0,005—0,05
Глинистые частицы	< 0,005

Дисперсность минеральных частиц рыхлых пород обусловливает свойства, связанные со степенью активности взаимодействия частиц с поровой водой. Породы, содержащие значительное количество мелкодисперсных частиц, например глинистых, имеющих большую удельную поверхность и активно взаимодействующих с поровой водой, в мерзлом состоянии представляют собой прочные монолитные образования, трудно поддающиеся механическому разрушению, а также тепловому воздействию.

Для дисперсных пород с высокой емкостью обмена особенно большое значение имеют обменные катионы.

По влиянию на процессы льдовыделения обменные катионы располагаются в ряд: $F^{+3}>Al^{+3}>Ca^{+2}>K^{+}>Na^{+}$.

Лед в мерзлотоведении рассматривается как специфический породообразующий минерал, т.е. как горная порода. Превращение воды в лед сопровождается увеличением объема на 9,07 % и уменьшением плотности на 8,31 %, а также снижением удельной теплоемкости более чем в 2 раза. Лед кристаллизуется по гексагональной системе, при этом наиболее интенсивный рост происходит не по главной оси симметрии, а по побочным осям, что обусловливает его пластинчатое строение и анизотропию. При обычных давлениях существует наиболее распространенная в природе модификация льда (всего их три) — лед I (обычный лед), имеющий гексагональное кристаллическое строение с ярко выраженной анизотропией свойств.

При изменении термодинамических условий (температуры, давления и др.) свойства льда могут значительно изменяться.

Помимо воды в форме льда I в мерзлых и многолетнемерзлых породах содержится вода в жидкой фазе — прочносвязанная и рыхлосвязанная вода. В таких видах воды ее молекулы находятся под действием значительных поверхностных сил минеральных частиц и не имеют возможности перестроиться в гексагональную структуру льда I. Содержание незамерзшей воды в мерзлых породах в основном зависит от типа пород (табл. 1.3.2).

Таблица 1.3.2

Порода	Количество незамерзшей воды (% к весу сухой породы) при температуре (°С)					
	−0,2... −0,5	−0,5... −1,0	−1,0... −1,5	−2,0... −2,5	−4,0... −4,5	−10...−11
Песок	0,2	0,2	—	—	0	0
Супеси	—	5,0	4,5	—	4,0	3,5
Суглинок	12,0	10,0	7,8	—	7,0	6,5
Глина	17,5	15,0	13,0	12,5	—	9,3
Монтмориллонитовая глина	34,3	25,9	—	19,8	—	15,3

Таким образом, замерзание воды в породе представляет собой сложный тепловой процесс, протекающий во времени и в определенном диапазоне температур. Кристаллизация поровой воды происходит постепенно, и практически при любой отрицательной температуре часть воды остается в незамерзшем состоянии и сосуществует со льдом. Диапазон температур, в пределах которого замерзает вода, тем больше, чем дисперснее порода. В указанном диапазоне температур порода проходит через различные по степени твердости состояния: талое, пластичномерзлое и твердомерзлое.

Прочность мерзлых рыхлых горных пород определяется дисперсным составом, количеством льда в них (льдистостью) и их температурой. Средняя температура многолетнемерзлых пород изменяется в пределах от 0 до −10—12 °С. Наибольшей прочности мерзлые породы достигают при температуре ниже −2—2,5 °С.

К основным характеристикам (свойствам) мерзлых горных пород относятся пористость, плотность, влажность и льдистость.

Под плотностью ρ понимается масса единицы объема породы (кг/м³).

$$\rho = \frac{m}{V}, \qquad (1.3.1)$$

где m — масса породы объемом V.

Плотностью $\rho_{ск}$ скелета породы называется масса сухой породы, отнесенная к ее первоначальному объему в талом или мерзлом состоянии.

Пористость П определяется как отношение объема пор $V_п$ к объему породы $V_{пр}$:

$$П = \frac{V_п}{V_{пр}}. \qquad (1.3.2)$$

Пористость галечника, гравия, щебня колеблется в пределах 0,35—0,50, а при наличии заполнителя в виде песка, супеси — в пределах 0,15—0,30.

Существуют две формы выражения влажности мерзлых грунтов: суммарная и общая.

Суммарной весовой влажностью W называется отношение массы всех видов воды к массе скелета породы $m_{ск}$:

$$W = \frac{m_л + m_в}{m_{ск}}, \qquad (1.3.3)$$

где $m_л$ и $m_в$ — масса соответственно льда и незамерзшей воды в породе.

Общая влажность $W_{об}$ породы есть отношение массы льда и незамерзшей воды к массе породы $m_п$:

$$W_{об} = \frac{m_л + m_в}{m_п}. \quad (1.3.4)$$

Величины $W_{об}$ и W связаны между собой зависимостью

$$W_{об} = \frac{W}{1+W}. \quad (1.3.5)$$

В зависимости от способа количественного выражения содержания льда в мерзлой породе различают льдистость массовую (весовую), относительную и объемную.

Массовая льдистость $L_м$ определяется как отношение массы льда к массе скелета породы:

$$L_м = \frac{m_л}{m_{ск}}. \quad (1.3.6)$$

Относительная льдистость $L_о$ есть отношение массы льда к массе всех видов воды, содержащейся в породе:

$$L_о = \frac{m_л}{m_л + m_в}. \quad (1.3.7)$$

Объемная льдистость L_v представляет собой отношение объема $V_л$ льда, содержащегося в породе, к объему породы $V_{пр}$:

$$L_v = \frac{V_л}{V_{пр}}. \quad (1.3.8)$$

Иногда льдистость (L'_v) понимают как отношение массы льда $m_л$ к объему породы $V_{пр}$. Тогда

$$L'_v = \frac{m_л}{V_{пр}} = \frac{V_л \rho_л}{V_{пр}} = L_v \rho_л. \quad (1.3.9)$$

В процессах теплообмена основную роль играют теплофизические свойства мерзлых пород. К ним относятся теплопроводность λ, удельная теплоемкость C и удельная объемная теплоемкость $C_о$, теплота фазовых переходов.

Удельной теплоемкостью вещества называется количество тепла, необходимое для увеличения температуры единицы массы этого вещества на 1 °С без изменения его фазового состояния. Удельная теплоемкость характеризует изменение внутренней энергии в единице массы вещества при изменении его температуры на 1°С и имеет размерность Дж/(кг·К). Для воды при атмосферном давлении и температуре 0—30 °С удельная теплоемкость $C_в$ равна 4,187 кДж/(кг·К), а для льда в диапазоне температур от –50 °С до 0 °С $C_л$ = 2,9 кДж/(кг·К). Для наиболее распространенных минералов и горных пород, представленных в грунтах в виде минерального скелета, удельную теплоемкость $C_{ск}$ с достаточной для практических расчетов точностью можно принимать равной 0,8 кДж/(кг·К).

Мерзлые и талые породы состоят из льда или минерального скелета, поэтому их теплоемкость $C_п$ может быть определена по формуле

$$C_п = \frac{C_в m_в + C_л m_л}{W+1} + C_{ск} \frac{1}{W+1}, \quad (1.3.10)$$

где W — суммарная весовая влажность породы.

При расчетах оттаивания или промерзания пород часто используют так называемую объемную удельную теплоемкость, выражающую количество тепла, повышающее температуру единицы объема (1 м³) породы на 1 °С (размерность — Дж/(м³·К)).

Объемную удельную теплоемкость $C_{об}$ породы определяют по формулам:

- для мерзлой породы

$$C_{об.м} = \rho_{ск}(WC_{л} + C_{ск}) = \frac{C_{л}m_{л} + C_{ск}m_{ск}}{V_{пр}}; \quad (1.3.11)$$

- для талой породы

$$C_{об.т} = \rho_{ск}(WC_{в} + C_{ск}) = \frac{C_{в}m_{в} + C_{ск}m_{ск}}{V_{пр}}. \quad (1.3.12)$$

Массу G воды или льда в единице объема (1 м³) породы естественной структуры определяют из соотношения

$$G = \rho_{ск}W. \quad (1.3.13)$$

Объемная удельная теплоемкость наиболее распространенных крупнообломочных и крупноскелетных пород — галечника, щебня, гравия, песка, супеси, насыщенных водой или льдом, — обычно находится в пределах 2,3—2,7 МДж/(м³·К) в талом состоянии и 1,9—2,1 МДж/(м³·К) — в мерзлом.

Теплопроводность есть форма передачи тепла внутри тела от более нагретой его части к менее нагретой. Коэффициент теплопроводности равен количеству тепла, протекающего в единицу времени (1 с) через единицу площади поверхности (1 м²) при перепаде температуры в 1 °С. Единица измерения коэффициента теплопроводности в системе СИ — Вт/(м·К).

Значения коэффициентов теплопроводности рыхлых мерзлых пород и некоторых теплоизоляционных материалов, необходимых при расчетах эффективности теплоизоляционных покрытий, приведены в табл. 1.3.3 и 1.3.4.

Таблица 1.3.3

Порода	Средняя плотность скелета, кг/м³	Общая влажность (льдистость), кг/м³	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К)	
			в талом состоянии	в мерзлом состоянии
Галечник с песчаным заполнителем	1700—2250	50 200	1,4—1,8 1,6—2,4	1,3—2,1 2,2—2,8
Песок	1400—1750	100 300	0,9—1,7 1,5—2,0	0,9—1,7 2,0—2,3
Суглинок	1300—1650	200 350	0,9—1,2 1,4—1,6	1,0—1,3 1,9—2,3
Супесь оторфованная	900—1100	600	0,5—0,9	1,9—2,2

Теплота фазовых переходов поглощается или выделяется при переходе льда в воду или, наоборот, воды — в лед.

Для оттаивания 1 кг льда при 0 °С необходимо подвести к льду $L_{ф}$ = 333,7 КДж тепловой энергии, которая преобразуется во внутреннюю энергию воды.

То же количество тепла освобождается при переходе 1 кг воды в лед.

Аналогично при испарении 1 кг воды с температурой 100 °С необходимо затратить 2250 КДж тепла, которое преобразуется в кинетическую энергию молекул водяного пара. Такое же количество тепла выделяется при конденсации водяного пара, что используется при пароотгайке пород.

Интенсивность теплообмена зависит также от коэффициента фильтрации (табл. 1.3.5).

Таблица 1.3.4

Вещество	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К)
Воздух	0,024
Войлок	0,07
Вода	0,54—0,67
Речной песок	1,15
Древесные опилки	0,07
Древесные стружки	0,06
Растительный слой	0,23—0,62
Снег рыхлый	0,1—0,2
Снег плотный	0,25—0,35
Пенополистирол	0,04—0,07
Пенное покрытие (твердеющая пена)	0,04—0,06
Шлак	0,14
Лед	2,38
Солома прессованная	0,06—0,08
Сухой грунт	0,3—0,8

Таблица 1.3.5

Порода	Коэффициент фильтрации, м/сут (м/ч)
Галечник с гравийным заполнителем	1000—5000 (40—200)
Галечник с песчаным и гравийным заполнителем	100—800 (4—33)
Галечник мелкий с песчаным заполнителем	20—100 (0,8—4,0)
Галечник средний и мелкий с супесью	1—50 (0,04—2,0)
Песок чистый или с примесью галечников	3—30 (0,12—1,2)
Суглинок	0,05—0,25 (0,002—0,01)
Торф	0,02—0,1 (0,0008—0,004)
Трещиноватые глинистые сланцы и песчаники (верхняя часть коренных пород)	0,2—5,0 (0,008—0,2)

Глава 2

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВОДОВОДАХ

2.1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ

2.2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПОТОКА

2.3. ЭНЕРГИЯ ПОТОКА

2.4. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ

2.5. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ, ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ И ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИЙ УКЛОНЫ

2.6. ПОТЕРИ НАПОРА И РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА

2.7. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ НАСАДОК

2.1

Физические свойства воды

Удельный вес. Удельным весом воды называется отношение ее веса к объему, или, точнее, вес единицы ее объема.

$$\gamma_{ж} = \frac{Q}{V}, \qquad (2.1.1)$$

где Q — вес жидкости, Н; V — объем жидкости, м³.

В табл. 2.1.1 представлены изменения удельного веса воды в зависимости от температуры при атмосферном давлении.

Таблица 2.1.1

Температура, °С	Удельный вес $\gamma_{ж}$, Н/м³	Температура, °С	Удельный вес $\gamma_{ж}$, Н/м³
0	0,99987	50	0,98807
4	1,00000	60	0,98324
10	0,99973	70	0,97781
20	0,99823	80	0,97183
30	0,99567	90	0,96534
40	0,99224	100	0,95838

Плотность. Плотность ρ есть отношение массы жидкости к ее объему:

$$\rho = \frac{m}{V}, \qquad (2.1.2)$$

где m — масса жидкости, кг.

Поскольку $\frac{Q}{V}$ есть удельный вес жидкости $\gamma_{ж}$, то

$$\gamma_{ж} = \rho \cdot g, \qquad (2.1.3)$$

где g — ускорение силы тяжести.

Вязкость. Поток жидкости, находящийся в движении, состоит из бесконечно большого числа тонких слоев, движущихся один над другим с разными скоростями.

При изучении механизма движения реальной жидкости установлено, что там, где движущаяся жидкость соприкасается с неподвижными стенками, скорость пограничного слоя вследствие прилипания равняется нулю.

В направлении к центру потока слои увеличивают свою скорость. Из-за разности скоростей слоев потока жидкости смежные слои скользят друг по другу и вызывают сопротивление скольжению.

Величина сопротивления при скольжении зависит от вязкости и определяется величиной сил сцепления между молекулами. Сила сопротивления τ, возникающая при скольжении между слоями и приходящаяся на единицу площади, прямо пропорциональна плотности и градиенту скорости и зависит от вязкости жидкости, т.е.

$$\tau = \nu\rho\frac{dv}{dy}, \qquad (2.1.4)$$

где τ — сила сопротивления сдвигу, отнесенная к единице площади, Н/м²; ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Произведение $\nu\rho$ обозначают μ и называют коэффициентом динамической вязкости (Па·с).

$$\mu = \nu\rho, \qquad (2.1.5)$$

Тогда

$$\mu = \tau\frac{dy}{dv}. \qquad (2.1.6)$$

В табл. 2.1.2 представлена зависимость коэффициента кинематической вязкости пресной воды от ее температуры.

Величину, обратную коэффициенту динамической вязкости, называют текучестью и обозначают E.

$$E = \frac{1}{\mu}.$$

Таблица 2.1.2

Температура, °С	ν, м²/с	Температура, °С	ν, м²/с
0	0,0178	20	0,0101
5	0,0152	30	0,0081
10	0,0131	40	0,0066
12	0,0124	50	0,0055
15	0,0114		

2.2 Гидравлические элементы потока

Существуют следующие гидравлические и геометрические понятия элементов потока жидкости: площадь живого сечения потока, смоченный периметр, гидравлический и геометрический радиусы.

Если поток жидкости в водоводе пересечем плоскостью, перпендикулярной к направлению его движения, то получим сечение потока F, которое называют живым сечением.

Живое сечение потока в трубопроводе ограничено твердыми стенками. Движение жидкости, ограниченное стенками, называют напорным. Гидравлическое давление в любой точке потока в трубопроводе имеет разность с атмосферным давлением.

При безнапорном движении жидкости в открытых каналах, лотках, шлюзах и т.п., где живое сечение потока ограничено тремя стенками (две стенки по бокам потока и одна — в днище потока), постоянное давление на свободной поверхности равно атмосферному.

Длина периметра живого сечения потока, с которым соприкасаются ограничивающие его стенки, называется смоченным периметром χ.

В случае безнапорного движения жидкости

$$\chi = b + 2a, \qquad (2.2.1)$$

где a — высота потока в лотках, м; b — ширина днища лотка, м.

При напорном движении жидкости в трубопроводе геометрический и смоченный периметры совпадают.

Отношение площади живого сечения потока F к смоченному периметру χ называют гидравлическим радиусом сечения R.

$$R = \frac{F}{\chi}. \qquad (2.2.2)$$

При безнапорном движении жидкости

$$R = \frac{ab}{b + 2a}. \qquad (2.2.3)$$

При движении жидкости по трубам

$$R = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4}, \qquad (2.2.4)$$

где d — диаметр трубопровода, м.

Количество жидкости Q, протекающей через поперечную площадь живого сечения потока в единицу времени с определенной скоростью, называется расходом жидкости.

$$Q = v_{ср} F, \qquad (2.2.5)$$

где F — площадь поперечного сечения потока, м^2; $v_{ср}$ — средняя скорость потока, м/с.

2.3
Энергия потока

Различают энергию положения потока $E_п$, зависящую от геометрического напора z; энергию давления $E_д$, зависящую от пьезометрического напора $\frac{p}{\gamma_ж}$, и кинетическую энергию потока $E_к$, зависящую от его скорости.

Поясним это на следующих примерах (рис. 2.3.1).

Возьмем участок водовода *1*, по которому движется поток жидкости со скоростью v.

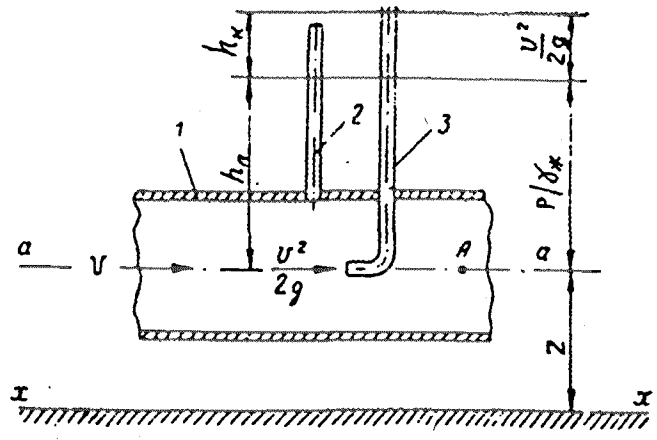


Рис. 2.3.1. *Трубка Прандтля:*
1 — водовод; *2* — пьезометр; *3* — трубка Пито

На участке водовода установим трубку Прандтля. Трубка *2* показывает пьезометрический напор. Трубка *3* — трубка Пито — измеряет величину полного напора.

Определим величины энергии положения $E_п$ и энергии давления $E_д$ жидкой частицы в точке *A* на оси *a—a*, являющейся центром тяжести потока жидкости относительно плоскости сравнения *x—x*, и кинетическую энергию $E_к$ жидкой частицы массой *m*.

Энергия положения $E_п$. Вес жидкости $G_ж$ определяется по формуле

$$G_ж = \gamma_ж Q_ж,$$

где $\gamma_ж$ — удельный вес жидкости, Н/м³; $Q_ж$ — объем жидкости, м³.

Тогда энергия положения потока $E_п$ будет равна

$$E_п = \gamma_ж Q_ж z = G_ж z. \qquad (2.3.1)$$

Удельная энергия положения $e_п$:

$$e_п = \frac{E_п}{G_ж} = \frac{G_ж z}{G_ж}, \qquad (2.3.2)$$

откуда

$$e_п = z. \qquad (2.3.3)$$

Удельная энергия положения равна геометрической высоте расположения центра тяжести сечения потока жидкости относительно плоскости сравнения.

Энергия давления $E_д$. Частица жидкости в точке *A* находится под давлением *p*, и если на этом участке установить пьезометр *2*, то жидкость объемом $\Delta Q_ж$ поднимется на высоту $h_п$.

Работа сил тяжести при происшедшем перемещении объема $\Delta Q_ж$ будет равна

$$A = -\gamma_ж \Delta Q_ж h_п. \qquad (2.3.4)$$

Потенциальная же энергия единицы веса жидкости увеличится на значение $h_п$:

$$h_п = \frac{p}{\gamma_ж}. \qquad (2.3.5)$$

Тогда энергия давления:

$$E_д = G_ж \frac{p}{\gamma_ж}. \qquad (2.3.6)$$

Удельная энергия давления:

$$e_д = \frac{G_ж \frac{p}{\gamma_ж}}{G_ж},$$

откуда

$$e_д = \frac{p}{\gamma_ж} = h_п. \qquad (2.3.7)$$

Удельная энергия давления равна манометрическому давлению.

Вывод: сумма удельной энергии положения и удельной энергии давления $z + \frac{p}{\gamma_ж}$ есть удельная потенциальная энергия, равная расстоянию от плоскости сравнения *x–x* до уровня жидкости в пьезометре.

Кинетическая энергия $E_к$. Для измерения кинетической энергии служит трубка Пито, изогнутый конец которой устанавливается против направления движения потока жидкости. При спокойном положении жидкости ее высота в трубке *3* будет на одинаковом уровне с жидкостью в трубке *2* и равна величине $\frac{p}{\gamma_ж}$.

Жидкость, двигаясь в изогнутом конце трубки, будет оказывать дополнительный напор, равный величине $\frac{v^2}{2g}$, под действием которого жидкость в трубке *3* поднимется на дополнительную высоту $h_к$ и покажет полный напор:

$$\frac{p}{\gamma_ж}+\frac{v^2}{2g}=h_п+h_к.$$

Кинетическая энергия жидкой частицы массой m равна

$$E_к=\frac{mv^2}{2}. \qquad (2.3.8)$$

Удельная кинетическая энергия $e_к$ равна

$$e_к=\frac{E_к}{G_ж}=\frac{mv^2}{2G_ж}.$$

Зная, что $G_ж=mg$, получим

$$e_к=\frac{mv^2}{2mg},$$

или

$$e_к=\frac{v^2}{2g}=h_к. \qquad (2.3.9)$$

Удельная кинетическая энергия есть величина дополнительного напора, возникающего при движении жидкости.

2.4
Основное уравнение гидродинамики

Рассмотрим движение жидкости через диффузор (рис. 2.4.1).

Через входное отверстие *I—I*, имеющее живое сечение F_1, за единицу времени со скоростью v_1 втекает объем жидкости Q_1:

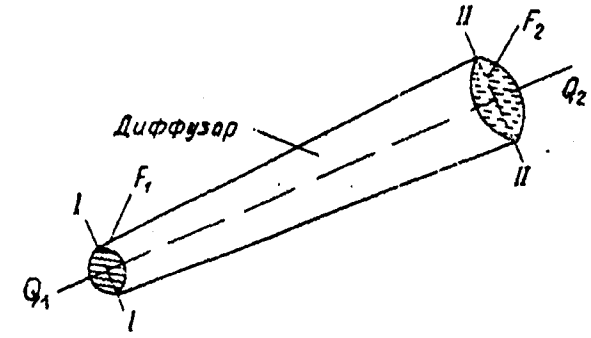


Рис. 2.4.1. Схема движения жидкости в диффузоре

$$Q_1=v_1F_1.$$

Через выходное отверстие *II—II*, имеющее живое сечение F_2, со скоростью v_2 вытекает объем жидкости Q_2:

$$Q_2=v_2F_2.$$

Поскольку жидкость несжимаема и в диффузоре не будут образовываться не заполненные ею пустоты, а также будут отсутствовать ее утечка и приток, объем втекающей жидкости будет равен объему вытекающей жидкости:

$$v_1F_1=v_2F_2. \qquad (2.4.1)$$

Это уравнение называется *уравнением неразрывности* и является *первым основным уравнением гидродинамики*.

Из уравнения (2.4.1) следует:

$$\frac{v_1}{v_2}=\frac{F_2}{F_1}, \qquad (2.4.2)$$

т. е. средние скорости в поперечных сечениях потока обратно пропорциональны площади этих сечений.

2.5
Уравнение Бернулли, гидравлический и пьезометрический уклоны

На рис. 2.5.1 представлены параметры движения потока жидкости. Выделим в этом потоке частицу жидкости, проследим ее движение от точки A до точки $Б$ и подсчитаем, какой удельной энергией обладает эта частица в этих точках.

Обозначим v_1 — скорость, p_1 — давление в точке A с координатой z_1; соответственно v_2, p_2 и z_2 — в точке $Б$.

В точке A для живого сечения F_1 и в точке $Б$ для живого сечения F_2 имеем:

z_1 и z_2 — удельные энергии положения (статический напор);

$\frac{p_1}{\gamma_ж}$ и $\frac{p_2}{\gamma_ж}$ — удельные энергии давления (геодезический напор);

$\frac{v_1^2}{2g}$ и $\frac{v_2^2}{2g}$ — удельные кинетические энергии (скоростной напор).

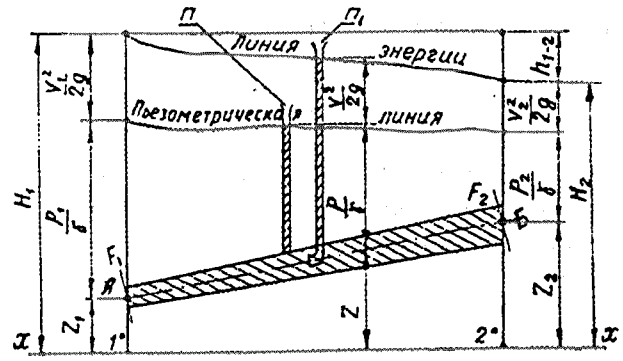


Рис. 2.5.1. Параметры движения потока жидкости в канале

Энергия частицы реальной жидкости убывает из-за затрат на преодоление сопротивлений вследствие вязкости жидкости и внутреннего трения.

Поэтому полный напор H_1 в точке A равен

$$H_1 = z_1 + \frac{p_1}{\gamma_ж} + \frac{v_1^2}{2g}. \qquad (2.5.1)$$

Полный напор всегда больше, чем полный напор H_2 в точке $Б$:

$$H_2 = z_2 + \frac{p_2}{\gamma_ж} + \frac{v_2^2}{2g}. \qquad (2.5.2)$$

Обозначив потерю полного напора на длине перемещения частицы жидкости h_{1-2}, на основании закона сохранения энергии получаем

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma_ж} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma_ж} + \frac{v_2^2}{2g} - h_{1-2}. \qquad (2.5.3)$$

Все члены левой части уравнения и первые три члена правой части представляют собой величины полной удельной энергии частицы жидкости, а величина h_{1-2} является величиной потери энергии, затраченной на преодоление сопротивлений.

Уравнение (2.5.3) есть уравнение Бернулли для частицы идеальной жидкости.

Величины $z + \frac{p}{\gamma_ж}$ и $\frac{v^2}{2g}$ можно измерить, поставив на участке линии водовода пьезометр $П$ и изогнув трубку $П_1$. В первом случае жидкость в трубке поднимется до пьезометрической линии, а в трубке $П_1$ — до линии энергии. Разность даст величину $\frac{v^2}{2g}$.

Если рассматривать уравнение Бернулли относительно величины целого потока жидкости, то в него должен

входить так называемый коэффициент Кориолиса. Указанный коэффициент представляет собой отношение действительной кинетической энергии жидкости, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени, к кинетической энергии, которая имела бы место при том же расходе, если бы частицы потока жидкости обладали одинаковыми скоростями, равными средней скорости.

Опытным путем установлено, что для турбулентного режима движения потока жидкости коэффициент Кориолиса α составляет 1,045—1,10.

Величина указанного коэффициента небольшая, им при практических расчетах пренебрегают или принимают его равным единице. И тогда уравнение Бернулли для целого потока реальной жидкости идентично уравнению для частицы реальной жидкости.

Зная, что величина скоростного напора (удельная кинетическая энергия) представляет собой высоту поднятия жидкости в трубке Пито, вызванную действием скорости потока жидкости и равную

$$h_к = \frac{v^2}{2g} = e_к,$$

получаем скорость движения жидкости

$$v = \sqrt{2gh}. \qquad (2.5.4)$$

Скорость движения жидкости в водоводе зависит от уклона. Различают гидравлический и пьезометрический уклоны.

Гидравлический уклон $i_г$ — величина, определяющая потери полного напора на единицу длины потока L:

$$i_г = \frac{H_1 - H_2}{L} = \frac{\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma_ж} + \frac{v_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma_ж} + \frac{v_2^2}{2g}\right)}{L},$$

или

$$i_г = \frac{h_{1-2}}{L}. \qquad (2.5.5)$$

Пьезометрический уклон $i_п$ — величина, определяющая потери пьезометрического напора (потенциальной энергии) на единицу длины потока:

$$i_п = \frac{\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma_ж}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma_ж}\right)}{L}. \qquad (2.5.6)$$

Гидравлический и пьезометрический уклоны представляют собой безразмерные величины.

2.6
Потери напора и режимы движения потока

Известно, что при равномерном движении потока жидкости существуют лишь линейные потери напора. *Линейными потерями напора* называются потери напора в процессе преодоления сопротивлений от трения при равномерном движении жидкости.

Для определения величины этих потерь рассмотрим равномерное движение жидкости в трубопроводе, ось которого наклонена к горизонту под углом α (рис. 2.6.1). Выделим на длине этого трубопровода участок величиной L и напишем уравнение Бернулли для сечений *I—I* и *II—II*, имеющих одинаковую площадь поперечного сечения потока $F_1 = F_2 = F$:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma_ж} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma_ж} + \frac{v_2^2}{2g} - h_{1-2}, \qquad (2.6.1)$$

где z_1 и z_2 — ординаты центров тяжести сечений *I—I* и *II—II*; p_1 и p_2 — давление в центрах тяжести сечений *I—I* и *II—II*; v_1 и v_2 — средние скорости в этих сечениях; h_{1-2} — потери напора по длине.

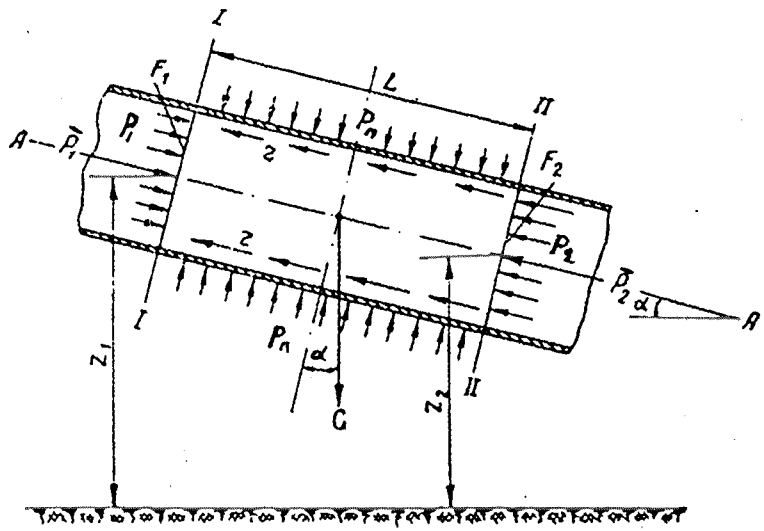


Рис. 2.6.1. Схема движения жидкости в наклонном трубопроводе

Поскольку рассматривается равномерное движение жидкости, при котором $v_1 = v_2$, то из уравнения (2.6.1) потери напора по длине L будут равны

$$h_{1-2} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma_ж}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma_ж}\right). \qquad (2.6.2)$$

Из (2.6.1) следует, что линейные потери напора h_{1-2} на длине L составляют разность удельных потенциальных энергий при входе и выходе потока жидкости соответственно в сечениях *I—I* и *II—II*.

Поскольку при равномерном движении ускорение центра масс выделенного объема равняется нулю, сумма проекций всех внешних сил, приложенных к указанному объему на ось *A—A*, также равна нулю.

В данном случае внешними силами являются:

а) сила тяжести жидкости $G_ж$:

$$G_ж = \gamma_ж FL, \qquad (2.6.3)$$

где $\gamma_ж$ — удельный вес жидкости, Н/м³; F — площадь поперечного сечения потока, $F = F_1 = F_2$, м²; L — длина участка трубопровода, м;

б) полная сила сопротивления движению T, Н:

$$T = \tau\chi L, \qquad (2.6.4)$$

где τ — сила трения, приходящаяся на единицу поверхности, Н/м²; χ — смоченный периметр, м.

в) силы давления $\overline{P}_1$ и $\overline{P}_2$ в центрах тяжести в сечениях *I—I* и *II—II*:

$$\overline{P}_1 = p_1 F \ \text{и} \ \overline{P}_2 = p_2 F, \qquad (2.6.5)$$

где p_1 и p_2 — средние гидродинамические давления на площади F;

г) силы давления $p_п$ на боковую поверхность. Поскольку эти силы действуют вертикально, они не дают проекции на ось *A—A*.

Теперь составим сумму проекций всех перечисленных сил на ось *A—A*:

$$\overline{P}_1 - \overline{P}_2 + A\sin\alpha - T = 0. \qquad (2.6.6)$$

Как следует из рис. 2.6.1,

$$\sin\alpha = \frac{z_1 - z_2}{L}.$$

Подставив в уравнение (2.6.6) величины внешних сил и значение $\sin\alpha$, будем иметь

$$p_1 F - p_2 F + \gamma_ж FL\frac{z_1 - z_2}{L} - \tau\chi L = 0. \qquad (2.6.7)$$

Разделив это уравнение на $\gamma_ж F$ и зная, что $\frac{\chi}{F}=\frac{1}{R}$, ($R$ — гидравлический радиус сечения потока), после его преобразования получим

$$z_1+\frac{p_1}{\gamma_ж}=z_2+\frac{p_2}{\gamma_ж}+\frac{\tau}{\gamma_ж}\frac{L}{R}. \qquad (2.6.8)$$

Зная, чему равно значение h_{1-2} из уравнения (2.6.2), находим следующее общее выражение для линейных потерь напора при равномерном движении жидкости:

$$h_{1-2}=\frac{\tau}{\gamma_ж}\frac{L}{R}. \qquad (2.6.9)$$

Из уравнения (2.6.9) имеем

$$\frac{h_{1-2}}{L}=\frac{\tau}{\gamma_ж R}$$

и, зная, что

$$\frac{h_{1-2}}{L}=i, \qquad (2.6.10)$$

а $$\gamma_ж=\rho g, \qquad (2.6.11)$$

получим

$$i=\frac{\tau}{\rho g R},$$

откуда выводим основное уравнение равномерного движения:

$$\frac{\tau}{\rho}=gRi. \qquad (2.6.12)$$

Величина gRi имеет размерность квадрата скорости. Величина $\sqrt{gRi}$ называется *динамической скоростью* v_g, т.е.

$$v_g=\sqrt{gRi}=\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}. \qquad (2.6.13)$$

Режимы движения жидкости. Различают два режима движения жидкости, резко отличающихся друг от друга по своему характеру: ламинарный и турбулентный.

При *ламинарном* режиме скорость движения жидкости мала, отдельные струйки движутся параллельно друг другу и оси потока, без перемешивания частиц.

При *турбулентном* режиме жидкость двигается с большими скоростями, отдельные частицы перемешиваются, форма траектории их движения весьма сложна.

В большинстве случаев на практике имеют место турбулентные режимы движения. Ламинарные режимы встречаются очень редко и в основном относятся к движению очень вязких жидкостей, воды в грунтах и жидкости в капиллярных трубках.

Критерий режима движения жидкости. Число Рейнольдса. В 1883 г. английский физик Осборн Рейнольдс установил условия, при которых возможны возникновение того или другого режима движения жидкости и переход от одного режима к другому.

Факторами этих режимов являются средняя скорость движения жидкости v, диаметр трубопровода d, плотность жидкости ρ и абсолютная вязкость μ.

Для установления характера режима движения жидкости Рейнольдс ввел безразмерную величину Re, представляющую собой при движении жидкости в круглых трубах отношение произведения средней скорости v, диаметра трубопровода d и плотности жидкости ρ к абсолютной вязкости μ. Эта величина называется *критерием*, или *числом, Рейнольдса*.

$$\mathrm{Re}=\frac{vd\rho}{\mu}. \qquad (2.6.14)$$

Зная, что $\frac{\mu}{\rho} = \nu$ (ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости), получим

$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu}. \qquad (2.6.15)$$

Значение Re для сечений любой формы потока определяется через гидравлический радиус R.

Зная, что $R = d/4$, и подставив его в формулу (2.6.15), получим число Рейнольдса для сечения потока любой формы:

$$\mathrm{Re} = \frac{4vR}{\nu}, \qquad (2.6.16)$$

откуда

$$\frac{\mathrm{Re}}{4} = \frac{vR}{\nu}, \qquad (2.6.17)$$

где R — гидравлический радиус сечения потока.

При напорном движении жидкости в круглых трубах ламинарный и турбулентный режимы разделяет следующая безразмерная величина: при $\frac{vd}{\nu} < 956$ — режим ламинарный, при $\frac{vd}{\nu} > 956$ — режим турбулентный.

2.7
Истечение жидкости из насадок

Назначение насадки — формирование рабочей струи воды, обладающей большой выходной скоростью, динамическая сила которой в гидроэлеваторах и гидромониторах используется для транспортировки и разрушения горных пород.

В указанных аппаратах применяются два типа конических насадок, отличающихся друг от друга формой линий конусообразования. На рис. 2.7.1 изображены насадки (толщина стенки $б$) с прямыми линиями конусообразования и с линиями коноидальной формы.

При формировании рабочей струи в насадке происходят потери напора и скорости.

Указанные величины характеризуются коэффициентами истечения, которые зависят от коэффициента сжатия $\beta_{сж}$, скоростного коэффициента φ и коэффициента расхода $к_р$.

Опытами установлено, что угол конусообразования насадки $\psi_н$ (см. рис. 2.7.1) оказывает большое влияние на величину коэффициентов истечения; наиболее оптимальным является угол $\psi_н = 13°$, при котором коэффициенты $\beta_{сж}$, φ и $к_р$ имеют самые выгодные значения.

Вторым важным фактором является форма конусообразования, наиболее рациональной является коноидальная.

В табл. 2.7.1 даны значения коэффициентов истечения в зависимости от типа насадки при угле $\psi_н$, равном 13°. В безвоздушном пространстве высота подъема вертикально истекающей насадки струи $H_в$ определяется по формуле

$$H_в = \frac{v_0^2}{2g}, \qquad (2.7.1)$$

где v_0 — скорость истечения струи воды из насадки, м/с.

Таблица 2.7.1

Тип насадки	Коэффициент истечения		
	$\beta_{сж}$	φ	$к_р$
С прямыми линиями конусообразования	0,983	0,92—0,96	0,92—0,95
Коноидальной формы	1,00	0,97	0,97

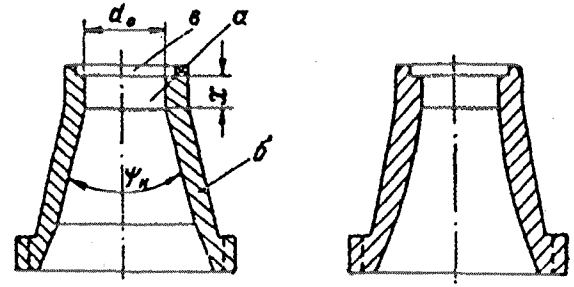


Рис. 2.7.1. *Конические насадки: слева — с прямыми линиями конусообразования; справа — с коноидальными линиями*

При истечении в атмосферу

$$H_a = H_0 - 0{,}000113\frac{H_0}{d_0}, \qquad (2.7.2)$$

где H_a — высота подъема вертикально истекающей струи в атмосферу, м; H_0 — напор у насадки, м; d_0 — диаметр насадки, м².

Наибольшей энергией обладает струя, поднимающаяся на высоту $H_в$:

$$H_в = \varphi_в H_a, \qquad (2.7.3)$$

где $\varphi_в$ — численный коэффициент (принимается в зависимости от H_a).

При H_a, равной 15,2; 22,9; 30,5; 38,1; 45,7 м, $\varphi_в$ соответственно равен 0,82; 0,79; 0,73; 0,67; 0,63.

Основные параметры находятся из следующих формул:

- количество воды, истекающей из насадки, Q_0:

$$Q_0 = F_0\sqrt{2gH_0}, \qquad (2.7.4)$$

где F_0 — площадь выходного отверстия насадки, м²;

- скорость истечения струи из насадки:

$$v_0 = \varphi\sqrt{2gH_0}; \qquad (2.7.5)$$

- диаметр насадки d_0:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4Q_0}{\pi v_0 к_р}}. \qquad (2.7.6)$$

Уменьшение потерь при формировании струи достигается также правильно выбранным и отработанным цилиндрическим пояском a (см. рис. 2.7.1). Чем больше расстояние, на протяжении которого сохраняется форма струи, тем меньше потери ее энергии. Опытами установлено, что такому условию способствует насадка с отшлифованным пояском a, имеющим ширину x, равную $0{,}5d_0$. Выходная кромка пояска должна защищаться выточкой $в$ размером 3×3 мм, предохраняющей ее от зазубрин и заусениц.

Глава 3

РАЗРАБОТКА ЗОЛОТОНОСНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ СВЯЗНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ПРОМЫВКИ

3.1. ГИДРОСМЕСИ И ИХ ПАРАМЕТРЫ

3.2. УСЛОВИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ ГОРНОЙ МАССЫ В ПОТОКЕ ПУЛЬПЫ

3.3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕСОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ТВЕРДОЙ ФРАКЦИИ ПО ВЫСОТЕ ПОТОКА ГИДРОСМЕСИ В ПРОМЫВОЧНЫХ ШЛЮЗАХ

3.4. РЕЖИМЫ И ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ПУЛЬПЫ В ПРОМЫВОЧНЫХ ШЛЮЗАХ

3.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ЗОНЫ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗОЛОТА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПУЛЬПЫ В ПРОМЫВОЧНЫХ ШЛЮЗАХ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

3.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПУТИ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗОЛОТА НА УЧАСТКЕ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ПУЛЬПЫ В ПРОМЫВОЧНОМ ШЛЮЗЕ

3.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПУТИ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗОЛОТА НА УЧАСТКЕ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ПУЛЬПЫ В ПРОМЫВОЧНОМ ШЛЮЗЕ

3.1

Гидросмеси и их параметры

Добычу россыпного золота производят методом промывки с применением драг или промывочных установок. Драги применяют при добыче россыпного золота из золотоносных песков, промывочные установки — при промывке аллювиальных золотоносных отложений.

Добыча россыпного золота методом промывки предусматривает образование пульпы — гидросмеси (смесь золотоносных связных пород с водой) и ее движение по промывочным шлюзам. При этом за счет разности в плотностях золота ($\rho_з = 19{,}32 \cdot 10^3$ кг/м^3) и породы ($\rho_п \approx 2{,}7 \cdot 10^3$ кг/м^3) частицы золота оседают на дно шлюза, а частицы породы уносятся потоком воды.

Перемещение пульпы в промывочных наклонных шлюзах происходит под действием естественного напора, создаваемого перепадом уровней на выходе и входе пульпы в шлюзы. В потоке пульпы возможно перемещать частицы и куски горной массы в диапазоне от глинистой (размер твердых частиц $d_т < 5 \cdot 10^{-6}$ м) до гравийной ($d_т = 2 \cdot 10^{-2}$ м) фракции.

В зависимости от крупности частиц и кусков горной массы гидросмеси делятся на следующие виды:

- гидрозоли, $d_т < 5 \cdot 10^{-5}$ м;
- тонкодисперсные гидросмеси, $d_т = (5—25)10^{-5}$ м;
- грубодисперсные гидросмеси, $d_т = (25—250)10^{-5}$ м;
- весьма грубодисперсные гидросмеси, $d_т > 250 \cdot 10^{-5}$ м.

Гидрозоли представляют собой практически квазиоднородный поток жидкости. Они перемещаются в промывочных шлюзах с равномерным распределением твердых частиц по высоте потока.

Тонкодисперсные гидросмеси обладают свойствами жидкости повышенной плотности. При активном турбулентном перемешивании они перемещаются с равномерной концентрацией твердой фракции по высоте потока.

Грубодисперсные гидросмеси перемещаются в потоке с неравномерной концентрацией твердой фракции по высоте потока в промывочных шлюзах.

Весьма грубодисперсные гидросмеси перемещаются главным образом в нижней части промывочных шлюзов с периодическим взвешиванием кусков горной массы и ярко выраженной неравномерностью концентрации твердой фракции по высоте потока.

Процесс перемещения гидросмеси устойчив в том случае, если скорость потока больше гидравлической крупности самых крупных кусков горной массы. В противном случае будет формироваться *слой отложения* на дне промывочного шлюза.

При перемещении реальных гидросмесей в промывочных шлюзах в верхних слоях потока движутся более тонкодисперсные частицы горной массы, а в нижних — более крупные.

К основным параметрам пульпы (гидросмесей) относятся следующие.

1. *Объемная консистенция* S_o — отношение объема твердой фракции $V_т$ к объему жидкости $V_ж$ в единице объема пульпы:

$$S_o = \frac{V_т}{V_ж}. \qquad (3.1.1)$$

$S_o = 0{,}25—0{,}5$.

2. *Весовая консистенция* $S_в$ — отношение веса твердой фракции $G_т$ к весу жидкости $G_ж$ в единице объема пульпы:

$$S_в = \frac{G_т}{G_ж} = \frac{S_o\gamma_т}{\gamma_ж}, \qquad (3.1.2)$$

где $\gamma_т$ — удельный вес твердой фракции, изменяющийся от $\gamma_т \approx 2{,}7\cdot10^4$ Н/м³ для пустых пород до $\gamma_т = 18{,}953\cdot10^4$ Н/м³ для золота; $\gamma_ж$ — удельный вес воды, $\gamma_ж = 9{,}81\cdot10^3$ Н/м³.

Для пульпы (гидросмесей) при промывке россыпного золота $S_в = 0{,}5—1{,}2$.

3. *Объемная концентрация* S'_o — отношение объема твердой фракции $V_т$ в заданном объеме пульпы к ее объему $V_г$, $V_г = V_т + V_ж$.

$$S'_o = \frac{V_т}{V_г} = \frac{V_т}{V_т + V_ж}. \qquad (3.1.3)$$

Для пульпы (гидросмесей) при промывке россыпного золота $S'_o = 0{,}2—0{,}3$.

4. *Весовая концентрация* $S'_в$ — отношение веса твердой фракции $G_т$ в заданном объеме пульпы к ее весу $G_г$ в этом же объеме, $G_г = G_т + G_ж$.

$$S'_в = \frac{G_т}{G_г} = \frac{G_т}{G_т + G_ж}. \qquad (3.1.4)$$

Формулу (3.1.4) можно представить в следующем виде:

$$S'_в = \frac{V_т\gamma_т}{V_т\gamma_т + V_ж\gamma_ж} = 1 + S_в. \qquad (3.1.5)$$

Для пульпы (гидросмесей) при промывке россыпного золота $S'_в = 0{,}35—0{,}55$.

5. *Удельный вес пульпы* $\gamma_г$ — вес ее единицы объема:

$$\gamma_г = \frac{G_г}{V_г}. \qquad (3.1.6)$$

$\gamma_г = (1{,}2—1{,}7)10^4$ Н/м³.

6. *Относительный вес пульпы* $\gamma'_г$ — отношение веса пульпы $G_г$ в заданном объеме к весу воды $G_ж$ в том же объеме:

$$\gamma'_г = \frac{G_г}{G_ж} = \frac{\gamma_г}{\gamma_ж}. \qquad (3.1.7)$$

$\gamma'_г = 1{,}2—1{,}7$.

7. Критическая крупность — крупность твердых частиц пульпы, при которой сопротивление их движению становится пропорциональным скорости потока во второй степени.

При крупности частиц меньше критической сопротивление их движению пропорционально скорости потока в степени от единицы до двух.

3.2
Условия, обеспечивающие движение частиц горной массы в потоке пульпы

Для направленного движения отдельно взятой частицы горной массы в потоке пульпы (гидросмесей) в промывочном шлюзе необходимо выполнить два основных условия:

1) обеспечить лобовое давление, достаточное для смещения частицы в направлении движения потока пульпы (гидросмесей); это зависит главным образом от скорости потока;

2) перевести частицу во взвешенное состояние; это зависит от плотности частицы и скорости потока пульпы.

Для выполнения первого условия необходимо создать такую скорость потока пульпы, при которой было бы обеспечено трогание частицы. Величина скорости потока пульпы на расстоянии $d_т/2$ от дна промывочного шлюза ($d_т$ — приведенный диаметр твердой частицы, м; $d_т = \sqrt[3]{6V_т/\pi}$; $V_т$ — объем твердой частицы, м³), при которой частица начинает двигаться, называется *скоростью трогания*.

Рассмотрим два варианта формы твердой частицы пульпы: шарообразная и кубообразная.

На шарообразную частицу, находящуюся в потоке жидкости, действует сила лобового давления $F_{дш}$:

$$F_{дш} = \psi S_{мш} P_ж = \psi \frac{\pi d_т^2}{4} \frac{\rho_ж v^2}{2}. \qquad (3.2.1)$$

Аналогично на кубообразную частицу лобовое давление $F_{дк}$ будет равно

$$F_{дк} = \psi S_{мк} P_ж = \psi d_т^2 \frac{\rho_ж v^2}{2}, \qquad (3.2.2)$$

где ψ — коэффициент гидродинамического сопротивления движению частицы, он зависит от ее формы и характера поверхности (табл. 3.2.1); $S_{мш}$ и $S_{мк}$ — миделево сечение соответственно шара и куба; $S_{мш} = \pi d_т^2/4$, $S_{мк} = d_т^2$; $P_ж$ — гидродинамическое давление, Па; $P_ж = \rho_ж v^2/2$; $\rho_ж$ — плотность жидкости (воды), кг/м³; v — скорость потока гидросмеси, м/с.

В тот момент, когда сила лобового давления превысит силу сопротивления движению, частица начнет двигаться.

Таблица 3.2.1

Форма частиц горной массы	Характер поверхности частиц	Коэффициент гидродинамического сопротивления
Пластинчатые и удлиненные	Свежедробленые	0,85—1
Кубообразные	Свежедробленые	0,5—0,7
Шарообразные	Окатанные в потоке	0,4—0,6

Шарообразная частица начнет двигаться, скорее всего, методом качения, кубообразная — методом скольжения.

Сила сопротивления движению равна силе трения между твердой частицей и днищем промывочного шлюза.

В свою очередь сила трения равна силе гравитации частицы за вычетом архимедовых сил, умноженной на коэффициент трения.

Для шарообразной частицы эта сила будет равна

$$F_{\text{сш}} = V_{\text{тш}}(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})gf = \frac{\pi d_{\text{т}}^3}{6}(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})gf, \qquad (3.2.3)$$

для кубообразной

$$F_{\text{ск}} = V_{\text{тк}}(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})gf = d_{\text{т}}^3(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})gf, \qquad (3.2.4)$$

где $V_{\text{тш}}$ и $V_{\text{тк}}$ — объем шарообразной и кубообразной частиц соответственно, м³; $\rho_{\text{т}}$ — плотность твердой частицы, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; f — коэффициент трения; для шарообразной частицы $f \approx 1$, для кубообразной $f \approx 1{,}25$.

Приравнивая правые части выражений (3.2.1) и (3.2.3), а также (3.2.2) и (3.2.4) и заменяя v на $v_{\text{т}}$ ($v_{\text{т}}$ — скорость трогания частицы, м/с), получим условие трогания частицы для шарообразной и кубообразной форм соответственно:

$$v_{\text{тш}} = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{d_{\text{т}}(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})gf}{\psi\rho_{\text{ж}}}}. \qquad (3.2.5)$$

$$v_{\text{тк}} = \sqrt{2\frac{d_{\text{т}}(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})gf}{\psi\rho_{\text{ж}}}}. \qquad (3.2.6)$$

Формулы (3.2.5) и (3.2.6) различаются численными коэффициентами в подкоренном выражении. Для реальных форм частиц горной массы с некоторым приближением можно принять численное значение этого коэффициента равным среднему между 4/3 и 2, т.е. 10/3. В этом случае выражение для определения скорости трогания реальной твердой частицы в потоке жидкости будет иметь вид

$$v_{\text{т}} = \sqrt{\frac{10}{3}\frac{d_{\text{т}}(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})gf}{\psi\rho_{\text{ж}}}}. \qquad (3.2.7)$$

Как сказано выше, вторым условием направленного перемещения твердой частицы горной массы в потоке является необходимость ее взвешивания. Для этого необходимо, чтобы взвешивающие силы были больше *гидравлической крупности* твердой частицы (скорость равномерного свободного падения твердой частицы в спокойной жидкости).

При вертикальном свободном движении твердой частицы с приведенным диаметром $d_{\text{т}}$ в спокойной жидкости движущая сила будет равна силе гравитации за вычетом архимедовых сил:

$$F_{\text{д}} = V_{\text{т}}(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})g = \frac{\pi d_{\text{т}}^3}{6}(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})g, \qquad (3.2.8)$$

где $V_{\text{т}}$ — объем твердой частицы, м³; $V_{\text{т}} = \pi d_{\text{т}}^3 / 6$.

Сила сопротивления движению твердой частицы на участке равномерного свободного ее падения в спокойной жидкости будет равна

$$F_{\text{с}} = S_{\text{м}}\psi\frac{\rho_{\text{т}}\omega^2}{2} = \frac{\pi d_{\text{т}}^2}{4}\psi\frac{\rho_{\text{ж}}\omega^2}{2}, \qquad (3.2.9)$$

где $S_{\text{м}}$ — миделево сечение твердой частицы, м²; $S_{\text{м}} = \pi d_{\text{т}}^2 / 4$; ω — ее гидравлическая крупность, м/с.

Приравнивая правые части выражений (3.2.8) и (3.2.9), что справедливо для условия равномерного падения твер-

дой частицы в спокойной жидкости, получим уравнение для определения гидравлической крупности:

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{d_т(\rho_т - \rho_ж)g}{\psi\rho_ж}}. \qquad (3.2.10)$$

Численные значения гидравлической крупности для частиц вмещающих россыпных золотоносных пород и для золота приведены в табл. 3.2.2.

Таблица 3.2.2

Фракция	Размер частицы, м	Гидравлическая крупность, м/с	
		вмещающих пород	частиц золота
Глинистая	$< 5\cdot10^{-6}$	$< 1{,}5\cdot10^{-5}$	$< 10^{-4}$
Иловатая	$5\cdot10^{-6}$—$5\cdot10^{-5}$	$1{,}5\cdot10^{-5}$—$1{,}5\cdot10^{-3}$	10^{-4}—10^{-2}
Пылеватая	$5\cdot10^{-5}$—$5\cdot10^{-4}$	$1{,}5\cdot10^{-3}$—$3\cdot10^{-2}$	10^{-2}—0,2
Песчаная	$5\cdot10^{-4}$—$2\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-2}$—0,1	0,2—0,7
Гравийная	$2\cdot10^{-3}$—$2\cdot10^{-2}$	0,1—0,5	0,7—3,5

При движении твердых частиц в потоке гидросмеси по наклонным промывочным шлюзам к силе сопротивления движению частиц вниз [согласно выражению (3.2.9)] добавляется подъемная сила. Последняя обусловлена разностью между скоростью потока гидросмеси на его поверхности ($v_{хн}$) в промывочном шлюзе и у дна потока, где его скорость равна нулю.

Таким образом, для твердой частицы движущегося по промывочному шлюзу потока гидросмеси выражение (3.2.9) будет иметь вид

$$F'_с = F_с + F_п = \frac{\pi d_т^2}{4}\psi\frac{\rho_ж\omega^2}{2} + \frac{\pi d_т^2}{4}\frac{\rho_ж v_{хн}^2}{2}, \qquad (3.2.11)$$

где $F'_с$ — суммарная взвешивающая сила, Н; $F_п$ — подъемная сила, обусловленная разностью между скоростью потока у его поверхности и у дна промывочного шлюза, Н.

Приравнивая правые части выражений (3.2.8) и (3.2.11), получим

$$\frac{\pi d_т^3}{6}(\rho_т - \rho_ж)g = \frac{\pi d_т^2}{4}\psi\frac{\rho_ж\omega^2}{2} + \frac{\pi d_т^2}{4}\frac{\rho_ж v_{хн}^2}{2}. \qquad (3.2.12)$$

Из (3.2.12) можно определить скорость на поверхности потока гидросмеси ($v_{хн}$) вдоль поверхности промывочного шлюза, при которой твердые частицы с плотностью $\rho_т$ и приведенным диаметром $d_т$ будут находиться во взвешенном состоянии и перемещаться вдоль промывочного шлюза

$$v_{хн} = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{d_т(\rho_т - \rho_ж)g}{\rho_ж} - \psi\omega^2}. \qquad (3.2.13)$$

Так как плотность золота примерно в 7 раз выше плотности частиц пустой породы, то условие (3.2.13) будет обеспечивать движение частиц пустой породы вдоль шлюза при некотором значении $v_{хн}$, но не обеспечивать движение частиц золота, которые будут при этой скорости потока оседать на дно промывочного шлюза.

Взвешивание частиц горной массы в потоке гидросмеси оценивается *работой взвешивания* $A_{вз}$ (Дж/м³·с), которая равна энергии, затраченной на поддержание во взвешенном состоянии единицы объема горной массы в единицу времени

$$A_{вз} = \omega g(\rho_т - \rho_ж)S_о(1 - S_о), \qquad (3.2.14)$$

где $S_о$ — объемная консистенция гидросмеси, м³/м³.

3.3
Распределение весовой концентрации твердой фракции по высоте потока гидросмеси в промывочных шлюзах

Установлено, что весовая концентрация твердых частиц $S'_в$ по высоте h потока гидросмеси в промывочных шлюзах имеет следующее распределение:

$$S'_в = S'_{в0} \exp(-\frac{\omega h}{\varepsilon}), \qquad (3.3.1)$$

где $S'_{в0}$ — весовая концентрация твердых частиц гидросмеси (кг/кг) у дна промывочного шлюза при $h = 0$; ε — коэффициент турбулентной диффузии твердых частиц, м²/с.

Выражение (3.3.1) весьма неудобно для практических расчетов, так как характеристика $S'_{в0}$ является довольно неоднозначной и не строго конкретной величиной. Для устранения этого неудобства и внесения конкретики поступим следующим образом: введем безразмерные параметры:

$$\left.\begin{aligned} y &= h/H, \\ \alpha &= \omega H/\varepsilon. \end{aligned}\right\} \qquad (3.3.2)$$

Подставляя (3.3.2) в (3.3.1), получим

$$S'_в = S'_{в0} \exp(-\alpha y). \qquad (3.3.3)$$

Согласно теории средних величин выражение для определения средней весовой концентрации $S'_{в.ср}$ по высоте потока гидросмеси имеет вид

$$S'_{в.ср} = \frac{1}{H}\int_0^H S'_в \, dh, \qquad (3.3.4)$$

где H — высота потока гидросмеси в промывочном шлюзе, м.

Подставляя в (3.3.4) значение $S'_в$ из (3.3.3) и делая замену переменных, получим

$$S'_{в.ср} = \frac{1}{H}\int_0^1 S'_{в0} \exp(-\alpha y) H dy,$$

или

$$S'_{в.ср} = \int_0^1 S'_{в0} \exp(-\alpha y) dy. \qquad (3.3.5)$$

Интегрируя правую часть выражения (3.3.5), получим

$$S'_{в.ср} = \frac{S'_{в0}}{\alpha}[1 - \exp(-\alpha y)], \qquad (3.3.6)$$

откуда значение $S'_{в0}$ можно выразить через среднюю весовую концентрацию потока гидросмеси:

$$S'_{в0} = \frac{\alpha S'_{в.ср}}{1 - \exp(-\alpha y)}. \qquad (3.3.7)$$

Подставляя (3.3.7) в выражение (3.3.3), получим

$$S'_в = \frac{\alpha S'_{в.ср} \exp(-\alpha y)}{1 - \exp(-\alpha y)}. \qquad (3.3.8)$$

Выражение (3.3.8) для определения характера распределения весовой концентра-

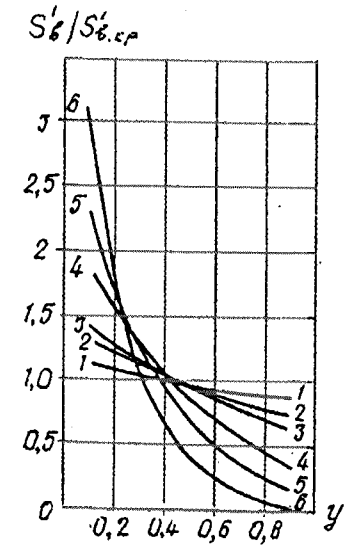


Рис. 3.3.1. *Зависимость относительной концентрации ($S'_в/S'_{в.ср}$) твердой фракции от высоты сечения потока (y):*
1, 2, 3, 4, 5, 6 соответственно при α = 0,3; 0,7; 1; 2; 3 и 5

ции твердой фракции по высоте потока гидросмеси в промывочном шлюзе можно представить в безразмерном виде:

$$\frac{S'_в}{S'_{в.ср}} = \frac{\alpha \exp(-\alpha y)}{1-\exp(-\alpha y)}. \qquad (3.3.9)$$

В графическом виде решение выражения (3.3.9) представлено на рис. 3.3.1.

3.4 Режимы и параметры движения пульпы в промывочных шлюзах

При поступлении пульпы в промывочный шлюз она сперва движется по нему с ускорением на некотором участке длины шлюза. Затем на оставшемся участке длины шлюза скорость потока становится постоянной и зависит от наклона промывочного шлюза. Первый участок называется участком неустановившегося движения пульпы. Для него характерно неравномерное распределение скорости потока пульпы по трем направлениям: по длине шлюза, его ширине и по высоте потока пульпы в шлюзе. Второй участок называется участком установившегося движения. Для него характерно неравномерное распределение скорости потока пульпы только по ширине и по высоте промывочного шлюза.

Очевидно, что скорость потока пульпы у стенок и днища шлюза равна нулю и максимальна на поверхности потока.

Так как ширина промывочных шлюзов примерно на порядок выше высоты потока пульпы в нем, то можно считать, что при установившемся режиме течения пульпы неравномерность распределения ее скорости имеет место только по высоте потока, а по ширине шлюза скорость потока одинакова.

Неравномерность скорости пульпы по высоте ее потока в промывочном шлюзе предопределяет наличие градиента скорости dv/dh (v — скорость потока пульпы, м/с; h — текущее значение высоты потока, м).

Если за начало отсчета вертикальной координаты принять днище шлюза и ось h направить вверх, то естественно предположить, что при $h = 0$ градиент скорости будет стремиться к бесконечности. По мере приближения к поверхности потока градиент скорости уменьшается, а в верхних слоях он становится практически равным нулю.

Градиент скорости обусловлен вязкостью пульпы. С увеличением консистенции (концентрации) пульпы увеличивается ее вязкость, что в свою очередь ведет к увеличению градиента скорости потока пульпы по его высоте.

Наличие градиента скорости вызывает силы трения между смежными элементарными слоями в потоке пульпы.

При ламинарном движении в промывочном шлюзе (при отсутствии завихрений между смежными слоями потока) силы трения определяются согласно закону

$$\tau_л = \mu \frac{dv}{dh}, \qquad (3.4.1)$$

где $\tau_л$ — касательные напряжения трения при ламинарном движении потока, Па; μ — коэффициент динамической вязкости потока пульпы, Н·с/м²; $\mu = \nu_1 \rho_г$, где ν_1 — кинематическая вязкость пульпы, м²/с (для чистой воды $\mu = 10^{-3}$ Па·с и $\nu_1 = 10^{-6}$ м²/с при $T = 5$ °С); $\rho_г$ — плотность пульпы, кг/м³.

При турбулентном движении потока пульпы, т.е. когда между смежными элементарными слоями потока существуют турбулентные завихрения и слои перемешиваются, касательные напряжения трения определяются из выражения

$$\tau_к = \tau_л + \tau_т = \mu \frac{dv}{dh} + \mu_т \frac{dv}{dh}, \qquad (3.4.2)$$

где $\tau_т$ — турбулентная составляющая касательных напряжений, Па; $\tau_т = \mu_т \frac{dv}{dh}$; $\mu_т$ — коэффициент турбулентной динамической вязкости пульпы, Н·с/м².

$$\mu_т = \rho_г e^2 \frac{dv}{dh}. \qquad (3.4.3)$$

Вероятность ламинарного или турбулентного движения в промывочном шлюзе зависит от скорости потока пульпы v, ее кинематической вязкости ν, высоты потока H и оценивается критерием Рейнольдса Re:

$$\mathrm{Re} = \frac{vH}{\nu_1}. \qquad (3.4.4)$$

Экспериментально установлено, что при Re < 1000—1100 имеет место только ламинарный режим течения потока пульпы; при (1000—1100) < Re < (6400—6500) — переходный режим; при Re > (6400—6500) — только турбулентный режим.

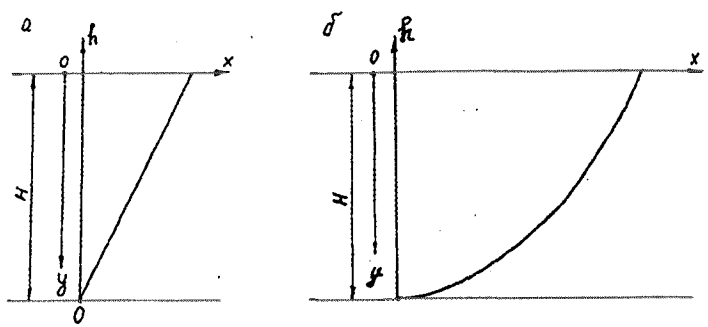


Рис. 3.4.1. *Варианты распределения скорости потока пульпы по его высоте*

Распределение горизонтальной скорости по высоте пульпы в промывочном шлюзе можно представить изменяющимся по линейному (рис. 3.4.1, *а*) или по параболическому (рис. 3.4.1, *б*) закону. На рис. 3.4.1 ось x совпадает с направлением движения потока гидросмеси в промывочном шлюзе, а ось h направлена от днища шлюза к поверхности потока гидросмеси.

При распределении горизонтальной скорости потока гидросмеси по его высоте (v_x) по варианту рис. 3.4.1, *а* уравнение, описывающее это распределение, имеет вид

$$v_x = v_{xн} \frac{h}{H}, \qquad (3.4.5)$$

где $v_{xн}$ — горизонтальная скорость потока пульпы на его поверхности, м/с; H — высота потока пульпы в промывочном шлюзе, м.

При распределении горизонтальной скорости потока по его высоте (v_x) по варианту рис. 3.4.1, *б* уравнение, описывающее это распределение, имеет вид

$$v_x = v_{xн} \sqrt{\frac{h}{H}}. \qquad (3.4.6)$$

Объемный расход пульпы Q (объем пульпы, протекающей через сечение промывочного шлюза в единицу времени) можно определить из выражения

$$Q = \int_0^H 2(Ш + h) v_x \, dh, \qquad (3.4.7)$$

где Ш — ширина промывочного шлюза, м.

Подставляя в (3.4.7) значения v_x из (3.4.5) и из (3.4.6), получим выражения для определения объемного расхода

пульпы при распределении горизонтальной скорости потока соответственно по вариантам рис. 3.4.1, *а* и 3.4.1, *б*:

$$Q_а = \int_0^H 2(Ш + h)v_{хн}\frac{h}{H}dh = \frac{2Шv_{хн}}{H}\int_0^H hdh + \frac{2v_{хн}}{H}\int_0^H h^2 dh =$$

$$= Шv_{хн}H + \frac{2}{3}v_{хн}H^2 = v_{хн}\left(ШH + \frac{2}{3}H^2\right); \qquad (3.4.8)$$

$$Q_б = \int_0^H 2(Ш + h)v_{хн}\sqrt{\frac{h}{H}}dh = \frac{2Шv_{хн}}{H^{1/2}}\int_0^H h^{1/2}dh + \frac{2v_{хн}}{H^{1/2}}\int_0^H h^{3/2}dh =$$

$$= \frac{4}{3}Шv_{хн}H + \frac{4}{5}v_{хн}H^2 = 4v_{хн}\left(\frac{1}{3}ШH + \frac{1}{5}H^2\right). \qquad (3.4.9)$$

Объемный расход пульпы можно определить, зная среднюю скорость потока $v_{ср}$ по его высоте в промывочном шлюзе

$$Q = v_{ср}ШH. \qquad (3.4.10)$$

Приравнивая правую часть (3.4.10) к правой части (3.4.8) и (3.4.9), получим соответственно выражения для определения скорости потока пульпы на его поверхности $v_{хн}$:

а) $$v_{ср}ШH = v_{хн}\left(ШH + \frac{2}{3}H^2\right),$$

откуда $$v_{хн} = 3v_{ср}\frac{Ш}{3Ш + 2H}; \qquad (3.4.11)$$

б) $$v_{ср}ШH = 4v_{хн}\left(\frac{1}{3}ШH + \frac{1}{5}H^2\right),$$

откуда $$v_{хн} = \frac{15}{4}v_{ср}\frac{Ш}{5Ш + 3H}. \qquad (3.4.12)$$

Значение $v_{ср}$ можно легко определить экспериментально. Зная $v_{ср}$, можно по формулам (3.4.11) и (3.4.12) рассчитать максимальную скорость потока пульпы у его поверхности при ее распределении по вариантам рис. 3.4.1, *а* и 3.4.1, *б* соответственно.

3.5 Определение длины зоны осаждения частиц золота при движении пульпы в промывочных шлюзах при установившемся режиме

При вливании пульпы в промывочный шлюз движение потока вначале будет иметь неустановившийся режим (см. разд. 3.4). Участок неустановившегося режима по длине промывочного шлюза является очень коротким (примерно равен 1/15—1/20 общей длины шлюза). Длина шлюза $L_ш$ = 25—27 м. На этом участке осаждаются на днище шлюза только кусочки самородного золота. Основная же масса частиц золота и тем более частиц породы продолжает двигаться в установившемся режиме в потоке пульпы по длине шлюза. Чем меньше частицы золота, тем на большей длине шлюза происходит их осаждение. Общая длина промывочного шлюза и угол его наклона выбираются такими, чтобы при этом произошло максимально возможное осаждение в нем частиц золота. Это достигается регулированием скорости потока пульпы, которая в свою очередь регулируется углом наклона промывочного шлюза.

На участке неустановившегося режима движения потока пульпы осаждение кусочков золота происходит сначала с ускорением, а затем с равномерной скоростью. При этом скорость осаждения тем больше, а длина пути осаждения тем меньше, чем больше гидравлическая крупность кусочков золота. С увеличением гидравлической крупности кусочков самородного золота высота участка неустановившегося режима вертикального осаждения возрастает.

Для проверки возможности использования законов установившегося или неустановившегося движения частиц при осаждении рассмотрим оба варианта и сделаем оцен-

ку численных значений полученных результатов. Вначале рассмотрим установившийся режим движения частиц при их осаждении. При этом следует иметь в виду, что распределение скорости потока пульпы по его высоте в промывочном шлюзе может быть различно. Рассмотрим два наиболее вероятных варианта распределения скорости потока пульпы по его высоте (см. рис. 3.4.1):

- у дна потока скорость равна нулю, а по мере удаления от дна потока она возрастает по линейному закону;
- у дна потока скорость равна нулю, а по мере удаления от дна потока она возрастает по параболическому закону.

Если ось x направить вдоль течения потока по промывочному шлюзу, а ось y — вниз потока, т.е. начало координаты y расположить на поверхности потока, то варианты распределения скоростей по высоте потока графически можно представить в виде, изображенном на рис. 3.4.1.

Рассмотрим эти варианты.

Вариант а. Уравнение, описывающее распределение горизонтальной скорости подводного потока по его высоте, имеет вид (3.4.5).

Обозначив $v_{\text{кв}}/H = \chi$ и приняв во внимание, что текущая высота от дна шлюза $h = H - y$ (см. рис. 3.4.1), уравнение (3.4.5) можно представить в виде

$$v_x = \chi(H - y). \qquad (3.5.1)$$

Путь, пройденный по горизонтали частицей золота, расположенной в произвольной точке y по высоте потока гидросмеси за время dt, при распределении горизонтальной составляющей скорости потока по вертикали согласно (3.4.5) будет равен

$$dx = v_x dt = \chi(H - y)dt. \qquad (3.5.2)$$

Путь, пройденный той же частицей вниз при ее осаждении за это же время при распределении горизонтальной составляющей скорости потока по вертикали, по варианту (3.4.5) будет равен

$$dy = \omega dt, \qquad (3.5.3)$$

где ω — гидравлическая крупность частицы золота, м/с.

Поделив почленно левую и правую части выражения (3.5.2) на левую и правую части выражения (3.5.3), получим уравнение линии тока (уравнение траектории движения частиц золота по высоте потока пульпы в промывочном шлюзе):

$$\frac{dx}{dy} = \frac{v_x}{\omega} = \frac{\chi(H - y)}{\omega}. \qquad (3.5.4)$$

Принимая во внимание, что $dy = -d(H - y)$, выражение (3.5.4) можно представить в виде

$$dx = \frac{\chi}{\omega}(H - y)dy = -\frac{\chi}{\omega}(H - y)d(H - y). \qquad (3.5.5)$$

Интегрируя левую и правую части выражения (3.5.5), получим общее уравнение для оценки пути, пройденного частицей в горизонтальном направлении при распределении горизонтальной составляющей скорости потока в промывочном шлюзе, по варианту *а*:

$$x = -\frac{\chi}{\omega}\frac{(H - y)^2}{2} + C_1, \qquad (3.5.6)$$

где C_1 — постоянная интегрирования, определяемая из граничных условий.

При $x = 0$ высота осаждения твердой частицы будет равна нулю, т.е. $y = 0$. Следовательно, постоянная интегрирования согласно (3.5.6) равна

$$C_1 = \frac{\chi}{\omega}\frac{H^2}{2}.$$

Подставляя значение C_1 в (3.5.6), получим уравнение для оценки горизонтальной составляющей пути, пройденного частицей золота за время, при котором она успела осесть на высоту y:

$$x = \frac{\chi H^2}{2\omega} - \frac{\chi (H-y)^2}{2\omega}. \qquad (3.5.7)$$

За время осаждения частицы на дно, т.е. когда $y = H$, частица золота успеет пройти по горизонтали путь (горизонтальный путь осаждения L), который согласно (3.5.7) определяется выражением

$$L = x\big|_{y=H} = \frac{\chi H^2}{2\omega}.$$

Принимая во внимание, что $\chi = v_{хн}/H$, этот путь будет равен

$$L = 0{,}5\frac{v_{хн}}{\omega} H. \qquad (3.5.8)$$

Вариант б. Уравнение, описывающее распределение горизонтальной скорости потока по его высоте, имеет вид (3.4.6). Обозначив в уравнении (3.4.6) $v_{хн}/\sqrt{H} = \chi_0$ и $h = H - y$ получим

$$v_x = \chi_0 \sqrt{H-y}. \qquad (3.5.9)$$

Путь, пройденный по горизонтали частицей золота, расположенной в произвольной точке с координатой y по высоте потока пульпы за время dt, при распределении скорости потока гидросмеси по варианту (3.4.6) будет равен

$$dx = v_x dt = \chi_0 (H-y) dt. \qquad (3.5.10)$$

Путь, пройденный этой же частицей вниз при ее осаждении за время dt, при распределении горизонтальной составляющей скорости потока по вертикали по варианту

(3.4.6) будет определяться, как и в случае варианта (3.4.5), по формуле (3.5.3).

Разделив почленно левую и правую части выражения (3.5.10) на левую и правую части выражения (3.5.3), получим уравнение траектории движения частицы золота в промывочном шлюзе по высоте потока пульпы при распределении горизонтальной составляющей скорости потока по варианту (3.4.6).

$$\frac{dx}{dy} = \frac{\chi_0 \sqrt{H-y}}{\omega}. \qquad (3.5.11)$$

Сделав разделение переменных в (3.5.11) и принимая во внимание, что $dy = -d(H-y)$, получим

$$dx = \frac{\chi_0 \sqrt{H-y}}{\omega} dy = -\frac{\chi_0 \sqrt{H-y}}{\omega} d(H-y). \qquad (3.5.12)$$

Интегрируя левую и правую части выражения (3.5.12), получим общее уравнение для определения пути, пройденного частицей в горизонтальном направлении, при распределении горизонтальной составляющей скорости по вертикали потока по варианту (3.4.6).

$$x = -\frac{2\chi_0}{3\omega}\left(\sqrt{H-y}\right)^3 + C_2. \qquad (3.5.13)$$

При этом постоянную интегрирования C_2 можно определить из (3.5.13): приняв в нем $y = 0$ при $x = 0$:

$$C_2 = \frac{2\chi_0}{3\omega} H^{3/2}. \qquad (3.5.14)$$

Подставляя значение C_2 из (3.5.14) в (3.5.13), получим уравнение для расчета горизонтальной составляющей пути осаждения частицы золота в промывочном шлюзе:

$$x = \frac{2\chi_0}{3\omega} H^{3/2} - \frac{2\chi_0}{3\omega}(H-y)^{3/2}. \qquad (3.5.15)$$

За время полного осаждения частицы золота при распределении горизонтальной скорости потока пульпы в шлюзе по высоте потока по варианту (3.4.6) она пройдет путь по горизонтали, равный

$$L = x\big|_{y=H} = \frac{2\chi_0 H^{3/2}}{3\omega}. \qquad (3.5.16)$$

При $\chi_0 = v_{хн}/\sqrt{H}$ этот путь будет равен

$$L = \frac{2}{3}\frac{v_{хн}}{\omega}H. \qquad (3.5.17)$$

3.6 Определение вертикальной составляющей пути осаждения частиц золота на участке неустановившегося режима движения пульпы в промывочном шлюзе

Уравнение движения частицы золота (или любой твердой частицы) в потоке при ее осаждении в неустановившемся режиме течения пульпы имеет вид

$$\rho_т \frac{\pi d_т^3}{6}\frac{dv_в}{dt} = \rho_т g\frac{\pi d_т^3}{6} - \rho_ж g\frac{\pi d_т^3}{6} - 3\pi d_т \mu v_в, \qquad (3.6.1)$$

где $\rho_т$ — плотность твердых частиц, кг/м³; $d_т$ — приведенный диаметр твердых частиц, м; $dv_в/dt$ — ускорение твердых частиц при осаждении по вертикали на участке неустановившегося движения, м/с²; g — ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_ж$ — плотность жидкости, кг/м³; μ — динамическая вязкость жидкости, Па·с; $v_в$ — скорость осаждения твердой частицы по вертикали при неустановившемся режиме осаждения, м/с.

Левая часть уравнения (3.6.1) представляет собой силу инерции твердой частицы на участке неустановившегося

движения. Первый член правой части уравнения характеризует силу гравитации частицы, второй — архимедову силу и третий — силу вязкого сопротивления жидкости.

Поделив почленно левую и правую части уравнения (3.6.1) на $\rho_т \frac{\pi d_т^3}{6}$ и сгруппировав члены, получим

$$\frac{dv_в}{dt} = \frac{\rho_т - \rho_ж}{\rho_т} g - \frac{18\mu}{\rho_т d_т^2} v_в. \qquad (3.6.2)$$

Введем обозначения:

$$\alpha = \frac{\rho_т - \rho_ж}{\rho_т} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{18\mu}{\rho_т d_т^2}. \qquad (3.6.3)$$

С учетом (3.6.3) выражение (3.6.2) примет вид

$$\frac{dv_в}{dt} = \alpha g - \beta v_в. \qquad (3.6.4)$$

Сделав разделение переменных в (3.6.4), получим

$$\frac{dv_в}{\alpha g - \beta v_в} = dt. \qquad (3.6.5)$$

Интегрируя левую часть уравнения от нуля до $v_{вн}$ ($v_{вн}$ — скорость вертикального осаждения частицы на момент окончания неустановившегося режима), а правую — от нуля до $t_п$ ($t_п$ — время окончания неустановившегося режима движения частицы по вертикали), получим

$$-\frac{1}{\beta}\ln(\alpha g - \beta v_в)\Big|_0^{v_{вн}} = t_п, \qquad (3.6.6)$$

или

$$\ln(\alpha g - \beta v_{вн}) - \ln \alpha g = -\beta t_п,$$

или

$$\ln\left(1 - \frac{\beta v_{вн}}{\alpha g}\right) = -\beta t_п. \qquad (3.6.7)$$

Потенцируя выражение (3.6.7), получим

$$1-\frac{\beta v_{вн}}{\alpha g}=\exp(-\beta t_n),$$

или

$$1-\exp(-\beta t_n)=\frac{\beta v_{вн}}{\alpha g}. \qquad (3.6.8)$$

Из (3.6.8) можно определить скорость вертикального осаждения частицы на момент окончания неустановившегося режима ее осаждения:

$$v_{вн}=\frac{\alpha g}{\beta}[1-\exp(-\beta t_n)]. \qquad (3.6.9)$$

Для одиночной твердой частицы при $t \to t_n$ $v_{вн} \to \omega$ (ω — гидравлическая крупность частицы).

В этом случае выражение (3.6.7) примет вид

$$\ln(1-\frac{\beta\omega}{\alpha g})=-\beta t_n,$$

откуда время окончания неустановившегося режима осаждения частиц будет равно

$$t_n=\frac{-\ln\left(1-\frac{\beta\omega}{\alpha g}\right)}{\beta}. \qquad (3.6.10)$$

Так как $v_{вн}=dy/dt$, то выражение (3.6.9) в общем случае можно представить в виде

$$\frac{dy}{dt}=\frac{\alpha g}{\beta}[1-\exp(-\beta t)], \qquad (3.6.11)$$

или

$$dy=\frac{\alpha g}{\beta}[1-\exp(-\beta t)]dt. \qquad (3.6.12)$$

Интегрируя левую часть выражения (3.6.12) от нуля до y_n и правую часть от нуля до t_n, получим значение пути осаждения твердой частицы по вертикали на участке неустановившегося движения:

$$y_n=\frac{\alpha g}{\beta}\left[t-\frac{\exp(-\beta t)}{-\beta}\Big|_0^{t_n}\right],$$

или

$$y_n=\frac{\alpha g}{\beta}\left[t_n+\frac{\exp(-\beta t_n)-1}{\beta}\right], \qquad (3.6.13)$$

где y_n — высота осаждения частицы на момент окончания неустановившегося режима.

3.7 Определение горизонтальной составляющей пути осаждения частиц золота на участке неустановившегося режима движения пульпы в промывочном шлюзе

Рассмотрим, как и прежде, два вероятностных варианта распределения скорости потока по его высоте в промывочном шлюзе для оценки горизонтальной составляющей пути осаждения твердых частиц при неустановившемся режиме.

Вариант а. Согласно (3.4.5) распределение горизонтальной составляющей скорости потока по его высоте в шлюзе имеет вид

$$v_x=\frac{v_{хн}}{H}(H-y), \qquad (3.7.1)$$

где $(H-y)=h$ — высота частицы над уровнем дна промывочного шлюза.

Принимая во внимание, что $v_x = \frac{dx}{dt}$, выражение (3.7.1) представим в виде

$$\frac{dx}{dt} = \frac{v_{хн}}{H}(H - y). \qquad (3.7.2)$$

Подставляя в выражение (3.7.2) значение y для общего случая из (3.6.13), получим

$$\frac{dx}{dt} = \frac{v_{хн}}{H}\left\{H - \left\{\frac{\alpha g}{\beta}\left[t + \frac{\exp(-\beta t) - 1}{\beta}\right]\right\}\right\}. \qquad (3.7.3)$$

Сделав разделение переменных в (3.7.3) и проинтегрировав его, получим уравнение для оценки горизонтальной составляющей пути осаждения при неустановившемся режиме:

$$x = \frac{v_{хн}}{H}\left\{Ht - \left\{\frac{\alpha g}{\beta}\left[\frac{t^2}{2} - \frac{\exp(-\beta t) - 1}{\beta^2} - \frac{t}{\beta}\right]\right\}\right\}. \qquad (3.7.4)$$

На момент окончания неустановившегося режима осаждения и перехода его в установившийся горизонтальную составляющую пути при распределении скоростей по варианту *а* определим из выражения

$$x_n = \frac{v_{хн}}{H}\left\{Ht_n - \left\{\frac{\alpha g}{\beta}\left[\frac{t_n^2}{2} - \frac{\exp(-\beta t_n) - 1}{\beta^2} - \frac{t_n}{\beta}\right]\right\}\right\}. \qquad (3.7.5)$$

Вариант б. Согласно (3.4.6) распределение горизонтальной составляющей скорости потока по его высоте в шлюзе имеет вид

$$v_x = \frac{v_{хн}}{\sqrt{H}}\sqrt{H - y}. \qquad (3.7.6)$$

Принимая во внимание, что $v_x = \frac{dx}{dt}$, из (3.7.6) имеем

$$\frac{dx}{dt} = \frac{v_{хн}}{\sqrt{H}}\sqrt{H - y}. \qquad (3.7.7)$$

Поставляя значение y для общего случая из выражения (3.6.13) в (3.7.7), получим

$$\frac{dx}{dt} = \frac{v_{хн}}{\sqrt{H}}\sqrt{H - \frac{\alpha g}{\beta}\left[t + \frac{\exp(-\beta t) - 1}{\beta}\right]}. \qquad (3.7.8)$$

Разделив переменные в выражении (3.7.8) и проинтегрировав его левую и правую части, получим

$$\int_0^{x_n} dx = \frac{v_{хн}}{\sqrt{H}}\int_0^{t_n}\sqrt{H - \frac{\alpha g}{\beta}\left[t + \frac{\exp(-\beta t) - 1}{\beta}\right]}\,dt. \qquad (3.7.9)$$

Интеграл в правой части (3.7.9) не табличный. Интегрирование можно выполнить, если разложить функцию $\exp(-\beta t)$ в ряд по возрастающим степеням:

$$e^{-\beta t} = 1 + \frac{-\beta t}{1!} + \frac{\beta^2 t^2}{2!} + \ldots \qquad (3.7.10)$$

Так как согласно (3.6.3) $\beta \approx 1$, а время наступления регулярного режима осаждения частиц золота в потоке пульпы составляет десятые и даже сотые доли секунды, то абсолютное значение произведения βt мало. В связи с этим в разложении (3.7.10) примем во внимание только первые три члена. При этом выражение (3.7.9) примет вид

$$x_n = \frac{v_{хн}}{\sqrt{H}}\int_0^{t_n}\sqrt{H - \frac{\alpha g}{\beta}\left[t + \frac{1}{\beta}\left(1 + \frac{-\beta t}{1} + \frac{\beta^2 t^2}{2} - 1\right)\right]}\,dt,$$

или после преобразований

$$x_n = \frac{v_{хн}}{\sqrt{H}} \int_0^{t_n} \sqrt{H - \frac{\alpha g}{\beta}\left(t - t + \frac{\beta^2 t^2}{2\beta}\right)}\, dt = \frac{v_{хн}}{\sqrt{H}} \int_0^{t_n} \sqrt{H - \frac{1}{2}\alpha g t^2}\, dt. \quad (3.7.11)$$

Обозначим

$$\frac{v_{хн}}{\sqrt{H}} = A \quad \text{и} \quad -\frac{1}{2}\alpha g = B, \quad (3.7.12)$$

и выражение (3.7.11) примет вид

$$x_n = A \int_0^{t_n} \sqrt{H + Bt^2}\, dt. \quad (3.7.13)$$

Интеграл правой части в (3.7.13) является табличным и равен

$$x_n = A \int_0^{t_n} \sqrt{Bt^2 + H}\, dt =$$

$$= A\left[\frac{1}{2} t\sqrt{Bt^2 + H} + \frac{H}{2}\left(-\frac{1}{\sqrt{-B}} \arcsin \frac{2Bt}{\sqrt{-4BH}}\right)\right]\Bigg|_0^{t_n} =$$

$$= A\left[\frac{1}{2} t_n \sqrt{Bt_n^2 + H} + \frac{H}{2}\left(-\frac{1}{\sqrt{-B}} \arcsin \frac{2Bt_n}{\sqrt{-4BH}}\right)\right]. \quad (3.7.14)$$

Подставив значения A и B из (3.7.12) в (3.7.14), окончательно получим

$$x_n = \frac{v_{хн}}{\sqrt{H}}\left[\frac{1}{2} t_n \sqrt{H - \frac{1}{2}\alpha g} - \frac{H}{\sqrt{2\alpha g}} \arcsin\left(-\sqrt{\frac{\alpha g}{2H}}\, t_n\right)\right]. \quad (3.7.15)$$

Выражение (3.7.15) имеет смысл только в том случае, если подкоренная функция в (3.7.11) является положительной. Это в свою очередь может быть только в том случае, если численное значение высоты потока пульпы (H) в промывочном шлюзе будет больше вычитаемого в подкоренной функции выражения (3.7.11).

Глава 4

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОМЫВКИ ПРИ ДОБЫЧЕ РОССЫПНОГО ЗОЛОТА

4.1. ГИДРОЭЛЕВАТОРЫ

4.2. РАСЧЕТ ГИДРОЭЛЕВАТОРНЫХ УСТАНОВОК

4.3. ГИДРОЭЛЕВАТОРЫ С КОНИЧЕСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГОРЛОВИНОЙ

4.4. ГИДРОМОНИТОРЫ

4.5. ГИДРОЭЛЕВАТОРНЫЕ ПРИБОРЫ

4.6. ПЕРЕДВИЖНАЯ ГИДРОМОНИТОРНАЯ ПРОМЫВОЧНАЯ УСТАНОВКА (ПГПУ)

4.1

Гидроэлеваторы

Гидроэлеватор, или водоструйный насос, представляет собой аппарат, в котором энергия водяной струи, истекающей с большой скоростью из насадки, используется для засасывания, подъема или перемещения смеси твердых материалов с жидкостью или чистой жидкости по пульповодам (водоводам).

В отличие от центробежного насоса, где скорость и давление пульпы создаются механическим путем, в струйном насосе это достигается гидравлическим способом.

Схема гидроэлеватора и схема его работы представлены на рис. 4.1.1 и 4.1.2.

В насадке *1* (см. рис. 4.1.1), имеющей коническую форму, происходит формирование рабочей водяной струи. При этом статическое давление воды переходит в кинетическую энергию скоростного напора, т. е. возникает явление, которое и находит объяснение в уравнении Бернулли. Вытекаемой из насадки струей

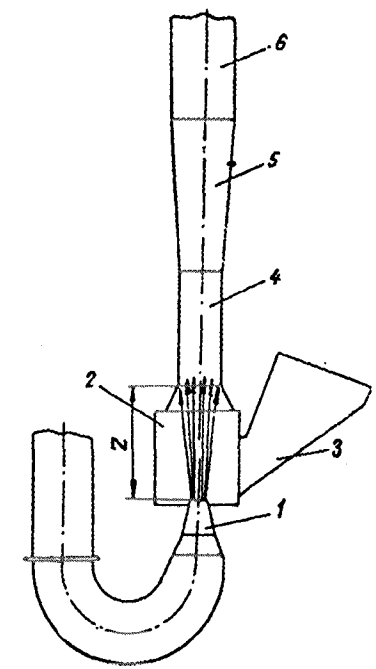


Рис. 4.1.1. *Схема гидроэлеватора:*
1 — насадка; *2* — приемная камера; *3* — бункер; *4* — горловина; *5* — диффузор; *6* — пульповод

воды в приемной камере *2* создается разрежение, с помощью которого пульпа из бункера *3* вовлекается в рабочий струйный поток и направляется в горловину *4*.

У выхода из насадки создается зона наивысшей скорости рабочей струи и соответственно наименьшее давление, которое значительно ниже атмосферного. В связи с этим и происходит засасывание пульпы в приемную камеру.

Для подъема определенного количества пульпы на заданную высоту h в горловине требуется создать необходимую величину кинетической энергии скоростного напора, которая в диффузоре *5* преобразуется в потенциальную энергию и создает в пульповоде *6* давление, достаточное для преодоления сопротивлений.

Для получения таких условий в горловине *4* необходимо создать скорость пульпы $v_г$, которая регулируется изменением диаметров насадки и горловиня.

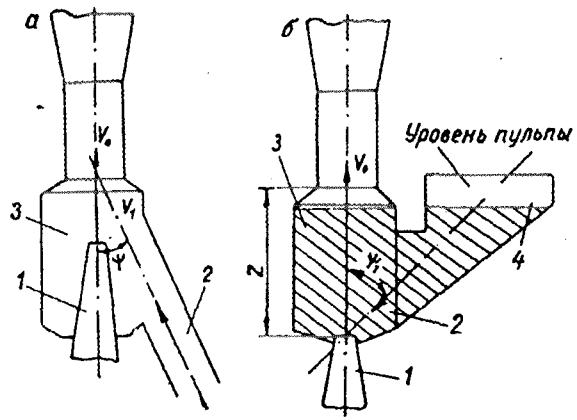


Рис. 4.1.2. *Схема работы гидроэлеватора:*
а — на всасывающем режиме; *б* — под принудительной загрузкой; *1* — насадка; *2* — всасывающее отверстие; *3* — приемно-смесительная камера; *4* — пульпосборник (бункер)

При расположении главной насадки *1* (см. рис. 4.1.2) выше всасывающего отверстия *2* гидроэлеватор работает на всасывающем режиме по принципу смешения двух потоков, движущихся с различными скоростями в одном направлении под углом ψ. В этом случае в приемно-смесительную камеру *3* всасывается количество пульпы, соответствующее производительности гидроэлеватора, чем обеспечивается равномерное смешение двух потоков без заметных нарушений гидродинамического режима при встрече потоков рабочей струи и пульпы. Точнее, происходит саморегулирование количества засасываемой пульпы в зависимости от всасывающей способности гидроэлеватора.

Если же главная насадка расположена ниже всасывающего отверстия *2*, гидроэлеватор работает по принципу гидродинамического удара по теории растекания свободной струи в массе пульпы. Размеры твердых фракций при перекачивании жидкостей или пульпы небольшие.

Принцип работы гидроэлеваторов таков: в начальный момент пульпа движется навстречу рабочей струе под углом ψ, а при заполнении бункера *4* рабочая струя истекает в массу пульпы. Особенностью является также перекачивание твердых фракций размером до 150 мм, встреча которых с рабочей струей приводит к большим гидродинамическим ударам с потерей энергии струи. Кроме того, в бункер и приемно-смесительную камеру *3* порода подается принудительно с помощью бульдозеров и в количествах, превышающих производительность и всасывающую способность гидроэлеватора. При этом часть энергии рабочей струи идет на преодоление инерции твердых материалов.

4.2
Расчет гидроэлеваторных установок

Прежде всего введем понятия «гидроэлеватор *рациональной конструкции*», у которого принят расчетный диа-

метр горловины, и «гидроэлеватор *нерациональной конструкции*», у которого диаметр горловины принят больше расчетной величины из-за необходимости пропуска крупного твердого материала.

При определении скорости потока пульпы в горловине будем различать две скорости: действительную $v_г$ и необходимую v_2.

Одним из важнейших показателей при расчетах гидроэлеваторов является их способность развивать большой напор за диффузором, необходимый для подъема пульпы, содержащей крупные камни, на высоту 20—25 м или для ее транспортирования по пульповоду до 150—200 м.

Таким требованиям отвечает гидроэлеватор, у которого в горловине достигается большая скорость пульпы, поэтому правильное определение величины этой скорости имеет решающее значение при расчетах.

Наиболее точному определению величины скорости пульпы отвечает метод, предложенный Б.Э. Фридманом. Метод основан на взаимосвязи двух скоростей: действительно получаемой скорости $v_г$, зависящей от количества пульпы $Q_п$ и диаметра горловины, и необходимой скорости v_2, связанной с высотой подъёма или с необходимым напором за диффузором. Действительная скорость $v_г$ определяется по первому, основному уравнению гидродинамики, а необходимая скорость v_2 — по скоростному напору из уравнения Бернулли.

Как показали наблюдения, для гидроэлеваторов, работающих под принудительной загрузкой, зависимость этих двух скоростей должна отвечать условию, при котором $v_г \geq v_2$.

При этом гидроэлеваторы развивают нужный напор и устойчивую их работу обеспечивают без опасения закупорки горловины.

При скорости $v_г$ меньше скорости v_2 гидроэлеваторы работают неустойчиво, с малой производительностью, и

это становится особенно заметным, когда в приемную камеру поступает большое количество крупных камней.

Таким образом, для гидроэлеваторов, работающих под принудительной загрузкой,

$$v_г \geq v_2. \qquad (4.2.1)$$

В соответствии с рекомендациями Б.Э. Фридмана из первого, основного уравнения гидродинамики $Q = v_{ср}F = \text{const}$.

Считая, что

$$F = \frac{\pi d_2^2}{4} \text{ и } Q = Q_0 + Q_1,$$

получим действительную скорость $v_г$:

$$v_г = \frac{4(Q_0 + Q_1)}{\pi d_2^2}, \qquad (4.2.2)$$

где Q_0 — количество рабочей воды, выходящей из насадки, м³/с; Q_1 — количество засасываемой пульпы, м³/с; d_2 — диаметр горловины, м.

Необходимая скорость v_2 определяется из формулы Фридмана:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gh_0}{\varphi_{диф}}},$$

где g — ускорение силы тяжести, g = 9,81 м/с²; h_0 — полный напор гидроэлеватора, м; $\varphi_{диф}$ — коэффициент, учитывающий потери в диффузоре, $\varphi_{диф}$ = 0,85—0,95.

Действительная скорость $v_г$ связана с количеством пульпы, проходящей через горловину, и с ее диаметром; необходимая скорость v_2 — с полным напором h_0, развиваемым гидроэлеватором.

Полный напор, развиваемый гидроэлеватором, равен

$$h_0 = h_2 + h_п, \qquad (4.2.3)$$

где h_2 — геодезическая высота подъема пульпы (расстояние от обреза насадки до слива пульповода), м; $h_п$ — сумма гидравлических потерь в нагнетательном пульповоде, м.

Известно, что пульпа образуется из смеси связных пород, поданных бульдозером на решетку бункера, и воды от гидромонитора, установленного для размыва, дезинтеграции и подачи породы в бункер. Количество ее определяется из выражения

$$Q_1 = Q_т + Q_р,$$

где $Q_т$ — количество твердого (песков-торфов) в пульпе, м³/с; $Q_р$ — количество жидкости (воды), расходуемой для разжижения, м³/с.

Как показывают расчеты гидроэлеваторов, у которых пульповод располагается вертикально или под углом 30—60°, при высоте подъема пульпы 18 м или длине пульповода 20 м, при скорости в нем пульпы до 3,6 м/с гидравлические потери напора составляют 1 м, т. е. 5 %. Эта величина потерь может приниматься в расчет. Тогда

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g \cdot 1{,}05 h_2}{\varphi_{диф}}}. \qquad (4.2.4)$$

Скорость истечения струи v_0. При проектировании гидравлических промывочных установок скорость v_0 истечения рабочей струи из насадки определяется по формуле (2.7.5). Нетрудно заметить, что величина v_0 зависит от напора H_0 перед насадкой и не связана со скоростями $v_г$ и v_2; она не дает ответа на вопросы:

а) какую нужно иметь скорость v_0, чтобы в горловине получить скорость $v_г$;

б) какие можно получить скорости $v_г$ и v_2 при определенном значении v_0.

При расчете гидроэлеваторов должны учитываться различные горно-геологические условия, и это требует, чтобы метод расчета отвечал на все вопросы, возникающие при проектировании гидроэлеваторов.

В большинстве своем проектировщикам для расчета задаются диаметр горловины d_2, высота подъема пульпы h_2 и производительность установки. В этом случае скорости $v_г$ и v_2 должны определяться в первую очередь, после чего находится v_0, чтобы при величине $v_г$ получить в горловине нужную скорость v_2.

Для определения коэффициента подсасывания используем формулу, предложенную проф. П.Н. Каменевым:

$$\alpha = \frac{v_0 - v_2}{v_2 - v_1}, \qquad (4.2.5)$$

где v_1 — скорость потока засасываемой пульпы, м/с.

При промывочных работах в силу технологических требований пульпа имеет большое разжижение.

При том, что в наших условиях $v_1 = 0$, из выражения (4.2.5) скорость истечения струи из насадки v_0 для гидроэлеваторов *рациональной* конструкции будет равна

$$v_0 = v_2(\alpha + 1). \qquad (4.2.6)$$

Гидроэлеваторы, применяемые на горных работах, имеют диаметры горловины больше расчетных и относятся к гидроэлеваторам нерациональной конструкции.

Напор у насадки H_0. Для определения величины напора перед насадкой используем уравнение (2.7.5), из которого

$$H_0 = \frac{v_0^2}{\varphi^2 2g}, \qquad (4.2.7)$$

где φ — скоростной коэффициент, $\varphi = 0{,}92—0{,}96$.

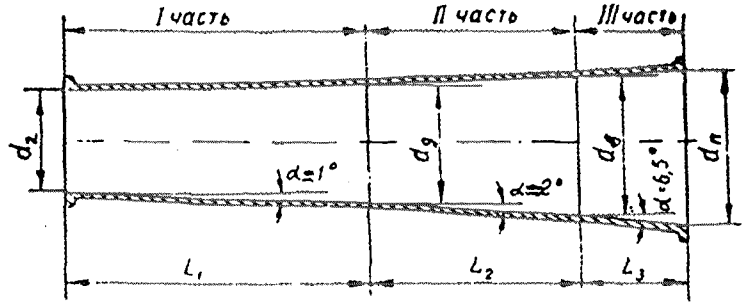


Рис. 4.2.1. *Диффузор гидроэлеватора*

Расчет диффузора. Как известно, выходящий из горловины поток пульпы имеет большую кинетическую энергию напора. Переход кинетической скорости потока в потенциальную энергию давления связан с необходимостью уменьшения скорости потока пульпы, что достигается установкой диффузоров над горловиной.

Равномерное уменьшение скорости пульпы по всей длине диффузора оказывает большое влияние на КПД струйного насоса. Если диффузор изготовлен под одним углом по всей длине, то это является причиной больших потерь напора.

Равномерное уменьшение скорости потока пульпы по всей длине достигается в диффузорах, состоящих из трех частей (рис. 4.2.1).

Каждая часть имеет свой постоянный угол. От входной стороны величина этих углов должна быть: $\alpha_1 = 2°$, $\alpha_2 = 4°$ и $\alpha_3 = 13°$ с выходом к пульповоду. Это позволяет устранить потери напора, увеличить КПД и обеспечить устойчивую работу гидроэлеватора.

Расчет диффузора сводится к определению следующих параметров.

I часть:

а) скорость пульпы в конце I части v_4, м/с,

$$v_4 = v_2 - \frac{v_2 - v_п}{3}, \qquad (4.2.8)$$

где $v_п$ — скорость пульпы в напорном пульповоде, м/с;

б) диаметр диффузора в конце I части $d_д$, м,

$$d_д = \sqrt{\frac{4Q_п}{\pi v_4}}, \qquad (4.2.9)$$

где $Q_п$ — количество пульпы в напорном пульповоде, м³/с;
v_4 — скорость пульпы в конце I части, м/с;

в) длина I части L_1, м,

$$L_1 = \frac{d_д - d_2}{2\,\mathrm{tg}1°}. \qquad (4.2.10)$$

II часть:

а) скорость пульпы в конце II части v_5, м/с,

$$v_5 = v_4 - \frac{v_2 - v_п}{3}; \qquad (4.2.11)$$

б) диаметр диффузора в конце II части $d_в$, м,

$$d_в = \sqrt{\frac{4Q_п}{\pi v_5}}; \qquad (4.2.12)$$

в) длина II части L_2, м,

$$L_2 = \frac{d_в - d_д}{2\,\mathrm{tg}2°}. \qquad (4.2.13)$$

III часть:

длина III части L_3, м,

$$L_3 = \frac{d_п - d_в}{2\,\mathrm{tg}\,6^\circ 30'}, \qquad (4.2.14)$$

где $d_п$ — диаметр пульповода, м.

Общая длина диффузора

$$L = L_1 + L_2 + L_3. \qquad (4.2.15)$$

Высота подъема пульпы h_2. Как было сказано выше, высота подъема пульпы, или полный напор, развиваемый гидроэлеватором за диффузором, зависит от скорости пульпы $v_г$ в горловине гидроэлеватора.

Тогда, зная, что в гидроэлеваторах рациональной конструкции $v_г \geq v_2$, получим для наших условий из выражения (4.2.4)

$$h_2 = \frac{\varphi_{диф} v_н^2}{20{,}6}. \qquad (4.2.16)$$

Для гидроэлеваторов всех конструкций, в том числе и нерациональных, при условии, что $v_г \leq v_2$, необходимая скорость $v_н$ определяется из выражения

$$v_н = \frac{v_2^2}{v_0}(\alpha + 1). \qquad (4.2.17)$$

Подставляя найденное значение $v_н$ в выражение (4.2.16), находим высоту подъема пульпы в зависимости от величин v_2, v_0 и α.

Проходной коэффициент u. Максимальная крупность твердых фракций $d_р$, допускаемая для гидромонитора с диаметром горловины d_2, определяется из условия

$$d_р = \frac{d_2}{u}.$$

Как видно из этого условия,

$$u = \frac{d_2}{d_р}. \qquad (4.2.18)$$

Проходной коэффициент есть величина, определяющая, насколько диаметр горловины может быть больше принимаемой максимальной крупности твердых фракций, которые можно свободно пропускать через горловину без ее закупорки.

С увеличением коэффициента u возрастает расход напорной воды и соответственно увеличивается мощность двигателя насосной установки.

И наоборот, чем больше коэффициент u приближается к единице, тем экономичнее становится гидроэлеваторная установка.

Экспериментальная промывочная установка, гидроэлеватор которой имел горловину диаметром d_2 = 150 мм, была оборудована бункером с решеткой, в которой диаметр отверстий составлял 120 мм.

Контрольной проверкой было определено, что гидроэлеватор свободно может обеспечить производительность по твердому $Q_т$ = 1000 м³ за 20 ч при мощности, потребляемой электродвигателями насосной установки, 140 кВт.

Если для этого случая принять коэффициент u = 1,33, то диаметр горловины d_2 должен быть 1,33·120 = 160 мм, что потребует увеличения расхода напорной воды и, как следствие этого, повышенного удельного расхода электроэнергии.

Как показали наблюдения, на выбор величины коэффициента u оказывают влияние следующие условия:

- расстояние z от обреза насадки до начала горловины. Чем меньше это расстояние, тем больше должно быть значение u;
- величина скорости v_0 истечения рабочей струи из главной насадки. Чем больше скорость v_0, тем меньше значение u;

- способ, применяемый для разделения грунта на решетке бункера гидроэлеватора.

Поскольку в конструкциях применяемых гидроэлеваторов расстояние z принято постоянным: $z \geq 4d_0$, а скорость v_0 получают выше расчетной, то величина принимаемого коэффициента u будет зависеть от способа разделения грунта на грохоте бункера и может быть рекомендована:

а) при вращающихся и вибрационных грохотах и цепных валуноуборщиках — 1,25;

б) при непосредственной подаче грунта на решетку бункера бульдозерами и размыве гидромониторами — 1,30.

Диаметр горловины d_2. Размер диаметра горловины гидроэлеватора может приниматься:

1) в зависимости от крупности транспортируемых твердых фракций, определенных экономической целесообразностью (гидроэлеваторы нерациональной конструкции);

2) в результате расчета (гидроэлеваторы рациональной конструкции).

В первом случае, по условиям, принимают проходной коэффициент u и умножают его на принятый максимальный размер крупных фракций. Полученный таким образом размер диаметра горловины d_2 вводят в расчет и определяют все остальные параметры гидроэлеваторной установки.

Во втором случае, учитывая необходимую производительность установки, определяют наиболее выгодный диаметр горловины и нужные параметры гидроэлеваторной установки.

На гидроэлеваторных промывочных установках, используемых для вскрыши торфов, диаметры горловин принимают в зависимости от крупности твердых фракций.

Во всех случаях максимальный размер крупных твердых фракций, подлежащих перекачиванию гидроэлеватором, должен быть таким, чтобы надрешетный материал было экономически выгодно убирать с грохота бункера существующими способами.

Обычно диаметр горловины d_2 гидроэлеватора принимают несколько больше расчетного размера и определяют из выражения (4.2.2):

$$d_2 = \sqrt{\frac{4(Q_0 + Q_1)}{\pi v_н}}, \qquad (4.2.19)$$

где Q_0 — количество рабочей воды, истекающей из насадки, м³/с; Q_1 — количество засасываемой пульпы, м³/с; $v_н$ — нужная скорость пульпы в горловине (из выражения (4.2.17)), м/с.

Второй способ определения диаметра горловины в зависимости от высоты подъема пульпы и ее количества имеет место при $v_г = v_2$.

Зная, чему равно $v_г$ (4.2.2) и v_2 (4.2.4), когда

$$\frac{4(Q_0 + Q_1)}{\pi d_2^2} = \sqrt{\frac{2g \cdot 1{,}05 h_2}{\varphi_{диф}}},$$

получим

$$d_2 = \sqrt{\frac{2(Q_0 + Q_1)\varphi_{диф}}{1{,}05\pi g h_2}}. \qquad (4.2.20)$$

4.3 Гидроэлеваторы с конической и цилиндрической горловиной

На рис. 4.3.1 показан гидроэлеватор с конической горловиной, состоящий из пульповода *1*, диффузора *2*, собранного из двух частей, конической горловины *3*, вставки *5*, приемно-смесительной камеры *6*, насадки *7* и колена *8*, к которому, как и в описанных конструкциях гидроэлеваторов, подводится напорная вода.

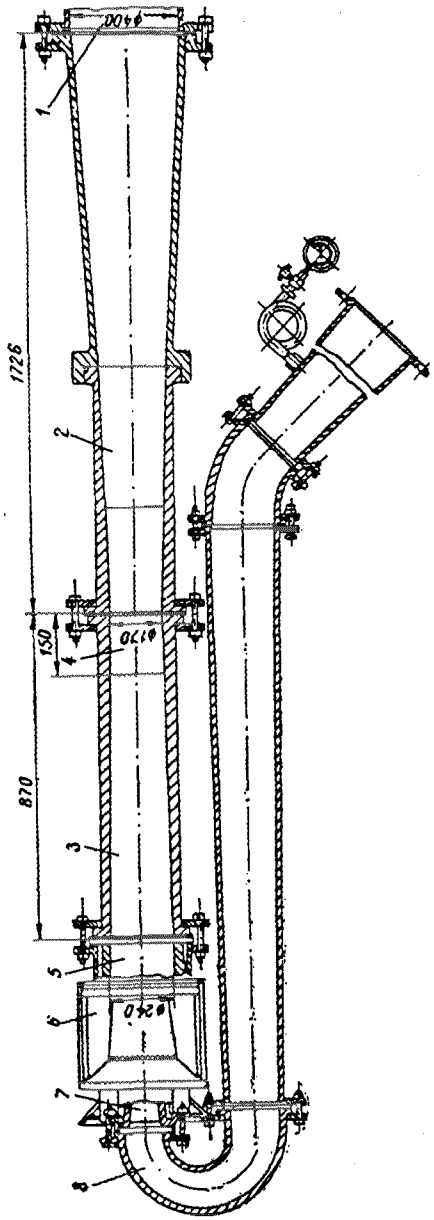


Рис. 4.3.1. *Гидроэлеватор с конической горловиной:*
1 — пульповод; *2* — диффузор; *3* — коническая часть горловины; *4* — цилиндрическая часть горловины; *5* — вставка; *6* — приемно-смесительная камера; *7* — насадка; *8* — колено

В отличие от горловин цилиндрической формы коническая горловина состоит из конической части *3* размером в начале 240 мм с переходом в конце на цилиндрическую часть *4* диаметром 170 мм.

Работа гидроэлеватора с конической горловиной протекает по той же схеме, как и в конструкциях, описанных выше, за исключением процесса формирования потока пульпы в начале и конце горловины.

Практические наблюдения и теоретические исследования говорят о том, что гидроэлеваторы с коническими горловинами, у которых цилиндрическая часть имеет длину не более ее диаметра, не могут применяться на

перекачивании грунтов, содержащих крупнокусковой твердый материал.

Если рассматривать процесс движения твердых крупных фракций в гидроэлеваторах, работающих под принудительной загрузкой, то при смешении рабочего потока воды, истекающей из насадки, с потоком пульпы, поступающей к насадке, мы можем наблюдать явления, которые отсутствуют в гидроэлеваторах, работающих на режиме всасывания. Эти явления коренным образом видоизменяют процесс смешения потоков и оказывают решающее влияние на гидродинамические качества гидроэлеватора.

Рассмотрим эти различия более подробно.

В гидроэлеваторе, работающем по принципу всасывания, в пульповод всасываются камни, крупность которых зависит от величины разрежения, создаваемого гидроэлеватором. Таким образом, крупные камни, для нарушения инерции движения которых требуется большее разрежение, останутся на месте и в гидроэлеватор поступать не будут.

Камни же, всасываемые в гидроэлеватор по пути своего движения во всасывающей системе, приобретут скорость, близкую к скорости всего всасывающего потока v_1. При встрече в приемно-смесительной камере с рабочей струей воды, истекающей из насадки, всасываемый поток пульпы будет смешиваться с меньшими потерями энергии рабочей струи воды, чем это имеет место в гидроэлеваторах, работающих по принципу принудительной загрузки.

Это обстоятельство объясняется:

- отсутствием во всасываемом потоке пульпы камней больших размеров;
- приобретенной засосанными камнями скоростью v_1 перед их встречей с рабочей струей.

В гидроэлеваторах с принудительной загрузкой в приемно-смесительную камеру, как было сказано выше, по-

ступает количество пульпы, превышающее всасывающую способность гидроэлеватора. При подходе к рабочей струе воды, истекающей из насадки, поток пульпы имеет направление движения, противоположное направлению рабочей струи. Эти условия вызывают бо́льшие потери энергии струи рабочей воды, истекающей из насадки.

Рассматривая особенности гидроэлеваторов, работающих под принудительной загрузкой, применительно к гидроэлеваторам с коническими горловинами, найдем объяснение причин их низкого КПД по сравнению с гидроэлеваторами с цилиндрическими горловинами.

Исследуем гидродинамический процесс работы гидроэлеватора с цилиндрической горловиной.

При правильно настроенном и работающем гидроэлеваторе с цилиндрической горловиной, когда происходит равномерная загрузка грунтом, по наклонному днищу *1* (рис. 4.3.2) приемного бункера *2* к насадке *5* поступает поток пульпы, состоящий из двух слоев: жидкого *3* (смесь разжиженного грунта и воды) и слоя камней *4*.

Жидкий слой движется к насадке *5* со скоростью, значительно большей, чем слой камней *4*, который испытывает сопротивление своему движению от трения о стенки днища *1* и подпора лежащих перед насадкой камней *9*.

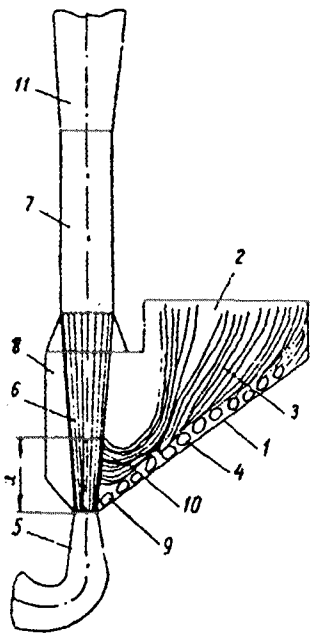


Рис. 4.3.2. *Схема пульпообразования в гидроэлеваторе с цилиндрической горловиной:*
1 — наклонное днище; *2* — приемный бункер; *3* — жидкий слой; *4* — слой камней; *5* — насадка; *6* — струя рабочей воды; *7* — горловина; *8* — приемно-смесительная камера; *9* — камень перед насадкой; *10* — закругление потока; *11* — диффузор

Жидкий слой *3* при встрече со струей воды *6*, истекающей из насадки *5*, смешивается и изменяет направление своего движения к насадке в виде закруглений *10*, располагающихся от насадки на расстоянии *x*, величина которого зависит от степени разрежения перед насадкой.

Камни *4* перемещаются к насадке *5* последовательно друг за другом в несколько рядов по мере того, как находящиеся у насадки камни вовлекаются в струйный поток и далее выбрасываются в горловину *7*.

В первый момент, когда камни *9* выводятся из состояния инерции и захватываются струей, они имеют минимальную скорость. Затем она возрастает.

Поскольку в приемно-смесительной камере *8* создано разрежение, то камень *9*, подхваченный струей воды *6*, разгоняется до скорости, которую имеет смешивающийся поток пульпы на подходе к горловине. Обладая массой большей, чем масса потока жидкости, камень до некоторого момента движется в потоке жидкости с большей скоростью, вызывая вихреобразование.

Как известно из гидравлики, «величина сопротивления движению твердого тела (камня) в потоке жидкости обусловливается разностью давлений на передней и задней поверхностях тела при обтекании (сопротивление давления) и трением между телом и жидкостью (сопротивление трения)».

На величину сопротивления движению камня оказывает решающее значение его форма. При движении твердых тел, имеющих неправильную форму и шероховатую поверхность, возникают большие разности давлений впереди и сзади; равнодействующая сила этой разности есть величина силы сопротивления движению тела в потоке жидкости.

При транспортировании гидроэлеватором горных пород, состоящих из камней неопределенной формы и имеющих сильную шероховатость, в потоке пульпы до момента выравнивания скоростей жидкости и камней будет

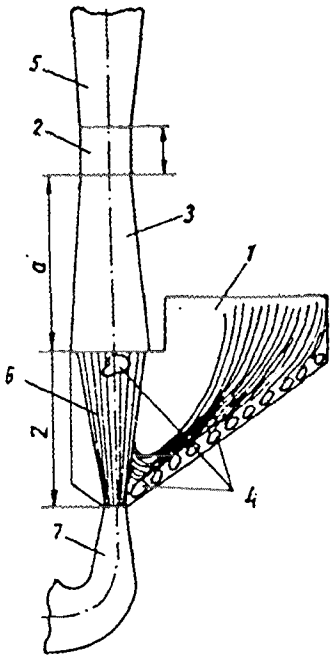


Рис. 4.3.3. *Схема пульпообразования в гидроэлеваторе с конической горловиной:*
1 — приемный бункер; *2* — цилиндрическая часть горловины; *3* — коническая часть горловины; *4* — камень; *5* — диффузор; *6* — рабочая струя воды; *7* — насадка

иметь место сильное вихреобразование вне зависимости, с большей или меньшей скоростью передвигается камень относительно потока жидкости.

В связи с этим длина цилиндрической горловины *7* должна быть такой, чтобы имелась возможность выравнить скорости движения камней и жидкости и получить их минимальную разность, исключив тем самым вихреобразование при входе потока пульпы в диффузор.

Рассмотрим процесс пульпообразования в гидроэлеваторе с конической горловиной (рис. 4.3.3).

Камень *4* по наклонному днищу приемного бункера *1* перемещается к насадке *7* и, подхваченный вытекающей из нее рабочей струей воды *6*, выбрасывается в коническую часть *3* горловины.

На расстоянии *z* скорость камня нарастает от нуля до скорости смешивающегося потока пульпы и воды, и так же, как в гидроэлеваторе с цилиндрической горловиной, его скорость в конической части *3* будет переменной.

Таким образом, равномерное установившееся движение потока жидкости возможно в трубопроводах, имеющих постоянное живое сечение, и всякое изменение этого сечения вызовет изменение скорости движения потока.

Из этого следует, что скорости потока жидкости и камней на длине *a* конической части *3* горловины беспрерывно изменяются из-за сужения горловины и поэтому условия для выравнивания скоростей будут значительно хуже, чем при движении по цилиндрическому участку. Цилиндрическая часть *2* горловины очень короткая и даже (в большинстве случаев) меньше размера проходящих через нее камней, поэтому длина этого участка для выравнивания скоростей недостаточна. При таком положении поток жидкости и камней войдет в начальную часть диффузора *5* с разными скоростями, сопровождаемый вихреобразованием, нарушая равномерность снижения скоростей в диффузоре и, как следствие этого, уменьшая его КПД.

Невозможность выравнить скорости движения жидкости и камней в конических горловинах приводит к тому, что КПД таких гидроэлеваторов на 30—60 % меньше, чем гидроэлеваторов с цилиндрическими горловинами.

Длину цилиндрической горловины гидроэлеватора $L_г$ следует принимать в пределах от 6 до 7 d_2.

4.4 Гидромониторы

Гидромонитором называется аппарат, предназначенный для создания управляемой плотно летящей струи воды, истекающей с большой скоростью из насадки, динамическая сила которой используется для отбойки, размыва и перемещения горных пород.

Гидравлический способ отбойки есть отделение части горных пород от массива посредством струи воды, истекающей с большой скоростью из насадки гидромонитора.

Сущность этого способа заключается в том, что поток воды из водовода под напором поступает в гидромонитор, где преобразуется в компактную струю и направляется на забой. Струя воды разрушает горные породы и, смешиваясь с ними, образует пульпу.

Работоспособность (эффективность) струи воды на отбойке горных пород находится в зависимости от ее энергетических параметров: скорости истечения из насадки и динамического напора.

Гидромониторы используются:

- на отбойке и перемещении горных пород при промывочных и вскрышных работах;
- на перемещении разрушенных с помощью землеройных машин горных пород по забою на понурно-шлюзовые обогатительные установки;
- на дезинтеграции, грохочении и уборке надрешетного материала с бункеров гидроэлеваторных установок при промывочных и вскрышных работах;
- на уборке хвостов от промывочных установок.

Целым рядом исследований установлено, что расход напорной воды на размыв и транспортировку до бункера 1 м³ песков струей гидромонитора составляет от 50 до 85 м³ и зависит от их плотности, условий залегания и систем разработки.

Из всех операций, выполняемых гидромониторами, наиболее энергоемкой является отбойка, на которую расходуется 80—90 % от всего количества напорной воды и 8—12 кВт·ч электроэнергии, в то время как на перемещение 1 м³ предварительно разрушенных пород эти затраты находятся в пределах 1—3 кВт·ч.

В связи с этим расширение области применения гидромониторов связано с уменьшением удельного расхода напорной воды в общем комплексе горных работ.

Как показала практика, решения этой задачи можно достигнуть путем исключения из комплекса работ, производимых гидромонитором, наиболее энергоемкой операции отбойки и выполнения ее бульдозерами.

Если провести подсчет затрат энергии бульдозера на предварительное рыхление 1 м³ горных пород, то они будут составлять 0,75—1,5 кВт·ч, а на весь цикл с учетом выполнения остальных операций гидромонитором эти затраты находятся в пределах 1,75—4,5 кВт·ч, между тем как цикл этих работ, выполняемых только гидромонитором, составляет 9—15 кВт·ч.

Таким образом, при определенных условиях комбинированный бульдозерно-гидромониторный способ разработки горных пород является экономически очень выгодным и заслуживает широкого применения.

Гидромонитор ГМН-250С (рис. 4.4.1) состоит из нижнего колена *4*, шарнира горизонтального поворота *3*, верхнего колена *1* с шаровым шарниром, вертикального подъема *2*, ствола *6* и сменной насадки *7*, которая крепится к стволу накидной гайкой.

Из верхней части нижнего колена, имеющего входное отверстие диаметром 250 мм, устанавливается стакан, который обхватывает шарнир *3* горизонтального поворота. Шарнир *3* дает возможность поворачивать верхнее коле-

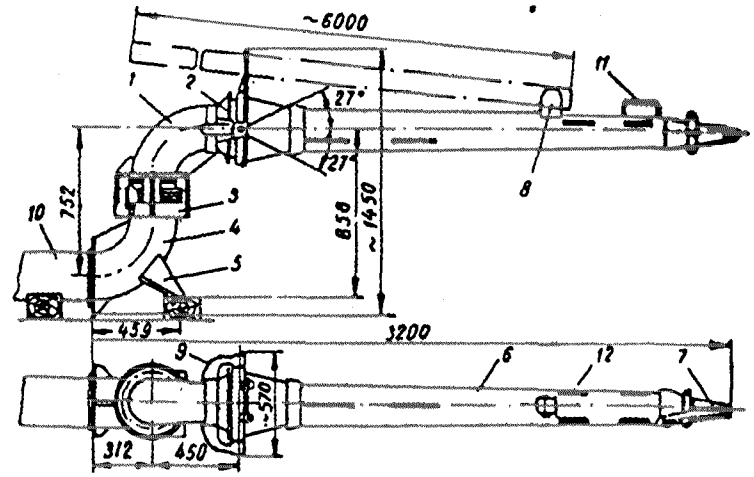


Рис. 4.4.1. *Общий вид гидромонитора ГМН-250С:*

1 — верхнее колено; *2* — шаровой шарнир; *3* — шарнир горизонтального поворота; *4* — нижнее колено; *5* — опорный кронштейн; *6* — ствол; *7* — сменная насадка; *8* — водило; *9* — кронштейн; *10* — напорный водопровод; *11* — рукоятка; *12* — лопатка успокоителя

но *1* со стволом *6* на 360°. Шарниры горизонтального поворота *3* и вертикального подъема *2* имеют сальниковые уплотнения.

Конический ствол *6* служит для сужения потока напорной воды, которая истекает в виде компактной струи из насадки *7*.

Усилие от ствола *6* передается верхнему колену *1* через кронштейн *9*. На стволе устанавливаются лопатки *12* успокоителя.

Управление стволом гидромонитора осуществляется вручную водилом *8* (труба и брус) длиной от 4 до 6 м, являющимся одновременно противовесом, либо рукояткой *11*, расположенной на конце ствола *6* у насадки *7*. Гидромонитор в сборе присоединяется фланцем нижнего колена *4* к напорному водоводу *10* посредством болтов М20. Между фланцем гидромонитора и водоводом ставится уплотнительная прокладка. Для устойчивости гидромонитора при работе опорный кронштейн *5* нижнего колена *4* прикрепляется к деревянному брусу или легким полозьям.

Техническая характеристика гидромонитора ГМН-250С

Рабочее давление	15 атм
Управление	ручное
Угол поворота в горизонтальной плоскости	360°
Угол вертикального поворота:	
вверх	27°
вниз	27°
Диаметр сменных насадок	35, 40, 50, 70, 90, 100 мм
Вес с насадкой диаметром 70 мм	196 кг
Длина	3200 мм
Ширина	570 мм
Высота	1460 мм

4.5
Гидроэлеваторные приборы

Гидроэлеваторные промывочные приборы компонуются из отдельных агрегатов, которые все вместе образуют промывочный комплекс, транспортирующим устройством в нем является гидроэлеватор.

В промывочный комплекс входят переставной гидроэлеватор с пульповодом длиной до 24 м, обогатительный агрегат (шлюз или шлюзы в комплексе с барабанным грохотом), загрузочное устройство — бункер с гидровашгердом, насосный агрегат, головной гидромонитор, водовод длиной до 100 м, а для промывочных приборов марки ПГБ — агрегат гидроэлеваторный эфельный АГЭ и стакер галечный поворотно-звеньевой марки СПОЗ.

Промывочный прибор ПГШ-III-30 (рис. 4.5.1). Состоит из гидроэлеватора *2* с горловиной диаметром 140 или 150 мм с загрузочным бункером *1* и лотком гидровашгерда *4*, пульповода *3* диаметром 250 мм, обогатительного агрегата — шлюза глубокого наполнения, состоящего из головной секции *5*, первой линейной секции *6* и трех линейных секций *7* с концевой приставкой *8* для спуска шлихов.

Передвижной насосный агрегат *9* с двумя насосами 8НДВ с дизельным приводом или электроприводом устанавливается у зумфа, и напорная вода по водоводу *16* подается к крестовине *15*, в которой она разделяется на два потока. Один поток по водоводу *10* диаметром 200 мм подается в гидроэлеватор *2*, другой поток по водоводу *11* диаметром 150 мм — к головному гидромонитору *17*. Для регулирования количества воды, поступающей в гидроэлеватор и гидромонитор, установлены две задвижки: *13* — 150 мм и *14* — 250 мм.

Промывочный прибор ПГШ-II-50 (рис. 4.5.2). Состоит из гидроэлеватора *2* с горловиной диаметром 170 мм с загрузочным бункером *1* и лотком гидровашгерда *4*, пуль-

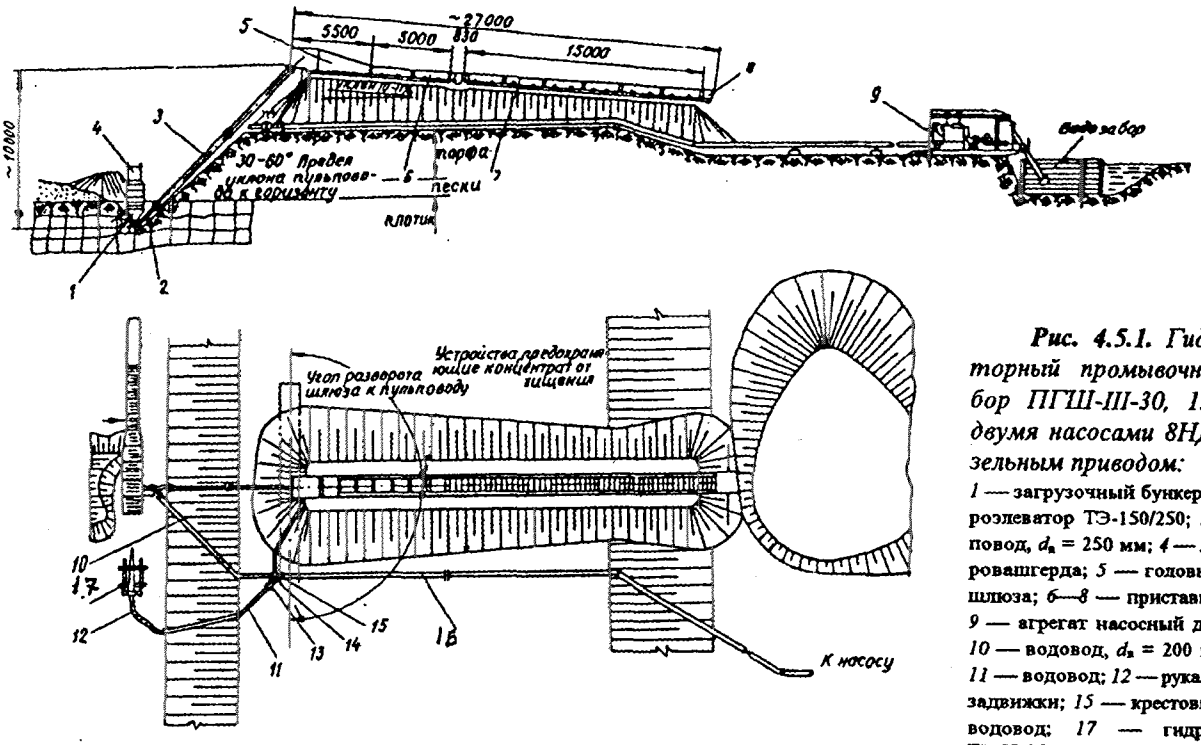


Рис. 4.5.1. *Гидроэлеваторный промывочный прибор ПГШ-III-30, 150/250 с двумя насосами 8НДВ с дизельным приводом:*

1 — загрузочный бункер; *2* — гидроэлеватор ТЭ-150/250; *3* — пульповод, $d_в$ = 250 мм; *4* — лоток гидровашгерда; *5* — головная секция шлюза; *6—8* — приставки шлюза; *9* — агрегат насосный дизельный; *10* — водовод, $d_в$ = 200 мм (10 м); *11* — водовод; *12* — рукав; *13, 14* — задвижки; *15* — крестовина; *16* — водовод; *17* — гидромонитор ГМН-250

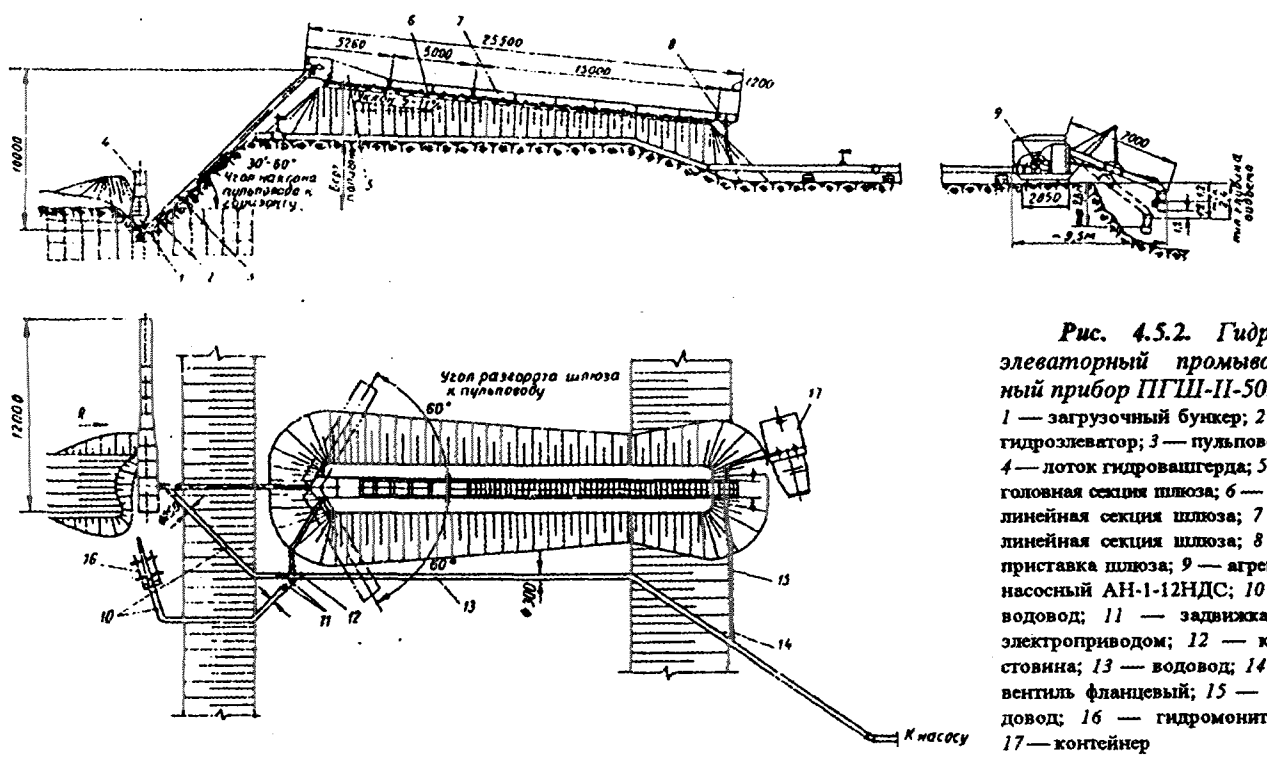


Рис. 4.5.2. *Гидроэлеваторный промывочный прибор ПГШ-II-50:*

1 — загрузочный бункер; *2* — гидроэлеватор; *3* — пульповод; *4* — лоток гидровашгерда; *5* — головная секция шлюза; *6* — 1-я линейная секция шлюза; *7* — линейная секция шлюза; *8* — приставка шлюза; *9* — агрегат насосный АН-1-12НДС; *10* — водовод; *11* — задвижка с электроприводом; *12* — крестовина; *13* — водовод; *14* — вентиль фланцевый; *15* — водовод; *16* — гидромонитор; *17* — контейнер

повода *3* диаметром 350 мм, обогатительного агрегата — шлюза глубокого наполнения, состоящего из головной секции *5*, первой линейной секции *6* и трех линейных секций с концевой приставкой *8* для спуска шлихов.

Передвижной насосный агрегат *9* с приводом от электродвигателя устанавливается у водозабора, и напорная вода по водоводу *13* подается к крестовине *12*, в которой она разделяется на два потока по водоводам *10* — к гидроэлеватору и гидромонитору через регулирующие задвижки *11* диаметром 250 мм.

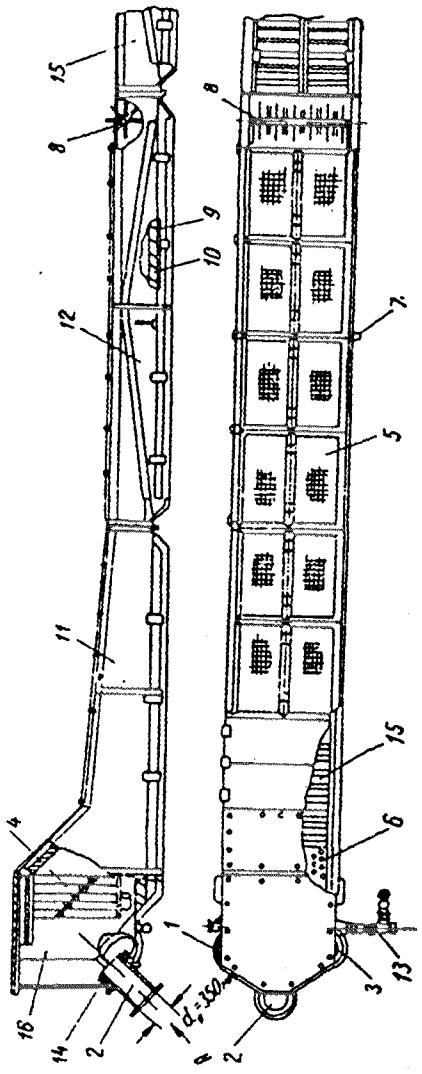


Рис. 4.5.3. *Шлюз гидроэлеваторный ШГ-11-1000:*
1 — входное отверстие левое; *2* — пульповод; *3* — входное отверстие правое; *4* — защитное устройство; *5* — сетка; *6* — грохот; *7* — замок; *8* — вертушка; *9* — коврик; *10* — трафарет; *11* — головная секция; *12* — первая линейная секция; *13* — водовод; *14* — сальник; *15* — линейная секция; *16* — приемная часть головной секции

Промывочный прибор ПГШ-II-75 имеет те же агрегаты, что и прибор ПГШ-II-50, и отличается от него в зависимости от крупности транспортируемых камней диаметром горловины, которая в этом типоразмере может быть как 170, так и 190 мм, диаметром водовода, увеличенным до 400 мм, и повышенной мощностью электродвигателя, обеспечивающего подачу тем же насосом 12НДС большего количества напорной воды.

Шлюз ШГ-II-1000. Гидроэлеваторные промывочные приборы ПГШ для улавливания золота комплектуются обогатительными устройствами, представляющими собой шлюзы глубокого наполнения, приспособленные для работы на крупном материале (до 150 мм) при больших скоростях.

На рис. 4.5.3 показан шлюз марки ШГ-II-1000, входящий в комплект промывочных приборов марок ПГШ-II-50 и ПГШ-II-75.

Техническая характеристика шлюза ПГШ-II-1000

Ширина	1000 мм
Высота	1500 мм
Длина	25 500 мм
Улавливающая площадь	25,0 м²
Промывающий пульповод	350 мм
Конструкция	разборно-секционная

Шлюз состоит из головной секции *11*, первой линейной секции *12*, трех линейных секций *15* и вертушки *8*.

В головной секции устроена приемная часть *16*, в которой имеется защитное устройство *4*, состоящее из целого ряда колосников горизонтального и вертикального расположения, изготовленных из износоустойчивых сталей и предназначенных для гашения потока пульпы и защиты приемной части от износа.

Бункер и шлюз по условиям горных работ могут располагаться относительно друг друга в разных положениях.

В приемной части головной схемы устроен трехсторонний подвод пульпы: через левое входное отверстие *1*, через правое входное отверстие *3* и через центральное входное отверстие, как показано на рис. 4.5.3, где встроен пульповод *2*, соединяющийся с входным центральным отверстием через подвижной сальник *14*, с помощью которого компенсируется изменение расстояния между шлюзом и бункером по сравнению с первоначальным положением.

Первая линейная секция отличается от остальных линейных секций своим особым конструктивным устройством, заключающимся в следующем: поверхность секции *12* закрыта специальными защитными сетками *5*, а в конце секции устроена вертушка *8*, изолирующая головную *11* и первую линейную *12* секции от свободного доступа в их внутреннее пространство.

Сетки *5* располагаются вдоль первой линейной секции и замыкаются специальным устройством, которое запирается замком.

Линейные секции *15* по своей конструкции и размерам такие же, как и первая линейная секция *12*, только в них отсутствуют защитные сетки *5*, вертушка *8* и запорное приспособление с замком *7*.

Для улавливания золота все секции шлюза армированы специальным застилом, состоящим из трафаретов *10* и резиновых ковриков *9*.

В приемной части головной секции уложен грохот *6*, где происходит улавливание золота.

Для производства съемки, когда требуется незначительное количество воды, с помощью вспомогательного насоса через водовод *13* в шлюз подается вода. В большинстве случаев выделение чистого золота из концентрата, снятого со шлюзов, производится на приисковых обогатительных фабриках. В этом случае обогащенный концентрат снимается со шлюзов без отделения золота непосредственно на приборе и доставляется на обогатительную фабрику двумя способами: автоконтейнерами, когда

концентрат через вертушку *8* смывается со шлюза в автоконтейнер, или в ручных контейнерах.

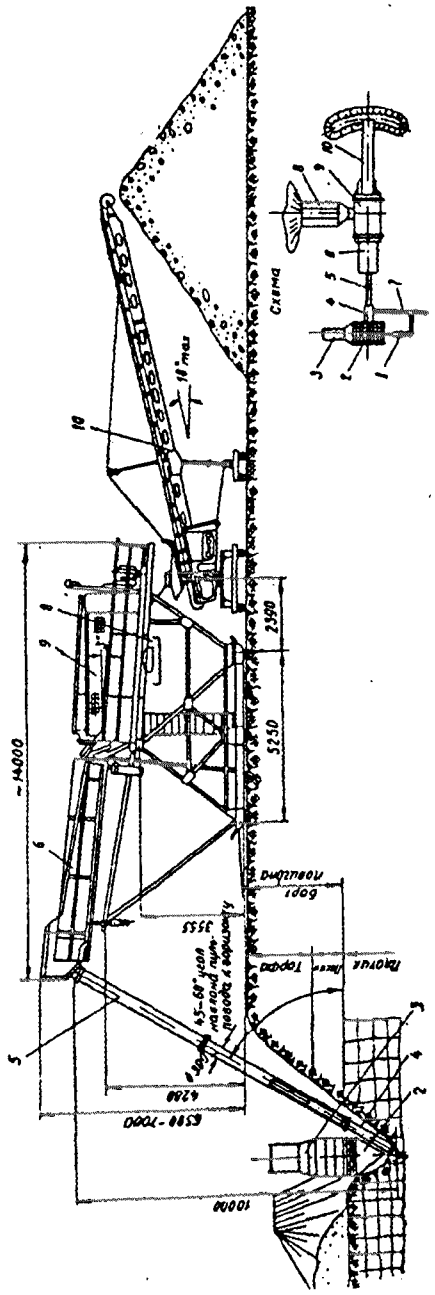
Работа промывочного прибора ПГШ-II-50 (см. рис. 4.5.2). Насосным агрегатом *9* напорная вода по водоводу *13* подается к крестовине *12*, где она распределяется на два потока: один по водоводу *10* направляется на гидроэлеватор *2*, а другой по водоводу *10* — на гидромонитор *16*. Поступившая в гидроэлеватор напорная вода, истекая из насадки, создает в приемной камере разрежение и при наличии в бункере *1* пульпы засасывает ее и по пульповоду *3* поднимает в приемную часть головной секции *5* шлюза.

Напорная вода, поступившая в гидромонитор *16*, вылетая из насадки, образует компактную струю, с помощью которой производится размыв песков на размывном листе и удаление надрешетного материала по лотку гидровашгерда *4* в хвосты. Регулирование количества напорной воды, необходимой для работы гидроэлеватора и гидромонитора, производится с помощью задвижек *11*.

Бульдозером пески по направлению стрелки *А* подаются на размывной лист гидровашгерда и струей гидромонитора размываются. Образовавшаяся гидросмесь перемещается на ограничительную решетку загрузочного бункера.

На решетке бункера струей гидромонитора *16* гидросмесь разделяется на две части: на надрешетный материал, который по лотку *4* удаляется в хвосты гидровашгерда, и на подрешетный материал — пульпу, содержащую золото, — который проваливается вниз. Пульпа поступает в приемную камеру и гидроэлеватором по пульповоду *3* подается в приемную часть головной секции шлюза *5* и далее самотеком перемещается по наклонно установленным шлюзам. При этом золото осаждается на застил шлюзов *5*, *6* и *7*, а пустые породы сбрасываются в хвосты.

При контейнерной съемке золота концентрат со шлюзов *5*, *6* и *7* перемещают в бункер приставки шлюза *8*, из которого после открытия вентиля *14* водой, подаваемой



по водоводу *15*, он транспортируется в автоконтейнер и далее — на обогатительную фабрику.

Таким же образом происходит работа и в гидроэлеваторных промывочных приборах ПГШ-III-30 и ПГШ-II-75.

Промывочный прибор ПГБ-I-1000 (рис. 4.5.4). Обогатительные агрегаты в виде разносного шлюза глубокого наполнения, которыми оснащены промывочные приборы ПГШ, имеют два крупных недостатка. Во-первых, повышенный снос мелкого золота и, во-вторых, большой выход сильно обводненных хвостов, содержащих крупные твердые фракции (до 150 мм), требующие их уборки от слива шлюзов с помощью бульдозеров.

Рис. 4.5.4. *Гидроэлеваторный промывочный прибор ПГБ-1-1000:*

1 — головной гидромонитор; *2* — загрузочный бункер; *3* — гидровашгерд; *4* — гидроэлеватор; *5* — пульповод; *6* — головной шлюз бочечного агрегата; *7* — водовод; *8* — шлюзы малого наполнения; *9* — барабанный грохот бочечного агрегата; *10* — галечный стакер

Результаты эксплуатации приборов ПГБ показали их несомненное преимущество перед приборами ПГШ.

В приборе ПГБ-I-1000 пульпа образуется и транспортируется в обогатительный агрегат по такому же принципу, как и в приборе ПГШ: через посредство загрузочного бункера *2*, гидроэлеватора *4* с пульповодом *5*, гидровашгерда *3* и головного монитора *1*. Пульпа, поднятая гидровашгердом *3*, поступает в короткий головной шлюз *6* и далее в барабанный грохот *9*, имеющий перфорацию 25 мм.

Подрешетный материал барабанного грохота направляется в многосекционные шлюзы малого наполнения, а надрешетный (+25 мм) отбрасывается на галечный стакер и убирается им в отвал. Такая схема обогащения позволяет резко уменьшить скорость и глубину потока на шлюзе, что необходимо для улавливания мелкого золота, и одновременно устраняет второй недостаток, присущий приборам ПГШ: позволяет выделить основную часть хвостов в обезвоженном виде и убирать их в отвал ленточным стакером без применения бульдозеров.

Очень важным элементом в конструкции прибора ПГБ является гидроэлеваторный эфельный агрегат АГЭ, предназначенный для уборки хвостов от слива шлюзов малого наполнения. Агрегат состоит из бункера, малогабаритного гидроэлеватора с диаметром горловины 120 мм и пульповода диаметром 200 мм.

Заслуживает внимания способ установки хвостового гидроэлеватора в комплекте со шлюзом малого наполнения. В этом случае обогащенная пульпа с фракциями, крупность которых меньше отверстий перфорации бочки, поступает в шлюзы малого наполнения и далее на слив в бункер хвостового гидроэлеватора. Излишняя вода сливается из бункера, а твердые фракции гидроэлеватором по пульповоду перекачиваются в отвал.

Практика показала целесообразность внедрения хвостового гидроэлеватора с учетом использования напорной воды для его работы. При установке хвостового гид-

роэлеватора нет необходимости поднимать пульпу на максимальную высоту, соответствующую мощности гидроэлеватора. Высоту можно уменьшить до такой величины, при которой будет возможность установить на сливе шлюзов хвостовой гидроэлеватор и уборку хвостов производить с самого начала работы прибора. Тогда за счет уменьшения высоты подъема пульпы образовавшийся резерв мощности гидроэлеватора будет гарантировать нормальную работу всей установки. Недостатки прибора:

- ограничена высота подъема пульпы;
- как и в ПГШ, трудно убрать надрешетный материал с бункера;
- увеличена энергоемкость установки и удельного расхода энергии. Данное обстоятельство объясняется дополнительным расходом напорной воды на работу хвостового струйного насоса на уборке хвостов и на работу электродвигателей бочки и стакера.

Обе марки (ПГШ и ПГБ) имеют существенные недостатки.

1. Необходимость транспортирования через всю технологическую цепь крупных твердых фракций, которые экономически целесообразно отбросить на бункере. Перекачка крупных фракций требует большого расхода электроэнергии.

Обратимся к примеру. Установка ПГБ промыла 100 тыс. м³ песков с удельным расходом электроэнергии 4 кВт/м³. Из 100 тыс. м³ песков, переработанных гидроэлеватором, пустая порода, отброшенная грохотом *9* и выложенная в отвал стакером *10*, составляет 45 %, или 45 тыс. м³. Общие затраты электроэнергии на транспортировку пустой породы будут составлять 180 тыс. кВт·ч, т. е. 45 % от общего расхода электроэнергии.

В приборах ПГШ эти объемы пустой породы убираются от слива шлюза бульдозерами, что неэкономично.

2. Наличие в технологической цепи головного монитора *1*, которому для уборки надрешетного материала требуется от 100 до 250 м³/ч воды и до 70 кВт мощности насосной установки. При этом гидроэлеватор перекачивает воду из бункера в шлюз, а это снижает КПД установки.

Когда головной монитор убирает надрешетный материал, гидроэлеватор работает вхолостую. Технологический режим на шлюзе нарушается.

Зачастую вместе с мелкими фракциями в хвосты вашгерда сбрасывается золото.

Результаты эксплуатации этих установок настоятельно диктуют необходимость механизации уборки надрешетных фракций с помощью специальной машины.

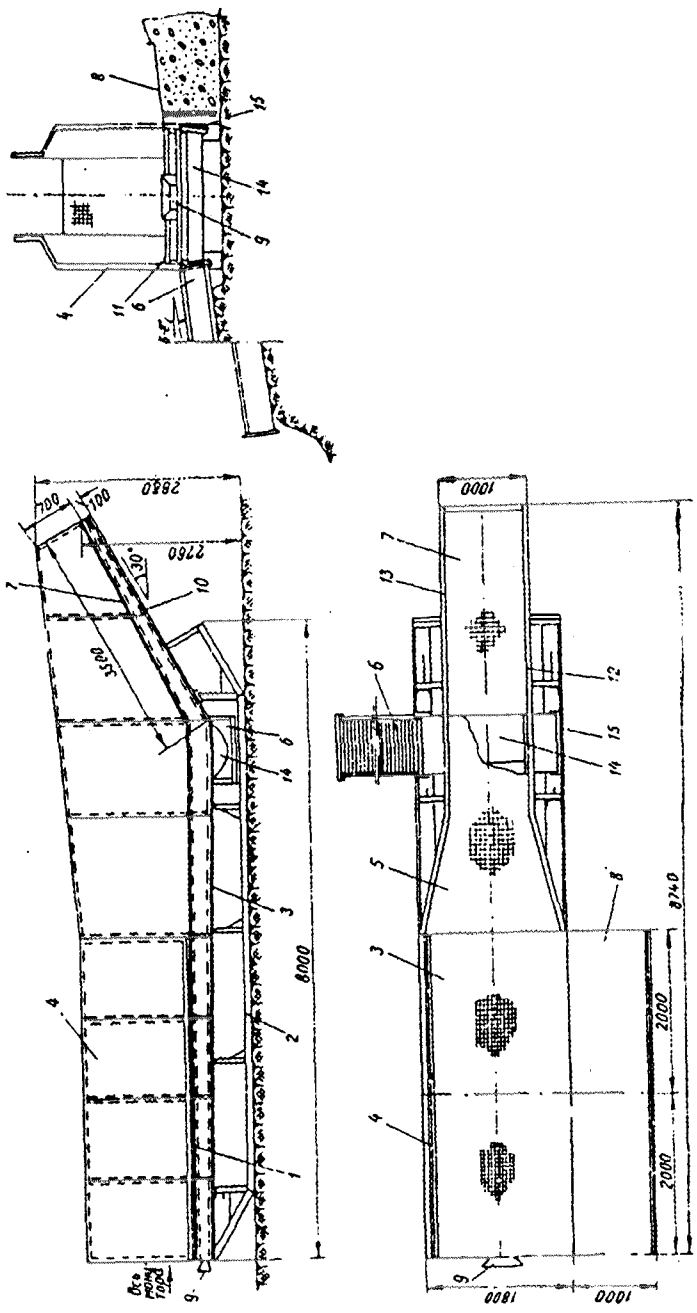
4.6 Передвижная гидромониторная промывочная установка (ПГПУ)

Передвижная гидромониторная промывочная установка состоит из промывочного агрегата (рис. 4.6.1), представляющего собой гидровашгерд специальной конструкции со встроенным в него обогатительным шлюзом, гидромонитора ГМН-250 и насосного агрегата с одним насосом 8НДВ с дизельным или электрическим приводом.

Установка предназначена для использования на старательских и геологоразведочных работах, а также на промывке разбросанных контуров, отдельных целиков песков и недоработок.

Компактность промывочного агрегата позволяет при минимальных затратах производить его перестановку и приспосабливать к различным горно-геологическим условиям, а габаритные размеры и вес позволяют осуществлять перевозку на обычном автомобиле с полуприцепом.

Промывочный агрегат состоит из основной ограничительной решетки *1*, переходной ограничительной решетки *5*, расположенных над днищем *3*. Они замыкаются под углом 30° наклонными решеткой *7* и днищем *10*.



Днище *3* имеет некоторый уклон в сторону шлюза *6* для обеспечения самотечного перемещения пульпы. Для предохранения от разбрасывания песков струей монитора по сторонам ограничительная решетка *3* защищена боковой стенкой *4*, а решетки *5* и *7* — правым и левым бортами *12* и *13*. Боковая стенка крепится на раме с помощью связного угольника *11*.

На переломе горизонтального *3* и наклонного *10* днищ устроено окно для слива пульпы в лоток *14*, соединенный со шлюзом *6*. Конструкция лотка *14* позволяет устанавливать шлюз с любой из его сторон, тогда свободная сторона лотка закрывается крышкой *15*. Вся металлоконструкция смонтирована на раме с полозьями *2*, на которых промывочный агрегат перемещается с помощью трактора.

Гидромонитор устанавливается так же, как и на гидровашгерде БГ-II-1200.

Установка работает следующим образом.

Пески бульдозером подаются на размывной лист *8*, где они с помощью струи гидромонитора размываются, и образовавшаяся гидросмесь перемещается на основную ограничительную решетку *1*. Поступившие на ограничительную решетку пески струей гидромонитора подвергаются дезинтеграции и грохочению. Надрешетный материал перемещается по решеткам в отвал.

По пути перемещения надрешетного материала и особенно в момент подъема на участке перелома решеток с помощью струи гидромонитора происходят дополнительные дезинтеграция и грохочение, при которых оставшиеся минусовые твердые фракции отделяются от надрешетного материала.

Рис. 4.6.1. *Передвижной агрегат гидромониторной промывочной установки (ПГПУ):*

1 — основная ограничительная решетка; *2* — полозья; *3* — днище; *4* — боковая стенка; *5* — переходная ограничительная решетка; *6* — шлюз; *7* — наклонная решетка; *8* — размывной лист; *9* — окно; *10* — наклонное днище; *11* — связной угольник; *12* — правый борт; *13* — левый борт; *14* — лоток; *15* — крышка

Вторая часть песков, подрешетный минусовой материал с золотом и водой проваливаются вниз на днища *3* и *10*, образуя поток пульпы, которая стекает через лоток *14* в шлюз *6*, где происходит улавливание золота.

Оседающий на днище *3* подрешетный материал с золотом через окно *9* с помощью струи воды от гидромонитора перемещается в лоток *14*.

Большая площадь ограничительных решеток и длинный путь перемещения по ним надрешетного материала позволяют получить высокое извлечение.

Напорная вода для работы гидромонитора подается от насосного агрегата насосом 8НДВ, для которого первичным двигателем может быть дизель, а также электродвигатель мощностью 75 кВт.

Промывочный комплекс имеет небольшой вес, низкий удельный расход электроэнергии (3,2—2,5 кВт·ч/м^3), для него характерны незначительные затраты на монтаж и демонтаж.

Все вышесказанное позволяет широко применять данное промывочное устройство на старательских и геологоразведочных работах.

Глава 5

ИГЛОВАЯ ГИДРООТТАЙКА МЕРЗЛЫХ ЗОЛОТОНОСНЫХ ПОРОД

5.1. МЕХАНИЗМ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГИДРООТТАЙКИ

5.2. ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ГИДРООТТАИВАНИИ

5.3. РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОТТАЙКИ ПРИ РАБОТЕ ОДИНОЧНОЙ ГИДРОИГЛЫ

5.4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ ИГЛОВОЙ ГИДРООТТАЙКИ

Глава 5 написана автором совместно с доц., канд. техн. наук А.В. Дугарцыреновым.

5.1

Механизм и математическая модель процесса гидрооттайки

Технологические параметры игловой гидрооттайки определяются в основном характеристиками процесса оттаивания мерзлой породы при действии одиночной гидроиглы. Лабораторными исследованиями установлено, что в мерзлых грунтовых (песчаных) монолитах однородного состава оттаявший объем породы (талик) представляет собой тело вращения, ось которого совпадает с осью иглы (рис. 5.1.1). При этом грушевидная форма талика сохраняется при различных температуре и расходе нагнетаемой в иглу воды, а также продолжительности цикла оттаивания. Нижняя часть талика имеет форму полушара радиусом R, центр O которого находится выше точки O_1 выхода воды из иглы на расстоянии $OO_1 = R/2$. При $z > 0$ образующая $r(z)$ тела вращения является монотонно убывающей функцией z. В области $z < 0$ полушаровая форма талика обусловлена довольно сложной гидродинамикой и теплообменом потока воды при изменении ее движения на восходящее направление. В силу этого аналитическое описание процесса оттаивания при $z < 0$ не представляется возможным. С другой стороны, максимальный радиус талика по оси z достигается в точке B и равен r_{max}, т.е. радиусу полушара в нижней части талика.

Поэтому теплообмен можно рассматривать на участке $0 \le z \le H_{иг}$ ($H_{иг}$ — глубина погружения иглы) восходящего потока воды, причем температуру воды при $z = 0$ считаем равной T_0 и одинаковой в любой точке r ($R_0 \le r \le r_{max}$).

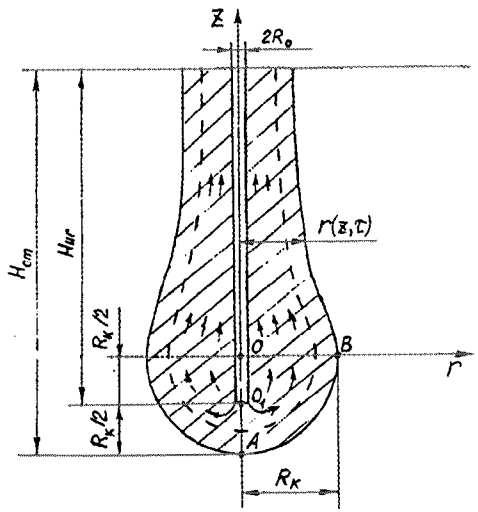


Рис. 5.1.1. Форма талика при игловой оттайке

Это возможно в силу развитой турбулентности (интенсивного перемешивания) при движении воды и ее повороте в области полушара, обладающего пористой структурой. Действительно, весь талик представляет собой песчано-галечную структуру, в порах которой движется вода. В силу хаотичного расположения пор и случайного изменения направлений потоков воды в них обеспечиваются совершенная конвекция и перемешивание.

В процессе оттаивания на участке $0 \le z \le H_{ит}$ текущий радиус талика $r\,(z, \tau)$ в каждый момент времени τ (форма талика в момент времени τ обозначена пунктиром на рис. 5.1.1) имеет максимум при $z = 0$, т.е. $r(0) = r_{max}$. Оттаивание продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие

$$r(0) = r_{max} = R. \qquad (5.1.1)$$

Таким образом, результаты лабораторных экспериментов позволяют прийти к выводу, что максимальная радиальная скорость оттаивания $\dfrac{dr(z,\tau)}{d\tau}$ достигается при $z = 0$, т.е.

$$\left.\frac{dr(z,\tau)}{d\tau}\right|_{z=0} \ge \left.\frac{dr(z,\tau)}{d\tau}\right|_{z>0}. \qquad (5.1.2)$$

В дальнейшем этот вывод позволит значительно упростить математическую модель процесса оттаивания.

Рассмотрим процесс оттаивания мерзлой породы в произвольном горизонтальном слое между z и $z + dz$. Талая цилиндрическая область массива горных пород определяется условием $R_0 \le r \le \xi$, мерзлая: $r \ge \xi$, где ξ — координата границы талой и мерзлой областей, где происходит фазовый переход «лед—вода». В такой постановке температуры $T_1(r, z, \tau)$ и $T_2(r, z, \tau)$ соответственно в талой и мерзлой областях массива зависят от пространственных координат r, z и времени τ, т.е. имеет место двумерная задача теплопроводности с фазовым переходом на границе $r = \xi$. Такие задачи достаточно сложны и не имеют аналитического решения. Поскольку нам достаточно выявить общий характер решения, отражающего основные принципиальные стороны процесса оттаивания, будем решать данную задачу при некоторых допустимых упрощениях.

При малых dz в силу того, что r и z есть независимые переменные, можно в пределах dz пренебречь тепловыми потоками по оси z. Тогда изменение температуры воды в слое dz в талой и породы в мерзлой областях определяется только радиальными тепловыми потоками. Следовательно, имеем

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T_1(r,\tau)}{\partial \tau} = a_1\left[\dfrac{\partial^2 T_1(r,\tau)}{\partial r^2} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial T_1(r,\tau)}{\partial r}\right] & (\tau > 0, R_0 \le r \le \xi); \\ \dfrac{\partial T_2(r,\tau)}{\partial \tau} = a_2\left[\dfrac{\partial^2 T_2(r,\tau)}{\partial r^2} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial T_2(r,\tau)}{\partial r}\right] & (\tau > 0, \xi \le r \le \infty), \end{cases} \qquad (5.1.3)$$

где a_1, a_2 — температуропроводность породы соответственно в талой и мерзлой областях.

Система (5.1.3) представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных второго по-

рядка, определяющую радиальный теплообмен в слое dz, причем температуры $T_1(r, \tau)$ и $T_2(r, \tau)$ относятся соответственно к талой и мерзлой областям.

Система (5.1.3) характеризуется начальными

$$T_1(r, 0) = T_2(r, 0) = T_м = \text{const} \qquad (5.1.4)$$

и краевыми условиями:

$$T_1(R_0, \tau) = \varphi(\tau); \qquad (5.1.5)$$

$$T_1(\xi, \tau) = T_2(\xi, \tau) = T_з = \text{const}; \qquad (5.1.6)$$

$$\frac{\partial T_2(\infty, \tau)}{\partial r} = 0, \qquad (5.1.7)$$

где $T_м$ — начальная температура мерзлой породы, °С; $T_з$ — температура фазового перехода «вода—лед», °С.

Помимо этого на границе $r = \xi$ раздела талой и мерзлой областей имеет место особое граничное условие

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial r} - \lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi, \tau)}{\partial r} = \rho_м W L_ф \frac{d\xi}{d\tau}, \qquad (5.1.8)$$

где λ_1, λ_2 — коэффициенты теплопроводности соответственно талой и мерзлой областей массива, Вт/(м·К); $\rho_м$ — плотность мерзлой породы, кг/м³; W — средняя весовая льдистость породы (отношение массы льда к массе мерзлой породы в единице ее объема), кг/кг; $L_ф$ — теплота фазового перехода «лед—вода», Дж/кг.

Условие (5.1.6) определяет постоянство температуры на границе $r = \xi$, равной $T_з$. Температура $T_2(r, \tau)$ при $r \to \infty$ не должна изменяться по мере увеличения r. Этому соответствует условие (5.1.7). Основной закон теплопроводности (закон Фурье) для одномерного случая имеет вид

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x},$$

где q_x — плотность теплового потока по оси x (количество тепла, прошедшего через единицу поперечного сечения x в единицу времени), Дж/(м²·с).

Отсюда согласно граничному условию (5.1.8) тепловой поток

$$q_1 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi, \tau)}{\partial r}$$

от талой области на границе $r = \xi$ расходуется на оттаивание мерзлой породы на участке $d\xi$, а также идет на нагрев мерзлой области в виде потока

$$q_2 = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial r}.$$

С другой стороны, тепловой поток q_1 может быть определен из условия конвективного теплообмена на границе $r = \xi$, т.е. из граничного условия III рода (закон Ньютона—Рихмана)

$$q_1 = -\lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi, \tau)}{\partial r} = \alpha[T_в - T(\xi, \tau)] = \alpha(T_в - T_з), \qquad (5.1.9)$$

где α — коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); $T_в$ — температура воды в слое dz.

Система (5.1.3) с условиями (5.1.4)—(5.1.9) представляет собой математическую модель образования цилиндрического талика. Проведем упрощение модели. В слое dz в талой области $R_0 \le r \le \xi$ имеет место хаотическое движение жидкости в порах, что создает совершенную конвекцию и выравнивание температуры по всей талой области за относительно малое время, т.е. передача тепла теплопроводностью в талой области отсутствует.

Извилистые пути движения воды и многократное увеличение или уменьшение истинных скоростей по отношению к средней действительной скорости фильтрации способствуют эффективному переносу тепла. Это явление можно понять, представив водную среду неподвижной, а скелет породы — движущимся через воду с образованием множества очагов возмущений воды в виде колебательных движений во всех направлениях. Эффект увеличения теплопроводности проявляется изотропно подобно диффузии.

Тогда температуру $T_в = T_1(r, \tau)$ можно считать независимой от r и τ и равной температуре воды в сечении z, т.е. $T_в = T(z)$.

Остается второе уравнение системы (5.1.3), которое решается при граничных условиях I рода (постоянство температуры) – условиях (5.1.6) и (5.1.7). Решение этой задачи известно и имеет вид

$$\frac{T_2 - T_м}{T_з - T_м} = \frac{1}{\sqrt{\eta}} \operatorname{erf} c \frac{\eta - 1}{2\sqrt{\mathrm{Fo}}} + \frac{(\eta - 1)\sqrt{\mathrm{Fo}}}{4\eta\sqrt{\eta}} i \operatorname{erf} c \frac{\eta - 1}{2\sqrt{\mathrm{Fo}}} +$$

$$+ \frac{(9 - 2\eta - 7\eta^2)\mathrm{Fo}}{32\eta^2\sqrt{\eta}} i^2 \operatorname{erf} c \frac{\eta - 1}{2\sqrt{\mathrm{Fo}}} + \ldots \quad (\xi \le r \le \infty), \quad (5.1.10)$$

где $\eta = \frac{r}{\xi}$; $\mathrm{Fo} = \frac{a_2 \tau}{\xi^2}$; $\operatorname{erf} cu = 1 - \operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty e^{-u^2} du$ — дополнительный интеграл вероятности; $i^n \operatorname{erf} cu = \int_u^\infty i^{n-1} \operatorname{erf} c\xi d\xi$.

Дифференцируя выражение (5.1.10), можно определить частную производную $\partial T_2(r,\tau)/\partial r\big|_{r=\xi} < 0$ на границе талой и мерзлой областей и тем самым тепловой поток q_2. Тогда с учетом (5.1.9) условие (5.1.8) перепишем в виде

$$\alpha(T_в - T_з) = \rho_м W L_ф \frac{\partial \xi}{\partial \tau} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial r}. \quad (5.1.11)$$

Покажем, что соотношение (5.1.11) представляет собой уравнение теплового баланса на границе $r = \xi$. Обозначим через dS и dV соответственно площадь участка цилиндрической поверхности радиусом $r = \xi$, высотой dz и объем кольцевого тела, образованного вращением прямоугольника $d\xi dz$ вокруг оси z. Тогда

$$dS = 2\pi\xi \cdot dz;$$

$$dV = \pi\left[(\xi + d\xi)^2 - \xi^2\right]dz = \pi\left[2\xi d\xi + (d\xi)^2\right]dz \approx 2\pi\xi d\xi dz. \quad (5.1.12)$$

Количество тепла Q_1, прошедшее из талой зоны в мерзлую через границу $r = \xi$ за время $d\tau$, составляет

$$Q_1 = \alpha(T_в - T_з) dS\, d\tau = 2\pi\alpha(T_в - T_з)\xi dz d\tau. \quad (5.1.13)$$

Величина Q_1 расходуется на протаивание за время $d\tau$ объема dV мерзлой породы — $Q_ф$:

$$Q_ф = \rho_м W L_ф dV = \rho_м W L_ф 2\pi\xi\, d\xi\, dz \quad (5.1.14)$$

и на нагрев мерзлой породы — Q_2:

$$Q_2 = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi,\tau)}{\partial r} dS\, d\tau = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi,\tau)}{\partial r} 2\pi\xi\, dz\, d\tau. \quad (5.1.15)$$

Подставляя в уравнение теплового баланса

$$Q_1 = Q_ф + Q_2$$

значения Q_1, $Q_ф$ и Q_2 из (5.1.13), (5.1.14) и (5.1.15), приходим к выражению (5.1.11).

Количество тепла Q_2 идет в основном на нагрев мерзлой породы от $T_м$ до $T_з$ без учета теплоты фазового перехода, поскольку распределение температур $T_2(r, \tau)$ при $r > \xi$ и $r > \xi + d\xi$ примерно одинаково. Более корректно было бы вместо $T_м$ выбрать $T_2(\xi + d\xi, \tau)$, однако это ведет к значительному усложнению исходного уравнения. Естест-

венно, в силу неравенства $T_м < T_2(\xi + d\xi, \tau)$ учет того, что в объеме dV происходит помимо фазового перехода нагрев породы от $T_м$ до $T_з$, в конечном итоге приведет к некоторому увеличению продолжительности оттаивания. Далее имеем

$$Q_2 = C_м\rho_м(T_з - T_м)dV = C_м\rho_м(T_з - T_м)2\pi\xi\, d\xi\, dz.$$

Отсюда получим

$$\alpha(T_в - T_з) = \left[\rho_м WL_ф + C_м\rho_м(T_з - T_м)\right]\frac{d\xi}{d\tau}. \qquad (5.1.16)$$

В полученном выражении, несмотря на то что рассматривались только радиальные потоки тепла, присутствует величина $T_в = T_в(z)$, характеризующая температуру воды на некоторой высоте z. Функцию $T_в(z)$ невозможно получить из уравнения теплового баланса для радиальных потоков тепла без обращения к двумерной задаче теплопроводности.

Тем не менее решение задачи протаивания и образования талика возможно в силу экспериментально обнаруженной закономерности (5.1.2). Действительно, если максимальная скорость оттаивания и максимальный радиус талика в любой момент времени имеют место при $z = 0$, а условие (5.1.1) определяет момент окончания процесса оттайки, то, рассматривая уравнение (5.1.16) в слое dz при $z = 0$, можно вообще не интересоваться радиусом талика на разных высотах. Примем температуру воды при $z = 0$ за T_0, тогда выражение (5.1.16) преобразуется к виду

$$\alpha(T_0 - T_з) = \left[\rho_м WL_ф + C_м\rho_м(T_з - T_м)\right]\frac{d\xi}{d\tau}. \qquad (5.1.17)$$

Известно, что коэффициент теплообмена α существенно зависит от скорости движения теплоносителя (воды), которая в свою очередь определяется сечением канала, т.е. в конечном итоге величиной ξ. При условии, что зависимость $\alpha(\xi)$ может быть определена в явном виде, уравнение (5.1.17) преобразуют в дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными.

5.2 Параметры теплообмена при гидрооттаивании

Коэффициенты теплообмена при течении теплоносителя в каналах различного поперечного сечения (круглых, кольцевых и т.д.) определяются из эмпирических формул, содержащих так называемые числа, или критерии, подобия. Технология получения таких формул заключается в следующем. Составляется система дифференциальных уравнений, описывающих экспериментально изучаемый процесс, и определяются условия однозначности. Далее математическое описание процесса приводится к безразмерному виду. Например, критерий Нуссельта (N_u) получен в виде функции от критериев Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr) и т.д., т.е. в виде

$$N_u = f(\mathrm{Re},\ \mathrm{Pr}\ \ldots).$$

По данным измерений определяются значения Re, Pr ... и соответствующие им значения N_u. Зависимость между числами подобия представляется в виде степенных функций, например

$$N_u = k\mathrm{Re}^n, \mathrm{Pr}^m,$$

где k, n, m — безразмерные константы.

Применительно к процессу игловой гидрооттайки приемлема эмпирическая формула для теплоотдачи при фильтрации теплоносителя через неподвижный пористый слой в диапазоне чисел Рейнольдса (Re) от 150 до 4000:

$$N_u = \frac{\alpha d}{\lambda_в} = 0{,}155\mathrm{Re}^{0{,}75}, \qquad (5.2.1)$$

где $\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu_в}$ (v — скорость восходящего потока теплоносителя (воды) в талике, м/с; $d = 2\xi$; $\nu_в$ — кинематическая вязкость теплоносителя, м²/с); $\lambda_в$ — коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К).

Скорость движения теплоносителя v через неподвижный пористый слой талых пород с учетом их эффективной пористости П (отношение сечения пор к полному сечению среды) при заданном расходе воды G определяется формулой

$$v = \frac{4G}{\pi d^2 \rho_в П}, \qquad (5.2.2)$$

где $\rho_в$ — плотность воды, $\rho_в = 1000$ кг/м³.

Объединяя (5.2.1) и (5.2.2), имеем

$$\alpha(\xi) = 0{,}0775\lambda_в \left(\frac{2G}{\pi\rho_в П \nu_в}\right)^{0{,}75} \frac{1}{\xi^{1{,}75}}, \qquad (5.2.3)$$

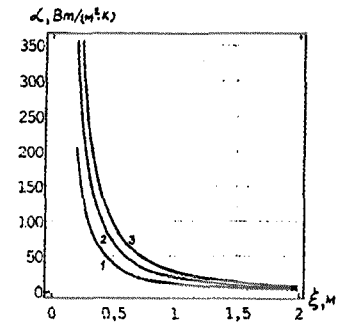
или

$$\alpha(\xi) = A\frac{1}{\xi^{1{,}75}}, \qquad (5.2.4)$$

где $A = 0{,}0775\lambda_в \left(\frac{2G}{\pi\rho_в П \nu_в}\right)^{0{,}75}$.

Наряду с формулой (5.2.1) для расчета конвективной теплоотдачи может быть использована формула, полученная в результате обработки опытов при турбулентном течении теплоносителей в трубах и кольцевых щелях с заданной шероховатостью стенок. При турбулентном течении в шероховатых каналах имеют место существенные гидродинамические преобразования, связанные с высотой бугорков шероховатости δ и приводящие к отрывному,

Рис. 5.2.1. *Зависимость коэффициента теплоотдачи от координаты фронта оттаивания:*
$\lambda_в = 0{,}56$ Вт/(м²·К); $\rho_в = 1000$ кг/м³; $\nu_в = 1{,}5\cdot10^{-6}$ м²/с; $П = 0{,}27$; *1* — $G = 2$ м³/ч; *2* — $G = 4$ м³/ч; *3* — $G = 6$ м³/ч



вихревому обтеканию таких бугорков. Характер течения определяется отношением расстояния $l_с$ по потоку между соседними неровностями и высотой бугорков δ. При этом критериальная формула для расчета теплообмена имеет вид

$$N_u = 0{,}022\,\mathrm{Re}^{0{,}8}\,\mathrm{Pr}_ж^{0{,}47}\left(\frac{\mathrm{Pr}_ж}{\mathrm{Pr}_с}\right)^{0{,}25}\varepsilon, \qquad (5.2.5)$$

где Pr — критерий Прандтля, зависящий от свойств теплоносителя; $\mathrm{Pr}_ж$ и $\mathrm{Pr}_с$ — критерий Прандтля при температуре соответственно жидкости и стенки;

$$\varepsilon = \exp\left[0{,}85\frac{(l_с/\delta)}{(l_с/\delta)_{опт}}\right].$$

Можно принять, что оптимальный относительный шаг $(l_с/\delta)_{опт} = 13$ при любом значении числа Прандтля в интервале от 1 до 80. Учитывая, что поверхность фронта фазового перехода на границе мерзлой и талой породы характеризуется шероховатостью, определяемой частицами разного гранулометрического состава, получим $\frac{(l_с/\delta)}{(l_с/\delta)_{опт}} \approx 1$. При температуре фазового перехода «лед—вода» $T_з = 0$ °С имеем для воды $\mathrm{Pr}_ж = 13{,}67$ и $\mathrm{Pr}_ж/\mathrm{Pr}_с = 1$. Тогда

$$\alpha(\xi) = 0{,}011(13{,}67)^{0{,}47}e^{0{,}85}\lambda_в\left(\frac{2G}{\pi\rho_в П\nu_в}\right)^{0{,}8}\frac{1}{\xi^{1{,}8}} =$$

$$= 0{,}088\lambda_в \left(\frac{2G}{\pi\rho_в \Pi\nu_в}\right)^{0{,}8} \frac{1}{\xi^{1{,}8}} = A^* \frac{1}{\xi^{1{,}8}}. \qquad (5.2.6)$$

Коэффициент теплообмена α на границе $r = \xi$ существенно зависит от радиуса талика ξ. Вывод соотношения (5.2.6) получен в предположении, что $\frac{R_0}{\xi} << 1$. Зависимость α (ξ) при различных расходах теплоносителя G в графическом виде представлена на рис. 5.2.1. Как видно из данного рисунка, коэффициент теплоотдачи резко (на порядок и более) снижается при увеличении радиуса оттаивания ξ в диапазоне от R_0 до значения ξ, примерно равного 1,0 м, и далее величина ξ изменяется сравнительно мало. Такой характер изменения коэффициента теплообмена определяет аналогичную зависимость скорости оттаивания на границе фазового перехода «лед—вода» от радиуса талика.

5.3
Расчет и оптимизация параметров оттайки при работе одиночной гидроиглы

С учетом зависимости α (ξ), определяемой выражением (5.2.6), соотношение (5.1.17) запишется в виде

$$A^* \frac{1}{\xi^{1{,}8}}(T_0 - T_з) = \left[\rho_м W L_ф + C_м \rho_м (T_з - T_м)\right] \frac{d\xi}{d\tau}, \qquad (5.3.1)$$

т.е. в виде дифференциального уравнения с разделяющимися переменными.

Разделяя переменные, имеем

$$\frac{A^*(T_0 - T_з)d\tau}{\rho_м W L_ф + C_м \rho_м (T_з - T_м)} = \xi^{1{,}8} d\xi,$$

или

$$B d\tau = \xi^{1{,}8} d\xi, \qquad (5.3.2)$$

где

$$B = \frac{0{,}088\lambda_в \left(\frac{2G}{\pi\rho_в \Pi\nu_в}\right)^{0{,}8} (T_0 - T_з)}{C_м \rho_м \left[\frac{W L_ф}{C_м (T_з - T_м)} + 1\right](T_з - T_м)} =$$

$$= B_1 G^{0{,}8} \frac{T_0 - T_з}{(T_з - T_м)\left[\frac{W L_ф}{C_м (T_з - T_м)} + 1\right]}; \qquad (5.3.3)$$

$$B = \frac{0{,}0775\lambda_в \left(\frac{2}{\pi\rho_в \Pi\nu_в}\right)^{0{,}75}}{C_м \rho_м}. \qquad (5.3.4)$$

Интегрируя (5.3.2), находим

$$B\tau + C = \frac{1}{2{,}8}\xi^{2{,}8} \ (C = \text{const}). \qquad (5.3.5)$$

Постоянную интегрирования находим из начального условия

$$\xi(0) = \xi\big|_{\tau=0} = R_0. \qquad (5.3.6)$$

Тогда

$$C = \frac{1}{2{,}8} R_0^{2{,}8}, \qquad (5.3.7)$$

Следовательно,

$$B\tau = \frac{1}{2{,}8}(\xi^{2{,}8} - R_0^{2{,}8}), \qquad (5.3.8)$$

или

$$\xi = (2{,}8B\tau + R_0^{2{,}8})^{\frac{1}{2{,}8}}. \qquad (5.3.9)$$

При заданном конечном радиусе талика $R_к$ время $\tau_к$, затраченное на его образование, логично найти из выражения (5.3.8).

$$\tau_к = \frac{1}{2{,}8}(R_к^{2{,}8} - R_0^{2{,}8}). \quad (5.3.10)$$

Соотношение (5.3.9) позволяет определить текущий максимальный радиус $r_{max}(\tau)$ в некоторый момент времени τ. Скорость оттаивания талика при $z = 0$ определяется дифференцированием выражения (5.3.9):

$$\frac{d\xi}{d\tau} = (2{,}8B\tau + R_0^{2{,}8})^{\frac{1}{2{,}8}-1} B = \\ = \xi^{-1{,}8} B = \xi^{-1{,}8} B', \quad (5.3.11)$$

где B' — коэффициент, приведенный к суткам, $B' = 86400B$.

Полученные формулы достаточно просты и пригодны для инженерных расчетов.

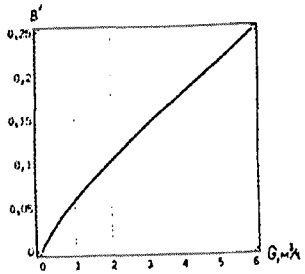


Рис. 5.3.1. Зависимость коэффициента B' от расхода воды

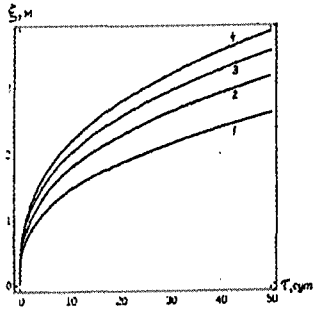


Рис. 5.3.2. *Зависимость текущего радиуса талика от времени:*
1 — G = 2 м³/ч; 2 — G = 4 м³/ч; 3 — G = 6 м³/ч; 4 — G = 8 м³/ч

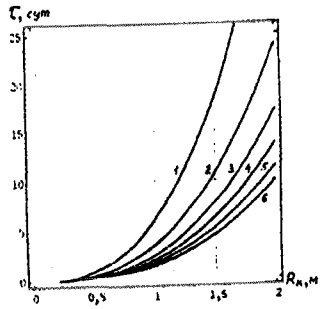


Рис. 5.3.3. *Зависимость времени оттаивания от конечного радиуса талика:*
1 — G = 1 м³/ч; 2 — G = 2 м³/ч; 3 — G = 3 м³/ч; 4 — G = 4 м³/ч; 5 — G = 5 м³/ч; 6 — G = 6 м³/ч

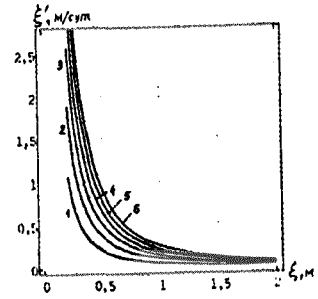


Рис. 5.3.4. *Зависимость скорости оттаивания от текущего радиуса талика:*
1 — G = 1 м³/ч; 2 — G = 2 м³/ч; 3 — G = 3 м³/ч; 4 — G = 4 м³/ч; 5 — G = 5 м³/ч; 6 — G = 6 м³/ч

Зависимости $B'(G)$, $\xi(\tau)$, $\tau(R_к)$ и $\frac{d\xi}{d\tau}(\xi)$ представлены соответственно на рис. 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3 и 5.3.4. Зависимости на указанных и последующих рисунках разд. 5.3 получены расчетным путем при следующих значениях физических характеристик породы: $\lambda_в = 0{,}56$ Вт/(м²·К); $\rho_в = 1000$ кг/м³; $\nu_в = 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $П = 0{,}27$; $\rho_м = 1511$ кг/м³; $C_м = 1200$ Дж/(кг·К); $T_0 = 10$ °С; $T_м = -5$ °С; $W = 0{,}17$; $L_ф = 333\,700$ Дж/кг. Значения переменных параметров указаны на каждом рисунке.

При относительно малом (до 10 суток) времени оттаивания наблюдается резкое увеличение текущего радиуса талика (см. рис. 5.3.2), далее темп роста величины ξ снижается. Это обусловлено в основном характером уменьшения скорости продвижения фронта фазового перехода $d\xi/d\tau$ (см. рис. 5.3.4). Поэтому при заданных конечных радиусах талика $R_к$, больших 1,5—2,0 м, имеет место значительное увеличение времени оттаивания (см. рис. 5.3.3).

При заданном постоянном значении радиуса $R_к$ талика продолжительность его образования существенно зависит от расхода воды, подаваемой в иглу (рис. 5.3.5). При малых значениях расхода наблюдается резкое увеличение времени оттайки.

Для оптимизации процесса оттаивания при действии одиночной гидроиглы следует определить параметры, которые изменяются в течение времени оттайки в силу естественных условий, а также могут быть изменены искусственным

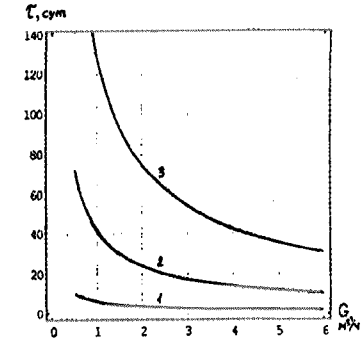


Рис. 5.3.5. *Влияние расхода теплоносителя (воды) на продолжительность оттаивания:*
1 — $R_к$ = 1 м; 2 — $R_к$ = 2 м; 3 — $R_к$ = 3 м

путем. Коэффициент B, определяющий интенсивность процесса оттаивания, в представлении (5.3.3) состоит из трех множителей, один из которых — B_1, является постоянной величиной. Остальные множители обозначим через B_2 и B_3. Тогда получим

$$B_2 = G^{0,8}; \qquad (5.3.12)$$

$$B_3 = \frac{T_0 - T_з}{(T_з - T_м)\left[\dfrac{WL_ф}{C_м(T_з - T_м)} + 1\right]}, \qquad (5.3.13)$$

и

$$B = B_1 B_2 B_3. \qquad (5.3.14)$$

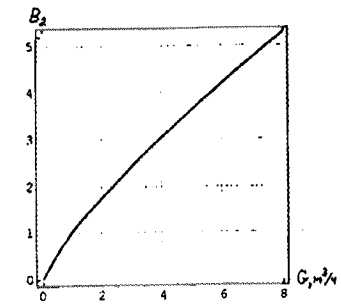
Коэффициент B_2 зависит только от расхода теплоносителя (воды), который по существующей технологии практически не изменяется, поскольку рекомендации по оптимальному расходу воды в зависимости от внешних условий на настоящий момент отсутствуют. Однако регулирование величины расхода G в техническом плане может быть осуществлено при помощи задвижки на ответвлении от магистрального водовода. При этом расход воды изменяется только в пределах одного блока оттайки (для групп игл в 40—50 шт.). Зависимость $B_2(G)$ представлена на рис. 5.3.6.

С учетом того что $T_з = 0$ °С, представим коэффициент B_3 в виде

$$B_3 = \frac{T_0}{(-T_м)\left[\dfrac{WL_ф}{C_м(-T_м)} + 1\right]}. \qquad (5.3.15)$$

Следовательно, коэффициент B_3 может являться функцией трех независимых переменных — T_0, $T_м$ и W. Величины B_3 и, следовательно, B пропорциональны температуре T_0, поэтому T_0 оказывает более существенное влияние

Рис. 5.3.6. Влияние расхода воды на величину коэффициента B_2



на процесс оттайки по сравнению с расходом воды. Однако влияние T_0 ограничивается малыми пределами его изменения в течение времени оттаивания. В производственных условиях вода для оттайки отбирается из рек (холодные водоисточники) или специальных мелких прудов-нагревателей, в которых небольшой слой воды на значительной площади достаточно хорошо прогревается под действием солнечного тепла. Такие пруды имеют глубину не более 0,3—0,6 м. Эффективность нагрева воды определяется отношением G/S (S — площадь поверхности воды в пруде) и в виде изменения ее температуры (для континентальных районов Северо-Востока России) за июнь—август представлена в табл. 5.3.1.

Таблица 5.3.1

Начальная температура воды, °С	Средняя температура воды (°С) при G/S (м³/ч)					
	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
4	4,5	5,0	5,9	7,6	10,2	12,0
6	6,4	6,8	7,5	8,7	10,8	12,1
8	8,3	8,5	9,0	9,9	11,3	12,3
10	10,1	10,3	10,6	11,1	11,9	12,5

В частности, при начальной температуре 6 °С за июнь—август в пруде площадью 200 м² (20 м × 10 м) при расходе G = 2 м³/ч (G/S = 0,01 м³/ч) вода нагревается до 12,1 °С, т.е. приблизительно в 2 раза.

Обычно величина T_0 определяет продолжительность сезона оттайки, который начинается тогда, когда вода в источнике водоснабжения прогревается до +2 °С, а заканчивается при охлаждении воды до +3 °С.

Влияние начальной температуры $T_м$ мерзлой породы на продолжительность процесса оттаивания незначительно в связи с тем, что основная часть тепла расходуется на фазовый переход «лед—вода». Действительно, согласно (5.3.15) $W = 0{,}17$.

$$\frac{WL_ф}{C_м} = 47{,}27 >> T_м.$$

Льдистость W существенно влияет на величину коэффициента B_3 при изменении W от 0 до 0,2 (рис. 5.3.7).

Таким образом, основными регулируемыми параметрами игловой гидрооттайки являются начальная температура и расход подаваемой в иглу воды.

Для оптимизации параметров процесса оттаивания мерзлой породы при действии одиночной иглы рассмотрим выявленные ранее закономерности этого процесса. Такая характеристика процесса оттаивания, как продолжительность образования талика, относительно мала при небольших радиусах талика, что обусловлено высокой скоростью продвижения фронта оттаивания. Тогда увеличение расхода воды при $\xi > 1$ м не дает сколько-нибудь заметного положительного эффекта.

Следовательно, регулирование расхода воды целесообразно производить на начальном этапе образования талика. В общем случае оптимальный расход воды должен функционально зависеть от текущего радиуса образуемого талика, т.е. представлять собой некоторую функцию $G = G(\xi)$. Однако определение этой функции в аналитическом виде

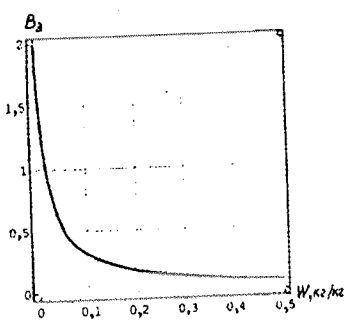


Рис. 5.3.7. Влияние льдистости породы на величину коэффициента B_3

представляется затруднительным. Наиболее простым видом функции $G = G(\xi)$ является ступенчатая функция, когда весь процесс образования талика разбивается на два этапа: предварительный и основной, и на каждом этапе расход воды постоянен. В этом случае продолжительность образования талика $\tau_{общ}$ может быть представлена в виде

$$\tau_{общ} = \tau_{пр} + \tau_{осн}, \qquad (5.3.16)$$

где $\tau_{пр}$ — продолжительность предварительного цикла оттаивания; $\tau_{осн}$ — продолжительность основного цикла.

Обозначим постоянные расходы воды в каждом из циклов соответственно через $G_{пр}$ и $G_{осн}$. Величина $\tau_{пр}$ может составлять 1—6 сут в зависимости от расхода $G_{пр}$ и определяется из условия, что радиус талика в предварительном цикле достигает значения $R_{пр}$. В первом приближении можно принять $R_{пр} \approx 1{,}0$ м. Пренебрегая малой величиной R_0, согласно формуле (5.3.9) имеем

$$R_{пр} = (2{,}8B_{пр}\tau_{пр})^{\frac{1}{2{,}8}}, \qquad (5.3.17)$$

где $B_{пр} = B_{пр}(G_{пр})$.

При заданном конечном радиусе талика $R_к$ продолжительность основного цикла определяется в силу (5.3.10) выражением

$$\tau_{осн} = \frac{1}{2{,}8B_{осн}}\left(R_к^{2{,}8} - R_{пр}^{2{,}8}\right), \qquad (5.3.18)$$

где $B_{осн} = B_{осн}(G_{осн})$.

Общая продолжительность образования талика радиусом $R_к$ составляет

$$\tau_{общ} = \frac{1}{2{,}8B_{осн}}(R_к^{2{,}8} - 2{,}8B_{пр}\tau_{пр}) + \tau_{пр} =$$

$$= \frac{1}{2{,}8B_{\text{осн}}} R_{\text{к}}^{2,8} + \tau_{\text{пр}}\left(1 - \frac{B_{\text{пр}}}{B_{\text{осн}}}\right), \qquad (5.3.19)$$

где $$\frac{B_{\text{пр}}}{B_{\text{осн}}} = \frac{G_{\text{пр}}^{0,8}}{G_{\text{осн}}^{0,8}}.$$

В силу того что $G_{\text{пр}} > G_{\text{осн}}$ и соответственно $B_{\text{пр}} > B_{\text{осн}}$, второе слагаемое в (5.3.18) отрицательно, поэтому $\tau_{\text{общ}}$ уменьшается по сравнению с одноцикловым процессом оттаивания при расходе $G_{\text{осн}}$. Поскольку продолжительность предварительного цикла сравнительно мала, общее увеличение расхода воды незначительно. С другой стороны, можно поставить условие о выполнении равенства использованных объемов воды в одноцикловом и двухцикловом процессах оттаивания.

Результаты расчетов по формуле (5.3.19) представлены на рис. 5.3.8. В частности, при $G_{\text{осн}} = 2$ м³/ч, $R_{\text{к}} = 2$ м, $\tau_{\text{пр}} = 5$ сут и $G_{\text{пр}} = 6$ м³/ч общая продолжительность образования талика составила примерно 17 сут вместо 24 сут при одноцикловой оттайке, т.е. уменьшилась почти на 7 сут.

Организация работ при двухцикловой технологии игловой гидрооттайки практически не изменяется по сравнению с одноцикловой оттайкой. В пределах продолжительности каждого цикла расход воды остается постоянным, изменение расхода воды производится один раз за весь период оттаивания. В предварительном цикле целесообразно производить оттаивание

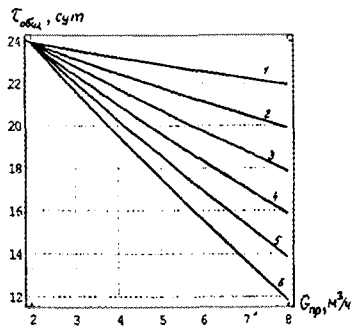


Рис. 5.3.8. *Зависимость общей продолжительности оттаивания от расхода воды в предварительном цикле:*
1 — $\tau_{пр}$ = 1 сут; *2* — $\tau_{пр}$ = 2 сут; *3* — $\tau_{пр}$ = 3 сут; *4* — $\tau_{пр}$ = 4 сут; *5* — $\tau_{пр}$ = 5 сут; *6* — $\tau_{пр}$ = 6 сут

при максимально возможной для данного оборудования величине расхода воды и продолжительность цикла выбирать в пределах 1—5 суток. Далее осуществляется переход на номинальный режим, который поддерживается на протяжении всего основного цикла. Величину $\tau_{\text{пр}}$ определяют, исходя из требуемой общей продолжительности оттаивания $\tau_{\text{общ}}$, расчетным путем либо на основании графических зависимостей (см. рис. 5.3.7).

5.4 Технические средства и технология игловой гидрооттайки

Игловое гидрооттаивание (ИГО), или оттайка, является наиболее универсальным и в то же время достаточно трудоемким способом разупрочнения мерзлых пород, требующим комплекса непрерывно производимых работ, включая ежедневный контроль за действием каждой иглы. Технология ИГО включает в себя следующие основные этапы:

- подготовительный;
- установка игл в определенной последовательности на заданной площади;
- обеспечение непрерывной подачи теплоносителя (воды) в сеть игл.

На подготовительном этапе производят удаление растительного, а затем илистого слоя до слоя галечников, планировку поверхности участка оттаивания, при которой обеспечивается строгая вертикальность буровых скважин под иглы и ее осушение с помощью сети мелких выработок (канав) глубиной 0,5—0,6 м. Осушение производится с целью обеспечения нормальных условий доступа к иглам при их контроле, восстановлении и извлечении, а также создания электробезопасных условий труда.

Существуют различные технологии установки игл, общим для них является бурение скважин. Бурение производят в основном станками вращательного бурения типа СДВВ-II или СВВ-42 (рис. 5.4.1), характеристики ко-

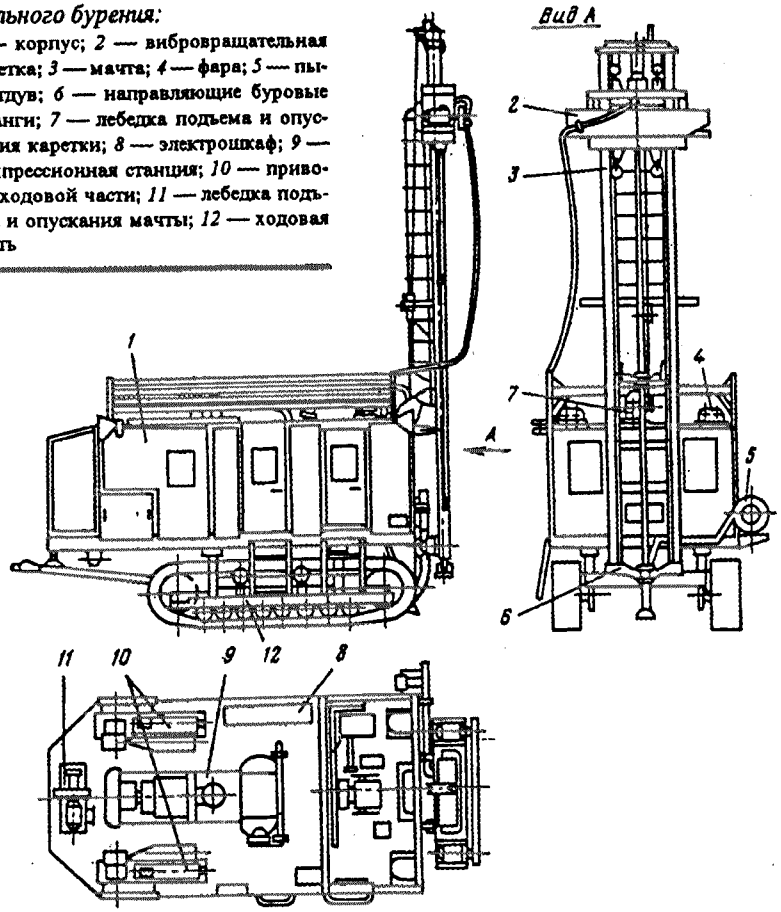


Рис. 5.4.1. *Станок вращательного бурения:*
1 — корпус; *2* — вибровращательная каретка; *3* — мачта; *4* — фара; *5* — пылеотдув; *6* — направляющие буровые штанги; *7* — лебедка подъема и опускания каретки; *8* — электрошкаф; *9* — компрессионная станция; *10* — приводы ходовой части; *11* — лебедка подъема и опускания мачты; *12* — ходовая часть

торых представлены в табл. 5.4.1. В качестве игл можно использовать металлические или полиэтиленовые трубы, а также буровые штанги. В последнем случае буровую штангу с буровой коронкой оставляют в пробуренной скважине и в последующем подсоединяют ее к водяной магистрали. Специальные иглы, в частности имеющие перспективное будущее полиэтиленовые трубы, вставляют в предварительно пробуренные скважины. При этом зачастую скважины бурят до начала сезона оттайки, затем их контролируют с целью предотвращения попадания в них и последующего замерзания воды из верхнего слоя массива горных пород, который в весеннее время начинает интенсивно оттаивать.

Таблица 5.4.1

Тип станка	СДВВ-II	СВВ-42
Масса станка, т	11,9	23,0
Установленная мощность двигателей, кВт	52,5	80—150
Глубина бурения, м	15—20	15
Диаметр буровой коронки, мм	46—105	42—125
Принцип бурения	Вибровращательный	Вибровращательный
Средняя скорость бурения, м/ч	10—15	11
Способ передвижения	Самоходный (гусеничный ход)	Самоходный (гусеничный ход)

На рис. 5.4.2 показаны подготовленная к работе игла и ряд игл в процессе гидрооттаивания. На выходе иглы на поверхность, на расстоянии примерно 1,0—1,5 м, игла за-

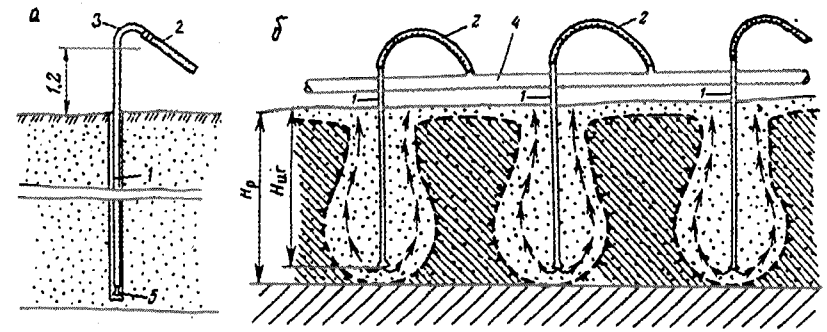


Рис. 5.4.2. *Схема работы игл при гидрооттайке:*
а — подготовленная к работе игла; *б* — иглы в процессе оттайки; *1* — игла; *2* — резинотканевый рукав; *3* — патрубок для подсоединения резинотканевого рукава; *4* — гребенчатый распределитель; *5* — коронка; $H_р$ — мощность россыпи; $H_{иг}$ — глубина погружения иглы

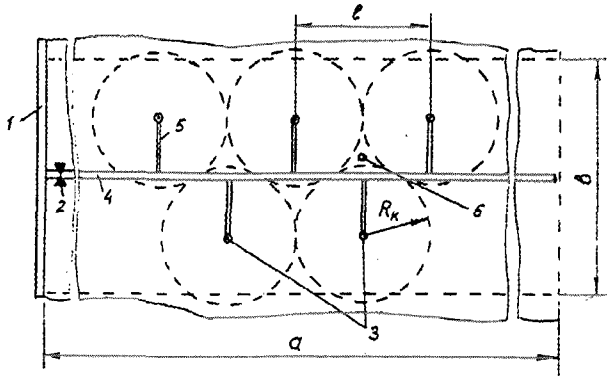


Рис. 5.4.3. *Блок оттаивания с оборудованием водоснабжения игл:* *1* — главный распределитель; *2* — задвижка; *3* — иглы; *4* — гребенчатый распределитель; *5* — резинотканевый рукав; *6* — контрольная игла; *а* и *в* — длина и ширина блока

гнута и снабжена патрубком, который через резинотканевый рукав подсоединяется к водяной магистрали. Каждая водяная магистраль обслуживает так называемый блок оттайки, на котором сосредоточено до 40—50 игл. Водяную магистраль в силу большого количества ее патрубков называют гребенчатым распределителем. Регулирования расхода воды для отдельной иглы не предусмотрено. Оно осуществляется только по отдельным блокам оттайки с помощью специальной задвижки.

Блок оттайки представляет собой прямоугольный параллелепипед высотой, равной глубине оттаивания $H_{от}$. Площадь поверхности блока оттайки составляет обычно 600—800 м². При этом ширина блока определяется длиной резинотканевых рукавов (9 м) и примерно равна $2 \cdot 9$ м $\approx$18 м (рис. 5.4.3).

Основным условием в процессе гидрооттаивания является обеспечение бесперебойной подачи воды, поэтому к комплексу оборудования водоснабжения гидрооттайки (ОВГ), а также к самой воде как теплоносителю предъявляются повышенные требования. Это связано с тем, что отказ системы ОВГ и прекращение подачи воды приводят к промерзанию воды в магистралях системы, а также в таликe, образованном иглой, и в конечном итоге — к аварийной ситуации.

Комплекс ОВГ представляет собой сложную гидротехническую сеть (рис. 5.4.4), позволяющую обслуживать до 30—40 блоков оттайки (одновременно до 1500 игл). За работой каждой иглы осуществляется ежедневный контроль. При этом достигается возможность своевременного устранения неисправностей в системе. Помимо этого осуществляется контроль за оттайкой массива в целом. Для этого предварительно, за 15—20 дней до начала оттайки, в массиве мерзлой породы устанавливают контрольные иглы с шагом $4H_{от}$, причем они устанавливаются на 1,5 м глубже, чем рабочие иглы. Контрольные иглы устанавливаются в центре треугольника, образованного тремя соседними рабочими иглами (см. рис. 5.4.3), поскольку эта точка наиболее удалена от последних и фронт оттаивания достигает ее в последнюю очередь. Степень оттаивания массива определяют с помощью грузика, опускаемого в отверстие контрольной иглы. Если грузик свободно опускается на всю глубину иглы, то считается, что процесс оттаивания массива завершен.

Комплекс ОВГ включает в себя насосные станции, трубопроводы различного назначения, иглы, монтажное оборудование (см. рис. 5.4.4).

Обычно при проектировании игловой гидрооттайки задаются объемом мерзлых пород $V_г$, подлежащих оттаиванию, а также глубиной $H_{от}$. Величина $V_г$ определяется годовым объемом переработки гор-

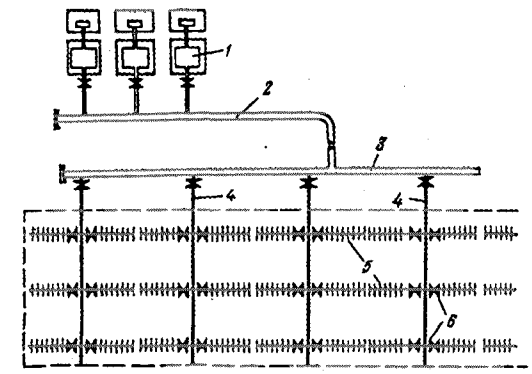


Рис. 5.4.4. *Схема водоснабжения игловой гидрооттайки:* *1* — насосная станция; *2* — водовод диаметром 600 мм; *3* — магистральный трубопровод диаметром 600 мм; *4* — главные распределители диаметром 400 мм; *5* — гребенчатые распределители диаметром 125 мм; *6* — задвижки

ной массы драгой или промывочными установками. Глубина оттаивания $H_{от}$ определяется из условия полного протаивания толщи мерзлых пород россыпи, находящихся на определенной глубине. При этом следует иметь в виду, что величина $H_{от}$ всегда больше глубины пробуренной под иглу скважины $H_б$. Разность $H_{от} - H_б$ достигает 1,5—2 м. На практике рекомендуется использовать разность $H_{от} - H_б = 1{,}5$ м. Поскольку $H_{от}$ определяется глубиной залегания россыпи, то возможны существенные отклонения глубины $H_{от}$ на различных участках оттаиваемой поверхности.

Конечный радиус талика $R_к$ при действии одиночной гидроиглы определяется шагом установки игл l: $R_к = l/2$. Уменьшение шага l существенно сокращает продолжительность процесса оттаивания $\tau_к$ [см. формулу (5.3.10)]. Так, уменьшение величины l и соответственно $R_к$ в 2 раза приводит к снижению времени оттаивания $\tau_к$ в 6,96 ~ 7 раз. Соответственно снижаются затраты на оттайку. С другой стороны, уменьшение шага установки игл ведет к удорожанию буровых работ и водоснабжения в силу увеличения количества игл на оттаиваемом участке мерзлых пород. Поэтому величина l ограничена пределами l_{min} и l_{max}, соответствующими минимальным затратам времени на оттайку (l_{min}) и максимальной стоимости бурения и водоснабжения (l_{max}). В интервале (l_{min}, l_{max}) находится оптимальное значение шага установки $l_{опт}$. Поскольку значение шага l зависит от большого количества параметров, таких, как температура T_0 и расход воды G, коэффициент фильтрации, льдистость W и др., выбор l обычно производят на основе рекомендуемых значений, выявленных практикой работ по оттайке (табл. 5.4.2).

При гексагональном расположении игл расстояние между рядами игл составляет $0{,}87l$, количество игл N на заданной площади оттаивания S: $N = \frac{4}{2\sqrt{3}}\frac{S}{l^2} \sim 1{,}15\frac{S}{l^2}$. Таким образом, сетка скважин, когда иглы установлены в вершинах равностороннего треугольника, полностью определяется величиной шага установки игл.

Таблица 5.4.2

Глубина погружения, м	Глинистые породы			Галечно-гравелистые породы		
	l_{min}	$l_{опт}$	l_{max}	l_{min}	$l_{опт}$	l_{max}
2,5—4	1,5	2,5	3	2	3	4
4,5—7	2	3	4	2,5	**5**	**5**
8—11	2,5	4	**5,3**	3,5	**4,5**	6,4
12—17	3,5	**5,3**	6,4	**5,3**	6,4	9
18—29	**5,3**	7	9	6,4	9	13
30—45	**6,4**	10	15	9	12	16

Примечание. Опыт показывает, что при шаге установки игл более 5,5 м мерзлые породы в суровых климатических условиях не успевают оттаивать, поэтому здесь не имеет смысла принимать значения шага больше величины, выделенной шрифтом. Максимальные значения шага установки (более 5,5 м) могут быть приняты только тогда, когда оттайка производится в условиях умеренно сурового климата.

Продолжительность оттаивания при одноцикловом процессе определяют по формуле (5.3.10) или по выражению

$$\tau = \frac{1}{1{,}8B}\left[\left(\frac{l}{2}\right)^{2{,}8} - R_0^{2{,}8}\right], \qquad (5.4.1)$$

которое включает шаг установки игл l и является достаточно простым для инженерных расчетов. Естественно, для использования формулы (5.4.1) необходимо знать величину льдистости и начальную температуру мерзлых пород, их физико-механические характеристики, величину расхода и температуру нагнетаемой воды.

Поскольку продолжительность оттаивания находится в пропорциональной зависимости от температуры воды, последняя оказывает на величину τ более существенное влияние, чем расход G. Для расчета используются средние температуры воды по сведениям гидрометеослужбы для данного района либо данные по температуре воды в прудах-отстойниках. Обычно температуру воды задают, исходя из данных многолетних наблюдений по водоемам и рекам данного региона (табл. 5.4.3).

При выборе расхода воды следует иметь в виду предельные значения, определяемые коэффициентом фильтрации для данного типа горных пород, подлежащих оттайке

Таблица 5.4.3

Река (участок)	Температура воды, °С								
	Май	Июнь			Июль	Август	Сентябрь		
	III*	I	II	III	I—III	I—III	I	II	III
Берелех (г. Сусуман)	1,5	5,2	7,6	9,5	11,1	9,8	6,2	4,6	2,4
Омчак	2,3	4,3	6,7	7,9	9,4	8,8	6,3	5,0	3,3
Омчуг (пос. Усть-Омчуг)	1,4	3,9	5,7	6,9	8,0	8,0	6,0	4,9	3,3
Дебин	1,3	4,8	7,5	10,1	11,8	9,7	6,0	4,4	2,3
Малый Анюй	0,2	2,6	6,2	9,5	11,3	9,1	4,6	2,6	0,9
Пыркакайвеем (пос. Красноармейский)	—	2,6	5,0	6,4	8,0	6,1	2,2	1,6	0,4
Малые реки континентальных районов Северо-Востока России	—	0,9	4,9	9,0	12,2	6,9	3,1	—	—

* Декада месяца.

Таблица 5.4.4

Порода	Коэффициент фильтрации, м/сут	Максимальный расход ($м^3$/ч) при глубине оттайки (м)			
		4	8	12	20
Щебенистые супеси	3	0,8	1,1	1,5	2
Пески пылеватые, глинистые с галькой	3—8	1,6	2,1	2,5	3,2

(табл. 5.4.4). Выбирать величину G, превышающую указанные значения, не рекомендуется. На практике применяют поэтапное оттаивание различных участков за сезон. Это связано с тем, что многие параметры, определяющие процесс оттаивания, значительно изменяются в течение сезона оттайки. В частности, существенные изменения претерпевают температура воды в источниках, начальная температура мерзлой породы; льдистость также меняется от участка к участку. Поэтому при проектировании игловой гидрооттайки составляется специальный график оттайки, в котором предусматривают несколько пересчетов процесса оттаивания, позволяющих учесть динамику изменения различных внешних параметров в течение сезона.

Глава 6

ПРОМЕРЗАНИЕ СВЯЗНЫХ ПОРОД И ЕГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА МЕТОДОМ ПРОМЫВКИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

6.1. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

6.2. РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ СВЯЗНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ СТЕФАНА

6.3. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОМЕРЗАНИЯ СВЯЗНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ЛЕЙБЕНЗОНА

6.4. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОМЕРЗАНИЯ В СКЛАДАХ-ОТВАЛАХ ТАЛЫХ СВЯЗНЫХ ПОРОД

6.5. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПРОМЕРЗАНИЯ ТАЛЫХ ЗОЛОТОНОСНЫХ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОРОД В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

6.6. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ ТАЛЫХ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ЗОЛОТОНОСНЫХ ПОРОД НА СКЛАДАХ-ОТВАЛАХ ПРИ УСЛОВИИ ДОПУЩЕНИЯ ПРОМЕРЗАНИЯ НА ЗАДАННУЮ ГЛУБИНУ

6.7. СПОСОБЫ ПРЕДОХРАНЕНИЯ СВЯЗНЫХ ПОРОД ОТ ПРОМЕРЗАНИЯ

Глава 6 написана автором совместно с проф., докт. техн. наук С.А. Гончаровым.

6.1

Общая постановка задачи

Как было отмечено ранее, промывочный сезон при разработке аллювиальных золотоносных пород в условиях Северо-Востока России (Чукотка, Магаданская обл., Якутия) начинается при наступлении положительных температур воздуха и наличии частично оттаявших пород (конец мая) и заканчивается при наступлении отрицательных температур (середина—конец сентября). В связи с этим продолжительность промывочного сезона очень короткая и его продление — весьма актуальная проблема. Ее решение может быть осуществлено на основе создания складов-отвалов талых аллювиальных пород и их теплоизоляции сверху в конце предшествующего промывочного сезона с таким расчетом, чтобы сразу же после наступления положительных температур начать промывку в последующем промывочном сезоне. Так как склады-отвалы формируются на поверхности многолетнемерзлых пород, температура которых равна примерно минус 6 °С, то естественно предположить, что промерзание пород в отвалах будет происходить как снизу в течение всего времени его стояния, так и сверху в течение времени с отрицательными температурами воздуха. Уменьшить или полностью предотвратить промерзание пород отвала сверху возможно при его теплоизоляции.

В этой главе рассмотрим процесс промерзания пород отвала как снизу, так и сверху, причем сверху — в трех вариантах: без теплоизоляции, с теплоизоляцией, полностью предотвращающей промерзание, и с теплоизоляцией, допускающей промерзание, но не более чем на заданную глубину.

Прежде чем приступить к решению задачи промерзания связных пород, необходимо установить характер изменения температуры внешней среды $T_в$ за период года с отрицательными температурами.

Будем считать, что в северо-восточных регионах России отрицательные температуры воздуха наступают с 1 октября и заканчиваются 31 мая. Обозначим среднемесячные температуры за этот период соответственно $T_о$, $T_н$, $T_д$, $T_я$, $T_ф$, $T_м$, $T_а$, $T_{мя}$. За начало отсчета времени τ примем 1 февраля как середину периода с отрицательными температурами. В этом случае время с 1 октября по 31 января будет отрицательным, а с 1 февраля по 31 мая — положительным.

Будем считать, что продолжительность каждого месяца $\tau_м$ равна 30 дням.

Введем безразмерное время y:

$$y = \frac{2\tau}{\tau_м}. \qquad (6.1.1)$$

В этом случае безразмерное время, соответствующее периоду с 1 октября по 31 января, будет численно изменяться от –8 (для 1 октября) до нуля (для 31 января) и далее до +8 (для 31 мая).

Изменение температуры T как функцию безразмерного времени y за период с 1 октября по 31 мая (период отрицательных среднемесячных температур воздуха) можно представить в виде полинома седьмой степени:

$$T(y) = Ay^7 + By^6 + Cy^5 + Dy^4 + Ey^3 + Fy^2 + Ny + K, \qquad (6.1.2)$$

где A, B, C, ..., K — неизвестные константы, подлежащие определению по среднемесячным температурам.

Условимся считать среднемесячной температурой температуру в середине каждого месяца.

Согласно (6.1.1) безразмерное время, соответствующее середине месяца, т.е. 15 октября, 15 ноября, ..., 15 мая, будет соответственно

$$y_о = -7;\ y_н = -5;\ y_д = -3;\ y_я = -1;$$
$$y_ф = 1;\ y_м = 3;\ y_а = 5;\ y_{мя} = 7. \qquad (6.1.3)$$

С учетом (6.1.3) выражение (6.1.2) для среднемесячных температур в период с 1 октября по 31 мая можно представить для соответствующего месяца в виде системы уравнений

$$\left.\begin{aligned}
T_о &= -7^7 A + 7^6 B - 7^5 C + 7^4 D - 7^3 E + 7^2 F - 7N + K,\\
T_н &= -5^7 A + 5^6 B - 5^5 C + 5^4 D - 5^3 E + 5^2 F - 5N + K,\\
T_д &= -3^7 A + 3^6 B - 3^5 C + 3^4 D - 3^3 E + 3^2 F - 3N + K,\\
T_я &= -1^7 A + 1^6 B - 1^5 C + 1^4 D - 1^3 E + 1^2 F - 1N + K,\\
T_ф &= 1^7 A + 1^6 B + 1^5 C + 1^4 D + 1^3 E + 1^2 F + 1N + K,\\
T_м &= 3^7 A + 3^6 B + 3^5 C + 3^4 D + 3^3 E + 3^2 F + 3N + K,\\
T_а &= 5^7 A + 5^6 B + 5^5 C + 5^4 D + 5^3 E + 5^2 F + 5N + K,\\
T_{мя} &= 7^7 A + 7^6 B + 7^5 C + 7^4 D + 7^3 E + 7^2 F + 7N + K.
\end{aligned}\right\} \qquad (6.1.4)$$

Решая систему уравнений (6.1.4), можно определить коэффициенты A, B, C, ..., K. Затем, подставляя значения этих коэффициентов в выражение (6.1.2), получим частное уравнение для определения характера изменения температуры воздуха $T_в$ как функции безразмерного времени (y).

6.2
Расчет глубины промерзания связных пород на основе решения Стефана

Условимся обозначать в этом и последующих разделах данной главы параметры теплоизоляционного по-

крытия индексом 1, промерзшего слоя — индексом 2, талого слоя — индексом 3.

Рассмотрим задачу промерзания связных пород сверху отвала при отсутствии теплоизоляционного покрытия в точной постановке решения Стефана (1890 г.) (Стефан Йозеф (1835—1893 гг.) — австрийский физик).

Задача сводится к решению дифференциального уравнения теплопроводности для полупространства при наличии внутреннего положительного источника тепла. Положительного потому, что фазовый переход «вода—лед» является экзотермическим, т. е. происходит с выделением тепла.

Условия задачи могут быть сформулированы следующим образом: на поверхности полупространства в момент времени $\tau = 0$ устанавливается отрицательная температура $T_в$, равная температуре внешней окружающей среды. В процессе промерзания связной породы образуется промерзший слой толщиной $h = f(\tau)$. Нижняя граница этого слоя всегда имеет температуру замерзания влаги $T_ф$. На этой границе происходит фазовый переход «вода—лед», при котором выделяется теплота перехода $L_ф$, Дж/кг. На глубине залегания нейтрального слоя H_0 температура всегда постоянна и равна температуре пород отвала на момент его отсыпки. Обозначим эту температуру через $T_з$. Слой, на глубине которого практически не сказывается изменение температуры внешней среды, называется нейтральным. Можно принять, что глубина H_0 примерно равна половине высоты отвала.

Для описания распределения температурного поля в системе «промерзшая

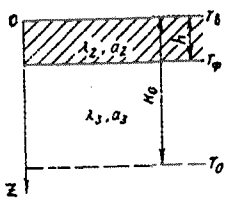
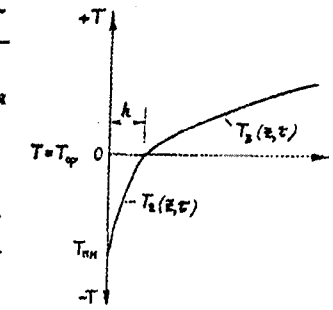


Рис. 6.2.1. Тепловая модель «промерзший слой — талые породы»

Рис. 6.2.2. Распределение температуры в системе «промерзший слой — талые породы»:
$T_2(z, \tau)$ — для промерзшего слоя; $T_3(z, \tau)$ — для талых пород; h — глубина промерзания



связная порода — талая порода» воспользуемся моделью, изображенной на рис. 6.2.1.

Распределение температурного поля в этой системе можно представить в виде графика, изображенного на рис. 6.2.2.

Математически задачу можно сформулировать следующим образом: решить дифференциальные уравнения теплопроводности для промерзшей сверху зоны

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2\left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}\right) + \frac{A(h,\tau)}{C_2\gamma_2} \quad \text{при } 0 < z < h \qquad (6.2.1)$$

и для талой зоны

$$\frac{\partial T_3}{\partial \tau} = a_3\left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}\right) \quad \text{при } h < z < \infty \qquad (6.2.2)$$

при начальном условии

$$T_3(z,0) = T_3 \qquad (6.2.3)$$

и граничных условиях

$$T_2(0,\tau) = T_в; \qquad (6.2.4)$$

$$T_2(h,\tau) = T_3(h,\tau) = T_ф = \text{const}; \qquad (6.2.5)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}\bigg|_{z=h} - \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}\bigg|_{z=h} = L_ф W\gamma \frac{\partial z}{\partial \tau}\bigg|_{z=h}, \qquad (6.2.6)$$

где a — температуропроводность породы, м²/с; λ — ее теплопроводность, Вт/(м·К); T_3 — начальная температура талых пород, °С; W — влажность породы, кг/кг; γ — ее плотность, кг/м³.

Общие решения дифференциальных уравнений (6.2.1) и (6.2.2) ищем в виде:

$$T_2(z,\tau) = A_2 + B_2 \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_2\tau}}\right); \qquad (6.2.7)$$

$$T_3(z,\tau) = A_3 + B_3 \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_3\tau}}\right), \qquad (6.2.8)$$

где $\operatorname{erf}(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^U e^{-U^2} dU$; $\operatorname{erf}(0) = 0$; $\operatorname{erf}(\infty) = 1$; $\operatorname{erf}(-U) = -\operatorname{erf}(U)$.

Подставляя граничное условие (6.2.4) в (6.2.7), получим

$$T_2\big|_{z=0} = A_2 + B_2 \operatorname{erf}\left(\frac{0}{2\sqrt{a_2\tau}}\right) = A_2 + B_2 \operatorname{erf}(0) = A_2 = T_в,$$

откуда

$$A_2 = T_в. \qquad (6.2.9)$$

Подставляя начальное условие (6.2.3) в уравнение (6.2.8), получим

$$T_3\big|_{\tau=0} = A_3 + B_3 \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_3 0}}\right) = A_3 + B_3 \operatorname{erf}(\infty) = A_3 + B_3 = T_3,$$

откуда

$$A_3 = T_3 - B_3. \qquad (6.2.10)$$

С учетом (6.2.9) и (6.2.10) общие решения (6.2.7) и (6.2.8) примут вид

$$T_2(z,\tau) = T_в + B_2 \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_2\tau}}\right); \qquad (6.2.11)$$

$$T_3(z,\tau) = T_3 - B_3 + B_3 \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_3\tau}}\right) = T_3 - B_3\left\{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_3\tau}}\right)\right\} =$$

$$= T_3 - B_3 \operatorname{erf} c\left(\frac{z}{2\sqrt{a_3\tau}}\right), \qquad (6.2.12)$$

где $\operatorname{erf} c(U) = 1 - \operatorname{erf}(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_U^\infty e^{-U^2} dU$.

Согласно (6.2.5) на границе промерзания $T_2 = T_3 = T_ф$, поэтому уравнения (6.2.11) и (6.2.12) при $z = h$ примут вид

$$T_2(z,\tau) = T_в + B_2 \operatorname{erf}\left(\frac{h}{2\sqrt{a_2\tau}}\right) = T_ф = \text{const}; \qquad (6.2.13)$$

$$T_3(z,\tau) = T_3 - B_3 \operatorname{erf} c\left(\frac{h}{2\sqrt{a_3\tau}}\right) = T_ф = \text{const}. \qquad (6.2.14)$$

Так как величины $T_в$, T_3, $T_ф$, a_2 и a_3 есть некоторые постоянные, то уравнения (6.2.13) и (6.2.14) будут справедливы в том случае, если будет выполняться условие

$$\frac{h}{\sqrt{\tau}} = \text{const} = \beta, \qquad (6.2.15)$$

или

$$h = \beta\sqrt{\tau}, \qquad (6.2.16)$$

где β — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость углубления зоны промерзания, м $/\sqrt{c}$.

Подставляя (6.2.16) в (6.2.13) и (6.2.14), получим

$$T_2(z,\tau) = T_в + B_2 \operatorname{erf}\left(\frac{\beta\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a_2\tau}}\right) = T_в + B_2 \operatorname{erf}\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_2}}\right) = T_ф; \tag{6.2.17}$$

$$T_3(z,\tau) = T_3 - B_3 \operatorname{erf} c\left(\frac{\beta\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a_3\tau}}\right) = T_3 - B_3 \operatorname{erf} c\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_3}}\right) = T_ф. \tag{6.2.18}$$

Из (6.2.17) и (6.2.18) соответственно получим

$$B_2 = \frac{T_ф - T_в}{\operatorname{erf}\left(\dfrac{\beta}{2\sqrt{a_2}}\right)}; \tag{6.2.19}$$

$$B_3 = \frac{T_3 - T_ф}{\operatorname{erf} c\left(\dfrac{\beta}{2\sqrt{a_3}}\right)}. \tag{6.2.20}$$

Подставляя (6.2.19) и (6.2.20) соответственно в (6.2.11) и (6.2.12), получим уравнения для оценки поля температур:

в промерзшей зоне

$$T_2(z,\tau) = T_в + (T_ф - T_в)\frac{\operatorname{erf}\left(\dfrac{z}{2\sqrt{a_2\tau}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\dfrac{\beta}{2\sqrt{a_2}}\right)}; \tag{6.2.21}$$

в талой зоне

$$T_3(z,\tau) = T_3 - (T_3 - T_ф)\frac{\operatorname{erf} c\left(\dfrac{z}{2\sqrt{a_3\tau}}\right)}{\operatorname{erf} c\left(\dfrac{\beta}{2\sqrt{a_3}}\right)}. \tag{6.2.22}$$

В уравнениях (6.2.21) и (6.2.22) неизвестен параметр β. Его определим из условия (6.2.6). Прежде чем перейти к определению β, приведем несколько преобразований, которые понадобятся в дальнейшем:

$$\frac{\partial}{\partial\varepsilon}(\operatorname{erf}\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\exp(-\varepsilon^2); \tag{6.2.23}$$

$$\frac{\partial}{\partial\varepsilon}(\operatorname{erf} c{-}\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial z}(1 - \operatorname{erf}\varepsilon) = -\frac{\partial}{\partial z}(\operatorname{erf}\varepsilon) = -\frac{2}{\sqrt{\pi}}\exp(-\varepsilon^2). \tag{6.2.24}$$

При $z = h$ граничное условие (6.2.6) примет вид

$$\lambda_2\frac{\partial T_2(h,\tau)}{\partial z} - \lambda_3\frac{\partial T_3(h,\tau)}{\partial z} = L_ф W\gamma\left.\frac{\partial z}{\partial\tau}\right|_{z=h}. \tag{6.2.25}$$

Возьмем отдельно производные $\partial T_2(h,\tau)/\partial z$ и $\partial T_3(h,\tau)/\partial z$, входящие в уравнение (6.2.25), с учетом значений T_2 и T_3 из (6.2.21) и (6.2.22):

$$\frac{\partial T_2(h,\tau)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left\{T_в + (T_ф - T_в)\frac{\operatorname{erf}[z/(2\sqrt{a_2\tau})]}{\operatorname{erf}[\beta/(2\sqrt{a_2})]}\right\} =$$

$$= \frac{(T_ф - T_в)}{\operatorname{erf}[\beta/(2\sqrt{a_2})]}\frac{\partial}{\partial z}\left\{\operatorname{erf}[z/(2\sqrt{a_2\tau})]\right\} =$$

$$= \frac{(T_\phi - T_в)}{\operatorname{erf}[\beta/(2\sqrt{a_2})]} \left\{ \frac{\partial \left\{ \operatorname{erf}[z/(2\sqrt{a_2\tau})] \right\}}{\partial [z/(2\sqrt{a_2\tau})]} \right\} \frac{1}{2\sqrt{a_2\tau}} =$$

$$= \frac{(T_\phi - T_в)}{\operatorname{erf}[\beta/(2\sqrt{a_2})]} \frac{1}{2\sqrt{a_2\tau}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{4a_2\tau} \right). \quad (6.2.26)$$

При $z = h = \beta\sqrt{\tau}$ выражение (6.2.26) примет вид

$$\frac{\partial T_2(h,\tau)}{\partial z} = \frac{(T_\phi - T_в)}{\sqrt{\pi a_2\tau}\ \operatorname{erf}[\beta/(2\sqrt{a_2})]} \exp\left(-\frac{\beta^2\tau}{4a_2\tau} \right) =$$

$$= \frac{(T_\phi - T_в)}{\sqrt{\pi a_2\tau}\ \operatorname{erf}[\beta/(2\sqrt{a_2})]} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_2} \right). \quad (6.2.27)$$

Аналогично

$$\frac{\partial T_3(h,\tau)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ T_3 + (T_3 - T_\phi) \frac{\operatorname{erf} c\left[z/\left(2\sqrt{a_3\tau}\right) \right]}{\operatorname{erf} c\left[\beta/\left(2\sqrt{a_3}\right) \right]} \right\} =$$

$$= \frac{-(T_3 - T_\phi)}{\operatorname{erf} c[\beta/(2\sqrt{a_3})]} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ 1 - \operatorname{erf}[z/(2\sqrt{a_3\tau})] \right\} =$$

$$= \frac{(T_3 - T_\phi)}{\operatorname{erf} c[\beta/(2\sqrt{a_3})]} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \operatorname{erf}[z/(2\sqrt{a_3\tau})] \right\} =$$

$$= \frac{(T_3 - T_\phi)}{\operatorname{erf} c[\beta/(2\sqrt{a_3})]} \left\{ \frac{\partial \left\{ \operatorname{erf}[z/(2\sqrt{a_3\tau})] \right\}}{\partial [z/(2\sqrt{a_3\tau})]} \right\} \frac{1}{2\sqrt{a_3\tau}} =$$

$$= \frac{(T_3 - T_\phi)}{\operatorname{erf} c[\beta/(2\sqrt{a_3})]} \frac{1}{2\sqrt{a_3\tau}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{4a_3\tau} \right). \quad (6.2.28)$$

При $z = h = \beta\sqrt{\tau}$ выражение (6.2.28) примет вид

$$\frac{\partial T_3(h,\tau)}{\partial z} = \frac{(T_3 - T_\phi)}{\sqrt{\pi a_3\tau}\ \operatorname{erf} c[\beta/(2\sqrt{a_3})]} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_3} \right). \quad (6.2.29)$$

Правая часть уравнения (6.2.25) при $z = h = \beta\sqrt{\tau}$ станет равной

$$L_\phi W\gamma \left. \frac{\partial z}{\partial \tau} \right|_{z=h} = L_\phi W\gamma \frac{\partial}{\partial \tau}(\beta\sqrt{\tau}) = \frac{L_\phi W\gamma\beta}{2\sqrt{\tau}}. \quad (6.2.30)$$

Подставляя (6.2.27), (6.2.29) и (6.2.30) в (6.2.25), получим

$$\lambda_2 \frac{(T_\phi - T_в)}{\sqrt{\pi a_2\tau}\ \operatorname{erf}[\beta/(2\sqrt{a_2})]} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_2} \right) -$$

$$-\lambda_3 \frac{(T_3 - T_\phi)}{\sqrt{\pi a_3\tau}\ \operatorname{erf} c[\beta/(2\sqrt{a_3})]} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_3} \right) = \frac{L_\phi W\gamma\beta}{2\sqrt{\tau}}. \quad (6.2.31)$$

Умножив обе части выражения (6.2.31) на $2\sqrt{\pi\tau}$, получим конечное трансцендентное уравнение для определения коэффициента β:

$$\frac{2\lambda_2(T_\phi - T_в)}{\sqrt{a_2}\ \operatorname{erf}[\beta/(2\sqrt{a_2})]} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_2} \right) -$$

$$-\frac{2\lambda_3(T_3 - T_\phi)}{\sqrt{a_3}\ \operatorname{erf} c[\beta/(2\sqrt{a_3})]} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_3} \right) = L_\phi W\gamma\sqrt{\pi}\beta. \quad (6.2.32)$$

Определив значение β из (6.2.32) как функцию λ_2, a_2, λ_3, a_3, T_ϕ, $T_в$, T_3, L_ϕ, W и γ и принимая во внимание, что $h = \beta\sqrt{\tau}$, можно определить глубину промерзания пород. Кроме того, зная β, согласно (6.2.21) и (6.2.22) можно определить распределение температурного поля соответственно в промерзшей и талой зонах склада-отвала.

6.3
Приближенное решение задачи промерзания связных пород методом Лейбензона

Метод был предложен Л.С. Лейбензоном в 1931 г. Его преимущество по сравнению с методом Стефана заключается в том, что постоянная β [см. (6.2.15)] находится не из сложного трансцендентного выражения, каким является выражение (6.2.32), а из более простого.

Метод Лейбензона заключается в том, что общие решения функций $T_2(z, \tau)$ и $T_3(z, \tau)$ для промерзшего и талого слоев подбираются так, чтобы они удовлетворяли начальным и граничным условиям. Подобранные таким образом функции для промерзшей зоны и талой зоны «сшивают» на границе их раздела, где $T = T_ф$, и решают полученное дифференциальное уравнение относительно глубины промерзания h.

Выбранные функции $T_2(z, \tau)$ и $T_3(z, \tau)$ должны удовлетворять начальным (6.2.3) и граничным (6.2.4)—(6.2.6) условиям и дифференциальным уравнениям соответственно (6.2.1) и (6.2.2).

Рассмотрим тепловую модель задачи в виде, изображенном на рис. 6.2.1.

Общее решение для промерзшей зоны будем искать в виде линейной функции (так как время зимнего периода очень велико)

$$T_2(z,\tau) = T_в + \frac{T_ф + T_в}{h} z, \qquad (6.3.1)$$

а для талой зоны — в виде распределения Гаусса

$$T_3(z,\tau) = T_ф + (T_з - T_ф)\,\mathrm{erf}\frac{z-h}{\sqrt{2a_3\tau}}. \qquad (6.3.2)$$

Согласно (6.3.1) и (6.3.2) градиенты температуры в промерзшем слое и в талом слое на границе их раздела при $z = h$ соответственно будут равны

$$\frac{\partial T_2(z,\tau)}{\partial z} = \frac{T_ф - T_в}{h}; \qquad (6.3.3)$$

$$\frac{\partial T_3(z,\tau)}{\partial z} = \frac{T_з - T_ф}{\sqrt{\pi a_3 \tau}}. \qquad (6.3.4)$$

С учетом (6.3.3) и (6.3.4) граничное условие (6.2.6) примет вид

$$\lambda_2 \frac{T_ф - T_в}{h} - \lambda_3 \frac{T_з - T_ф}{\sqrt{\pi a_3 \tau}} = L_ф W \gamma \frac{\partial z}{\partial \tau}. \qquad (6.3.5)$$

Решением уравнения (6.3.5) относительно h при начальном условии $h(0) = 0$ является выражение (6.2.16), где β определяется из уравнения

$$\lambda_2 \frac{T_ф - T_в}{\beta} - \lambda_3 \frac{T_з - T_ф}{\sqrt{\pi a_3}} = \frac{1}{2} L_ф W \gamma \beta. \qquad (6.3.6)$$

Решение задачи промерзания связных пород на основе приближения Лейбензона более простое, чем на основе задачи Стефана, однако и в этом случае параметр β приходится определять из довольно сложного уравнения (6.3.6), что весьма неудобно в инженерных расчетах.

6.4
Приближенное решение задачи промерзания в складах-отвалах талых связных пород

Как было отмечено ранее, увеличить длительность промывочного сезона при разработке золотоносных аллювиальных пород возможно при создании теплоизолированных складов-отвалов этих пород в талом состоянии в конце предшествующего промывочного сезона с тем расчетом, чтобы начать их промывку в последующем промывочном сезоне сразу же с наступлением положительных температур и появлением талой воды.

Склад-отвал таких пород в предшествующем промывочном сезоне будет сформирован на мерзлых породах с температурой T_0; для многолетнемерзлых пород $T_0 \sim -6$ °С. Естественно, что в этом случае талые породы склада-отвала будут промерзать снизу, начиная с момента формирования склада-отвала. Промерзание же талых пород склада-отвала сверху начнется с момента наступления отрицательных температур в предшествующем промывочном сезоне.

Здесь и далее будет использоваться приближенный, предложенный автором инженерный метод оценки промерзания связных пород.

Сущность метода заключается в том, что задача по определению высоты промерзания талых пород склада-отвала снизу h_c и сверху $h_в$ разбивается на два этапа. На первом этапе определяется глубина проникновения изотермы $T = T_ф$ при допущении, что породы склада-отвала не содержат влаги. На втором этапе полученное значение глубины промерзания уточняется с учетом того, что часть холода затрачивается на фазовый переход «вода—лед». При этом аналитические рассуждения будем иллюстрировать примерами применительно к аллювиальным золотоносным породам для условий Северо-Востока России.

Для определения высоты промерзания талых аллювиальных пород склада-отвала снизу h_c и сверху $h_в$ рассмотрим тепловую модель процесса, изображенную на рис. 6.4.1. При расчете высоты h_c за начало отсчета примем основание склада-отвала, расположенное на многолетнемерзлых породах с температурой $T_0 \sim -6$ °С. Ось распространения фронта промерзания снизу x направим вверх.

При расчете высоты $h_в$ за начало отсчета примем поверхность склада-отвала, а ось распространения фронта промерзания сверху (z) направим вниз. Сначала определим высоту промерзания пород склада-отвала снизу (h_c)

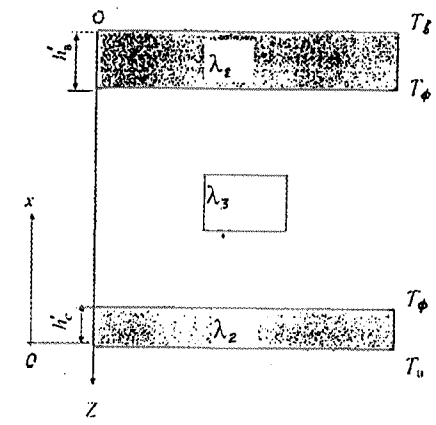


***Рис. 6.4.1.** Схема для расчета промерзания пород в складе-отвале сверху на глубину $h_в$ и снизу на высоту h_c*

за промежуток времени τ_c. Этот промежуток времени равен периоду с момента формирования склада-отвала талых пород в предшествующий промывочный сезон (начало сентября) до момента начала последующего промывочного сезона (конец мая).

Для определения высоты промерзания пород склада-отвала снизу необходимо решить следующее дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_з \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \qquad (6.4.1)$$

при начальных условиях

$$T(\tau = 0) = T_з \sim 10\ °С \qquad (6.4.2)$$

и граничных условиях

$$T(x = 0) = T_0 \sim -6\ °С. \qquad (6.4.3)$$

Решение дифференциального уравнения (6.4.1) при начальных (6.4.2) и граничных (6.4.3) условиях имеет вид

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_з - T_0} = 1 - \operatorname{erf} c \frac{1}{2\sqrt{Fo}}, \qquad (6.4.4)$$

где θ — безразмерная температура; $a_з$ — температуропроводность талых аллювиальных пород, $a_з = 0{,}65 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $T_з$ — температура талых пород в складе-отвале, $T_з \sim$

~ 10 °С; T_0 — температура многолетнемерзлых аллювиальных пород, $T_0 \sim -6$ °С.

$$\operatorname{erf} c(u) = 1 - \operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^{\infty} e - y^2 dy, \qquad (6.4.5)$$

где y — переменная интегрирования;

$$\mathrm{Fo} = \frac{a_3 \tau_c}{x^2} \text{ — критерий Фурье,} \qquad (6.4.6)$$

x — текущая глубина промерзания снизу, м; τ_c — время стояния склада-отвала, с; $\tau_c = 8 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3600 = 20736 \cdot 10^3$ с.

Согласно поставленной задаче необходимо определить глубину промерзания снизу h_c за период с 01.09 по 31.05. При указанных условиях температура на высоте h_c снизу должна быть равна температуре промерзания воды $T_ф$. Тогда (6.4.4) примет вид

$$\theta = \frac{T_ф - T_0}{T_з - T_0} = 1 - \operatorname{erf} c \frac{1}{2\sqrt{\mathrm{Fo}}}, \qquad (6.4.7)$$

или

$$\frac{0+6}{10+6} = 0{,}375 = 1 - \operatorname{erf} c \frac{0{,}5}{\sqrt{\mathrm{Fo}}}. \qquad (6.4.8)$$

Для соблюдения тождества в (6.4.8) необходимо, чтобы

$$\operatorname{erf} c \frac{0{,}5}{\sqrt{\mathrm{Fo}}} = 0{,}626. \qquad (6.4.9)$$

Используя таблицы для функции erf c, можно показать, что условие (6.4.9) соответствует случаю, когда

$$\frac{0{,}5}{\sqrt{\mathrm{Fo}}} = 0{,}34,$$

откуда $\sqrt{\mathrm{Fo}} = \frac{0{,}5}{0{,}34} = 1{,}47$, или $\mathrm{Fo} = 2{,}16$.

Согласно (6.4.6) имеем

$$\mathrm{Fo} = \frac{a_3 \tau_c}{h_c^2} = 2{,}16.$$

С учетом того что $\tau_c = 20{,}736 \cdot 10^6$ с и $a_3 = 0{,}65 \cdot 10^{-6}$ м²/с, высота промерзания пород склада-отвала снизу (h_c) будет равна

$$h_c = \sqrt{\frac{0{,}65 \cdot 10^{-6} \cdot 20{,}736 \cdot 10^6}{2{,}16}} = 2{,}5 \text{ м.} \qquad (6.4.10)$$

Высота промерзания склада-отвала аллювиальных пород снизу h_c определена с некоторой некорректностью, которая заключается в том, что не учтен факт фазового перехода «вода—лед» на границе $x = h_c$, при котором выделяется тепло. Теплота этого фазового перехода $L_ф$ равна $3{,}32 \cdot 10^5$ Дж/кг. Если же учесть эту теплоту, то истинная высота промерзания снизу h_c' будет равна глубине h_c, умноженной на коэффициент $K_ф$, характеризующий, во сколько раз количество холода $Q_{ох}$, затраченного на охлаждение единичной поверхности талой породы снизу от температуры $T_ф$ до T_0, будет больше или меньше, чем количество холода, требуемого на компенсацию теплоты фазового перехода «вода—лед» $Q_ф$.

Этот коэффициент для пористой породы при полном ее водонасыщении будет равен

$$K_ф = \frac{Q_{ох}}{Q_ф} = \frac{h_c C_2 \rho_п (T_ф - T_0)}{2 h_c \rho_в L_ф W} = \frac{C_2 \rho_п (T_ф - T_0)}{2 \rho_в L_ф W}, \qquad (6.4.11)$$

где C_2 — удельная теплоемкость мерзлых пород, Дж/(кг·К),

$$C_2 = C_л \frac{W}{W+1} + C_c \frac{1}{W+1};$$

$C_л$ — удельная теплоемкость льда, $C_л = 2{,}9 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); C_c — удельная теплоемкость скелета аллювиальных пород, $C_c \approx 0{,}8 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $\rho_п$ — плотность аллювиальных по-

род; при пористости П = 30 % и их полном влагонасыщении

$$\rho_{п} = 0{,}3\rho_{п} + 0{,}7\rho_{п} = 0{,}3 \cdot 10^3 + 0{,}7 \cdot 2{,}5 \cdot 10^3 = 2{,}05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3;$$

$\rho_{в}$ — плотность воды, $\rho_{в} = 10^3$ кг/м^3; $\rho_{с}$ — плотность скелета породы, $\rho_{с} \approx 2{,}5 \cdot 10^3$ кг/м^3; W — весовая влажность пород (отношение веса воды к весу скелета в единице объема породы), при пористости П = 30 % и полном влагонасыщении

$$W = \frac{0{,}3\rho_{в}}{0{,}7\rho_{с}} = \frac{0{,}3 \cdot 10^3}{0{,}7 \cdot 2{,}5 \cdot 10^3} = 0{,}17.$$

При этом

$$C_2 = 2{,}9 \cdot 10^3 \frac{0{,}17}{0{,}17+1} + 0{,}8 \cdot 10^3 \frac{1}{0{,}17+1} = 1{,}1 \cdot 10^3 \text{ (Дж/(кг· К).}$$

Принимая во внимание численные значения параметров, входящих в формулу (6.4.11), получим значение коэффициента $K_{ф}$:

$$K_{ф} = \frac{1{,}1 \cdot 10^3 \cdot 2{,}05 \cdot 10^3 (0+6)}{2 \cdot 10^3 \cdot 3{,}32 \cdot 10^5 \cdot 0{,}17} = 0{,}12.$$

С учетом коэффициента $K_{ф}$ высота промерзания пород склада-отвала снизу, определенная согласно (6.4.10), будет уточнена:

$$h_{с}' = h_{с} K_{ф} = 2{,}5 \cdot 0{,}12 = 0{,}3 \text{ м.}$$

Для определения глубины промерзания пород склада-отвала сверху ($h_{с}$) за период наиболее низких температур ($T_{в} = -35$ °С) (с начала декабря по конец февраля) необходимо решить следующее дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к тепловой модели, представленной на рис. 6.4.1:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_3 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \qquad (6.4.12)$$

при начальном условии

$$T(\tau = 0) = T_3 \sim 10 \text{ °С} \qquad (6.4.13)$$

и граничном условии

$$T(z = 0) = T_{в} \sim -35 \text{ °С}. \qquad (6.4.14)$$

Решение дифференциального уравнения (6.4.12) при начальных условиях (6.4.13) и (6.4.14) имеет вид

$$\theta = \frac{T - T_{в}}{T_3 - T_{в}} = 1 - \operatorname{erf} c \frac{1}{2\sqrt{\text{Fo}}}, \qquad (6.4.15)$$

где

$$\text{Fo} = \frac{a_3 \tau_3}{z^2}; \qquad (6.4.16)$$

τ_3 — время наибольших отрицательных температур ($T_{в} = -35$ °С) в период с 1 декабря по 29 февраля.

За период τ_3 на глубине промерзания пород отвала сверху ($h_{с}$) температура будет равна температуре $T_{ф} = 0$ °С. С учетом этого выражения (6.4.15) примет вид

$$\theta = \frac{T_{ф} - T_{в}}{T_3 - T_{в}} = 1 - \operatorname{erf} c \frac{1}{2\sqrt{\text{Fo}}}. \qquad (6.4.17)$$

Подставляя численное значение температуры в (6.4.17), получим

$$\frac{0+35}{10+35} = 0{,}7777 = 1 - \operatorname{erf} c \frac{1}{2\sqrt{\text{Fo}}}. \qquad (6.4.18)$$

Откуда

$$\operatorname{erf} c \frac{1}{2\sqrt{\text{Fo}}} = 0{,}2222. \qquad (6.4.19)$$

Используя таблицы для функции erf c, можно убедиться, что условие (6.4.19) соответствует случаю, когда

$$\frac{0,5}{\sqrt{\text{Fo}}} = 0,85,$$

откуда Fo = 0,3457.

Согласно (6.4.16) имеем

$$\frac{a_3 \tau_э}{h_в^2} = 0,3457,$$

откуда при $a_3 = 0,65 \cdot 10^{-6}$ м/с² и при $\tau_э = 3 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3,6 \cdot 10^3$ с получим

$$h_в = \sqrt{\frac{0,65 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3,6 \cdot 10^3}{0,3457}} = 3,82 \text{ м}.$$

Как и в предыдущем случае, при оценке высоты промерзания пород склада-отвала снизу $h_с$ уточним полученную глубину промерзания их сверху $h_в$ с учетом коэффициента $K'_ф$, характеризующего затраты холода на фазовый переход «вода—лед» при промерзании пород склада-отвала сверху.

$$K'_ф = \frac{Q_{ох}}{Q_ф} = \frac{C_2 \rho_п (T_э - T_в)}{2 \rho_в L_ф W} = \frac{1,1 \cdot 10^3 \cdot 2,05 \cdot 10^3 (10 + 35)}{2 \cdot 10^3 \cdot 3,32 \cdot 10^5 \cdot 0,17} = 0,9.$$

Таким образом, с учетом $K'_ф$ истинная глубина промерзания пород склада-отвала сверху ($h_в$) за время $\tau_э$ будет равна

$$h'_в = h_в K'_ф = 3,82 \cdot 0,9 = 3,44 \text{ м}.$$

Сравнивая результат определения глубины промерзания пород склада-отвала сверху, полученный в разд. 6.3 методом приближения Лейбензона ($h_в$ = 3,74 м), с результатом определения этой глубины, полученным в данном разделе ($h_в$ = 3,44 м), можно убедиться, что разница между

ними составляет ±4,36 %. При этом неизвестно, какой из перечисленных методов определения глубины промерзания пород склада-отвала сверху ближе к истине. Однако, учитывая инженерную простоту предложенного нами метода, в дальнейшем им и будем пользоваться.

Независимо от метода определения глубины промерзания пород склада-отвала сверху она значительна и составляет для условий Северо-Востока России 3,4—3,7 м. Из этого следует, что создавать склады-отвалы талых золотоносных пород в предыдущий промывочный сезон для более раннего начала последующего промывочного сезона имеет смысл только в том случае, если будут предприняты какие-либо противопромерзающие мероприятия, например утепление складов-отвалов сверху.

6.5 Предотвращение промерзания талых золотоносных аллювиальных пород в зимний период

Одна из важных задач разработки аллювиальных пород в районах многолетнемерзлых пород (Якутия, Чукотка, Магаданская обл.) — обеспечение более раннего (с момента наступления положительных температур) начала промывочного сезона.

Отрицательная температура воздуха, например, в районе Билибинского ГОКа устанавливается в начале сентября, далее температура воздуха понижается, в зимние месяцы (декабрь, январь, февраль) температура ($T_в$) удерживается на уровне –30 ... –40 °С, далее температура воздуха начинает повышаться и в третьей декаде мая становится положительной.

Из сказанного следует, что с конца мая можно начинать промывочный сезон, если к этому времени будут

подготовлены оттаявшие аллювиальные золотоносные породы.

Технически это возможно осуществить, если оттаявшие за предыдущий летний период золотоносные аллювиальные породы с помощью бульдозеров заскладировать в специальные склады-отвалы, которые затем укрыть теплоизоляционным покрытием.

Для достижения предлагаемой технической цели необходимо определить толщину теплоизоляционного покрытия, достаточную для того, чтобы заскладированные талые золотоносные аллювиальные породы не смерзлись в зимний период.

Для решения этой задачи рассмотрим следующую тепловую модель (рис. 6.5.1): полупространство покрыто теплоизоляционным слоем толщиной d, теплопроводностью λ_1; необходимо, чтобы даже в самые сильные морозы талые породы склада-отвала не промерзали, т. е. d и λ_1 должны быть такими, чтобы на границе $z = d$ температура не понижалась ниже 0 °С ($T_ф$).

Таким образом, при высоте склада-отвала, равной H на момент создания, на его поверхности температура будет положительной, а его основание находится на многолетнемерзлых породах, температура которых равна –6 °С (T_0). В этом случае промерзание талых пород

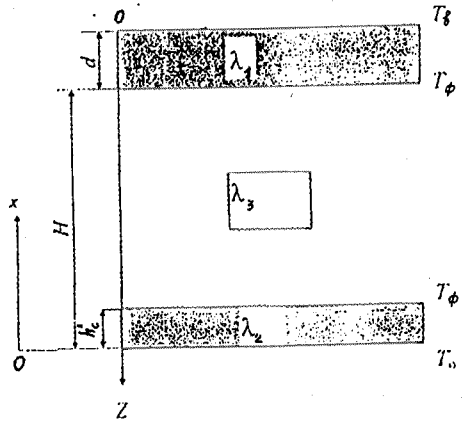


Рис. 6.5.1. *Схема расчета толщины теплоизоляционного покрытия (d) для полного предотвращения промерзания пород в зимнее время*

склада-отвала будет осуществляться только снизу и за период с 1 сентября по 31 мая слой промерзнет на высоту h'_c.

Для решения задачи о полном предотвращении промерзания талых пород склада-отвала необходимо решить дифференциальные уравнения теплопроводности для материала теплоизоляционного покрытия и для талых аллювиальных золотоносных пород в стационарной постановке, так как их сохранность в талом состоянии должна, исходя из технико-экономических соображений, оставаться довольно длительное время (восемь месяцев: с 1.10 по 31.05; из них девяносто дней при $T_в = -30$—40 °С).

В такой постановке дифференциальные уравнения теплопроводности для теплоизоляционного покрытия и для талой породы соответственно будут иметь вид

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} = 0 \quad \text{при} \quad 0 < z < d; \tag{6.5.1}$$

$$\frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} = 0 \quad \text{при} \quad d < z < (H - h'_c), \tag{6.5.2}$$

где T_1 — текущая температура в теплоизоляционном покрытии, °С; z — текущая координата, м; T_3 — текущая температура в талых породах склада-отвала с теплоизоляционным покрытием, °С; d — толщина теплоизоляционного покрытия, м; H — высота отвала, м.

Граничные условия при указанной выше постановке технической задачи можно записать в виде

$$T_1(z = 0) = T_в; \tag{6.5.3}$$

$$T_1(z = d) = T_3(z = d) = T_ф; \tag{6.5.4}$$

$$T_3(z = d + H/2) = T_{H/2}; \tag{6.5.5}$$

$$\lambda_1 \left.\frac{\partial T_1}{\partial z}\right|_{z=d} = \lambda_3 \left.\frac{\partial T_3}{\partial z}\right|_{z=d}, \qquad (6.5.6)$$

где $T_в$ — отрицательная температура воздуха в зимний период, °С; $T_{H/2}$ — температура талых пород отвала на глубине $H/2$, $T_{H/2} \approx 10$ °С; λ_1 — теплопроводность теплоизоляционного покрытия, Дж/(м·с·К); λ_3 — теплопроводность талой породы отвала, Дж/(м·с·К).

После наступления зимнего периода согласно модели, представленной на рис. 6.5.1, и поставленной технической задаче температура на глубине $z = d$ не должна быть ниже температуры замерзания воды $T_ф$.

Характер распределения температуры в теплоизоляционном покрытии и талой породе склада-отвала после наступления морозов будем искать в виде общих решений типа

$$T_1(z) = A_1 + B_1 z; \qquad (6.5.7)$$

$$T_3(z) = A_2 + B_2 z, \qquad (6.5.8)$$

где A и B — постоянные, подлежащие определению.

Подставляя общие решения (6.5.7) и (6.5.8) в граничные условия (6.5.3)—(6.5.6), получим

$$\left.\begin{aligned} &A_1 = T; \\ &A_1 + B_1 d = A_2 + B_2 d; \\ &A_2 + B_2(d + H/2) = T_{H/2}; \\ &\lambda_1 B_1 = \lambda_3 B_2. \end{aligned}\right\} \qquad (6.5.9)$$

Решая совместно систему уравнений (6.5.9), получим

$$\left.\begin{aligned} &T_в + B_1 d = A_2 + B_2 d; \\ &A_2 = T_{H/2} - B_2(d + H/2); \\ &B_2 = B_1(\lambda_1/\lambda_3). \end{aligned}\right\} \qquad (6.5.10)$$

откуда

$$\left.\begin{aligned} &B_1 d = T_{H/2} - B_2(d + H/2) + B_2 d - T_3 = T_{H/2} - T_3 - B_2 \cdot H/2; \\ &B_2 = B_1(\lambda_1/\lambda_3). \end{aligned}\right\} \qquad (6.5.11)$$

Решая совместно систему уравнений (6.5.11), получим

$$B_1 d = (T_{H/2} - T_3) - B_1(\lambda_1/\lambda_3)H/2, \qquad (6.5.12)$$

откуда

$$B_1 = \frac{2\lambda_3(T_{H/2} - T_3)}{2\lambda_3 d + \lambda_1 H}. \qquad (6.5.13)$$

Подставляя значения $A_1 = T_в$ из (6.5.9) и B_1 из (6.5.13) в общее решение (6.5.7), получим уравнение для оценки характера распределения температуры в теплоизоляционном покрытии по его глубине:

$$T_т = T_в + \frac{2\lambda_3(T_{H/2} - T_в)z}{2\lambda_3 d + \lambda_1 H}. \qquad (6.5.14)$$

Если будет выполняться техническое требование о том, что на глубине $z \geq d$ температура в зимний период не должна понижаться ниже температуры промерзания воды $T_ф$, то в соответствии с (6.5.14) при $z = d$ получим

$$T_ф - T_в = \frac{2\lambda_3(T_{H/2} - T_в)d}{2\lambda_3 d + \lambda_1 H}. \qquad (6.5.15)$$

Толщина слоя теплоизоляционного покрытия, при которой будет полностью предотвращено промерзание пород склада-отвала в зимний период, будет равна

$$d = \frac{(T_ф - T_в)\lambda_1 H}{(T_{H/2} - T_ф)2\lambda_3}. \qquad (6.5.16)$$

Условие (6.5.16) справедливо в том случае, если пористое теплоизоляционное покрытие не будет водонасы-

щено и не потеряет своих теплоизоляционных свойств. Для этого его сверху необходимо покрыть водонепроницаемым слоем.

Рассчитаем толщину теплоизоляционного покрытия аллювиальных талых пород склада-отвала, при которой будет полностью предотвращено их промерзание.

Исходные данные: H = 10 м; $T_ф$ = 0 °С; $T_в$ = –40 °С; $T_{H/2}$ = 10 °С; λ_1 = 0,04 Дж/(м·с·К); λ_3 = 1,7 Дж/(м·с·К).

$$d = \frac{40}{10}\,\frac{0{,}04 \cdot 10}{2 \cdot 1{,}7} = 0{,}47 \text{ м}.$$

При T_3 = –35 °С; –30 °С; –25 °С; –20 °С необходимая толщина теплоизоляционного покрытия d, обеспечивающая полное предотвращение промерзания талых пород склада-отвала, соответственно будет равна 0,41 м; 0,35 м; 0,294 м; 0,235 м.

Полученные толщины теплоизоляционных покрытий довольно значительны, и их создание потребует существенных затрат, которые могут быть выше экономического выигрыша в связи с более ранним началом промывочного сезона. В этой связи есть смысл допустить промерзание пород в зимний период на складах-отвалах на некоторую глубину сверху, но при этом сэкономить на затратах, связанных с уменьшением толщины теплоизоляционного покрытия.

6.6
Теплоизоляция талых аллювиальных золотоносных пород на складах-отвалах при условии допущения промерзания на заданную глубину

Для решения поставленной задачи рассмотрим модель тепловой задачи (рис. 6.6.1).

На полупространство нанесено теплоизоляционное покрытие толщиной d, теплопроводность этого теплоизоляционного покрытия — λ_1. С момента наступления зимнего периода с температурой $T_в$ при толщине теплоизоляционного покрытия d возможно промерзание талых аллювиальных пород верхней части склада-отвала на глубину $h'_в$. Высота склада-отвала талых пород в момент окончания его формирования в летний период предыдущего промывочного сезона равна H. У основания отвала, т.е. на глубине H, сохраняется температура T_o многолетнемерзлых пород: T_o = –6 °С.

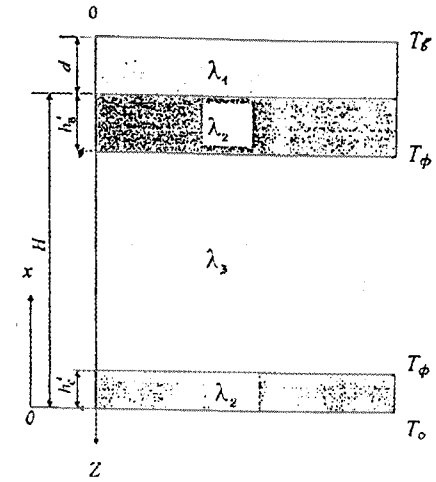


Рис. 6.6.1. *Схема для расчета толщины теплоизоляционного покрытия d при допустимости промерзания пород склада-отвала сверху на глубину $h'_в$*

После теплоизоляции талых пород склада-отвала и наступления зимнего периода произойдет промерзание отвала на допустимую глубину сверху ($h'_в$) и на некоторую высоту снизу (h'_c) (см. рис. 6.6.1).

Расчет высоты промерзания отвала снизу (h'_c) за зимний период приведен ранее; для условий Северо-Востока России h'_c = 0,3 м.

Для определения необходимой толщины теплоизоляционного покрытия при допустимой глубине промерзания сверху ($h'_в$) необходимо решить дифференциальные уравнения теплопроводности для трех зон: теплоизоляционного покрытия (его параметры будем обозначать индексом 1), частично промерзшего верхнего слоя отвала толщиной $h'_в$ (его параметры будем обозначать индексом 2) и талых золотоносных аллювиальных пород отвала (его параметры будем обозначать индексом 3).

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} = 0 \quad \text{при } 0 < z < d; \qquad (6.6.1)$$

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} = 0 \quad \text{при} \quad 0 < z < d + h'_в; \tag{6.6.2}$$

$$\frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} = 0 \quad \text{при} \quad d + h'_в < z < d + H/2. \tag{6.6.3}$$

Распределение температур в указанных трех зонах будем искать в виде общих решений.

$$T_1(z) = A_1 + B_1 z, \tag{6.6.4}$$

$$T_2(z) = A_2 + B_2 z, \tag{6.6.5}$$

$$T_3(z) = A_3 + B_3 z \tag{6.6.6}$$

для условий установившегося режима при граничных условиях первого рода:

$$T_1(z = 0) = T_в; \tag{6.6.7}$$

$$T_1(z = 0) = T_2(z = d); \tag{6.6.8}$$

$$\lambda_1 \left.\frac{\partial T_1}{\partial z}\right|_{z=d} = \lambda_2 \left.\frac{\partial T_2}{\partial z}\right|_{z=d}; \tag{6.6.9}$$

$$T_2(z = d + h'_в) = T_3(z = d + h'_в) = T_ф; \tag{6.6.10}$$

$$\lambda_2 \left.\frac{\partial T_2}{\partial z}\right|_{z=d} = \lambda_3 \left.\frac{\partial T_3}{\partial z}\right|_{z=d}; \tag{6.6.11}$$

$$T_3(z = d + H/2) = T_{H/2}, \tag{6.6.12}$$

где A_1, B_1, A_2, B_2, A_3, B_3 — коэффициенты, подлежащие определению; λ_1, λ_2, λ_3 — теплопроводность соответственно теплоизоляционного покрытия, мерзлого слоя и талого слоя золотоносных аллювиальных пород, Дж/(м·с·К).

Граничное условие (6.6.9) является некорректным, так как в нем не учтена теплота фазового перехода на границе $z = d + h'_в$. Эта некорректность будет устранена ниже.

Подставляя общие решения (6.6.4)—(6.6.6) в граничные условия (6.6.7), получим

$$A_1 = T_в; \tag{6.6.13}$$

$$A_1 + B_1 d = A_2 + B_2 d; \tag{6.6.14}$$

$$\lambda_1 B_1 = \lambda_2 B_2; \tag{6.6.15}$$

$$A_2 + B_2(d + h'_в) = A_3 + B_3(d + h'_в) = T_ф; \tag{6.6.16}$$

$$\lambda_2 B_2 = \lambda_3 B_3; \tag{6.6.17}$$

$$A_3 + B_3(d + H/2) = T_{H/2}. \tag{6.6.18}$$

Выражение (6.6.18), не меняя его физической сущности, можно представить в виде

$$A_3 + B_3\left(d + h'_в + \frac{H}{2} - h'_в\right) = T_{H/2},$$

или

$$A_3 + B_3(d + h'_в) + B_3\left(\frac{H}{2} - h'_в\right) = T_{H/2}.$$

С учетом (6.6.16) из последнего выражения можно определить коэффициент B_3:

$$B_3 = \frac{T_{H/2} - T_ф}{\frac{H}{2} - h'_в}. \tag{6.6.19}$$

Из (6.6.17) с учетом (6.6.19) получим

$$B_2 = B_3\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right) = \frac{T_{H/2} - T_ф}{\frac{H}{2} - h'_в}\lambda_{3/2}, \tag{6.6.20}$$

где $\lambda_{3/2} = \lambda_3 / \lambda_2$.

На основании (6.6.15) и с учетом (6.6.20) определим коэффициент B_1.

$$B_1 = B_2\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) = \frac{T_{H/2} - T_\phi}{\frac{H}{2} - h'_в}\lambda_{3/2}\lambda_{2/1}, \qquad (6.6.21)$$

где $\lambda_{2/1} = \lambda_2 / \lambda_1$.

Из граничных условий (6.6.14) с учетом (6.6.13), (6.6.19) и (6.6.21) получим

$$A_2 = A_1 + B_1 d - B_2 d,$$

или

$$A_2 = T_в + \frac{T_{H/2} - T_\phi}{\frac{H}{2} - h'_в}\lambda_{3/2}\lambda_{2/1} d - \frac{T_{H/2} - T_\phi}{\frac{H}{2} - h_в}\lambda_{3/2} d. \qquad (6.6.22)$$

Из граничных условий (6.6.18) имеем

$$A_3 = T_{H/2} - B_3\left(d + \frac{H}{2}\right),$$

или с учетом (6.6.19)

$$A_3 = T_{H/2} - \frac{T_{H/2} - T_\phi}{\frac{H}{2} - h'_в}\left(d + \frac{H}{2}\right). \qquad (6.6.23)$$

Проведем так называемую операцию сшивания решений (6.6.5) и (6.6.6) на границе $d = h'_в$, т.е.

$$A_2 + B_2 z\big|_{z=d+h'_в} = A_3 + B_3 z\big|_{z=d+h'_в}.$$

В результате с учетом (6.6.22), (6.6.23), (6.6.19) и (6.6.20) получим

$$T_в + \frac{T_{H/2} - T_\phi}{\frac{H}{2} - h'_в}\lambda_{3/2}\lambda_{2/1} d - \frac{T_{H/2} - T_\phi}{\frac{H}{2} - h'_в}\lambda_{3/2} d +$$

$$+ \frac{T_{H/2} - T_\phi}{\frac{H}{2} - h'_в}\lambda_{3/2}(d + h'_в) =$$

$$= T_{H/2} - \frac{T_{H/2} - T_\phi}{\frac{H}{2} - h'_в}\left(d + \frac{H}{2}\right) + \frac{T_{H/2} - T_\phi}{\frac{H}{2} - h'_в}\lambda_{3/2}(d + h'_в),$$

(6.6.24)

откуда после преобразования окончательно получим

$$d = \frac{(T_{H/2} - T_3)\lambda_1}{(T_{H/2} - T_\phi)\lambda_3}\left(\frac{H}{2} - h'_в\right) - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}h'_в - \frac{\lambda_1}{\lambda_3}\left(\frac{H}{2} - h'_в\right). \qquad (6.6.25)$$

Как было сказано выше, некорректность граничного условия (6.6.17), естественно, сказалась на полученном результате для оценки толщины теплоизоляционного покрытия, определяемой согласно (6.6.25).

Для того чтобы устранить некорректность решения (6.6.25), в него надо ввести коррективы, а именно: значение полученной толщины теплоизоляционного покрытия d необходимо умножить на некоторый коэффициент K''_ϕ, характеризующий уменьшение необходимой толщины теплоизоляционного покрытия, так как часть холода при промерзании аллювиальных талых пород в отвале на глубину $h'_в$ расходуется на теплоту фазового перехода «вода—лед». Этот фазовый переход является экзотермическим, т.е. происходит с выделением тепла, причем теплота этого фазового перехода сравнительно велика: L_ϕ = 3,23·10^5 Дж/кг.

Численное значение K''_ϕ определим по формуле

$$K''_{\phi} = \frac{C_2 \rho_{\text{п}} \left(T_{\phi} - T\big|_{z=d}\right)}{2\rho_{\text{в}} L_{\phi} W}, \qquad (6.6.26)$$

где $T\big|_{z=d} = (T_{\text{з}} - T_{\phi})/2 = -35/2 = -17{,}5$ °С.

При этом

$$K''_{\phi} = \frac{1{,}1 \cdot 10^3 \cdot 2{,}05 \cdot 10^3 \cdot 17{,}5}{2 \cdot 10^3 \cdot 3{,}32 \cdot 10^5 \cdot 0{,}17} = 0{,}35 \text{ при } T_{\text{в}} = -35 \text{ °С}.$$

При $T_{\text{в}} = -30$ °С; -25 °С; -20 °С; -15 °С и -10 °С соответственно $K''_{\phi} = 0{,}3$; 0,25; 0,2; 0,15 и 0,1.

С учетом этого истинное значение толщины теплоизоляционного покрытия d', необходимой при допустимой глубине промерзания аллювиальных пород отвала сверху за зимний период на величину $h'_{\text{в}}$, будет равно

$$d' = \left[\frac{(T_{H/2} - T_{\text{в}})\lambda_1}{(T_{H/2} - T_{\phi})\lambda_3}\left(\frac{H}{2} - h'_{\text{в}}\right) - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} h'_{\text{в}} - \frac{\lambda_1}{\lambda_3}\left(\frac{H}{2} - h'_{\text{в}}\right)\right] K''_{\phi}. \qquad (6.6.27)$$

Расчет значений d и d' при различных значениях $T_{\text{в}}$ и $h'_{\text{в}}$ (при $T_{H/2} = 10$ °С) приведен в табл. 6.6.1.

Расчет проведен при следующих значениях параметров, входящих в формулу (6.6.25): $H = 10$ м; $\lambda_1 = 0{,}04$ Дж/(м × × с·К); $\lambda_2 = 2$ Дж/(м·с·К); $\lambda_3 = 1{,}7$ Дж/(м·с·К).

Анализ результатов, полученных по формуле (6.6.27), показывает, что, например, для региона Билибинского ГОКа при $T_{\text{з}} = -35$ °С при условии допущения промерзания талых пород сверху склада-отвала в зимний период на глубину 0,1 м достаточно сформировать на его поверхности теплоизоляционный слой толщиной 14—15 см, а при условии допущения промерзания на глубину 0,5 м достаточная толщина теплоизоляционного слоя равна 12—13 см.

Из чисто практических соображений (возможность механического разрыхления промерзшего слоя бульдозером

Таблица 6.6.1

$T_{\text{з}}$, °С	$T_{\text{в}}$, °С						
	–40	–35	–30	–25	–20	–15	–10
				$h'_{\text{в}} = 0{,}1$ м			
d, м	0,4589	0,4011	0,3438	0,2865	0,2286	0,1708	0,113
d', м	0,1836	0,1404	0,1031	0,0573	0,0457	0,0256	0,0113
				$h'_{\text{в}} = 0{,}2$ м			
d, м	0,4476	0,3909	0,3348	0,2786	0,222	0,1653	0,1087
d', м	0,179	0,1368	0,1004	0,0696	0,0444	0,0248	0,0109
				$h'_{\text{в}} = 0{,}3$ м			
d, м	0,4361	0,3807	0,3257	0,2707	0,2152	0,1598	0,1043
d', м	0,1744	0,1332	0,0977	0,0676	0,043	0,0239	0,0104
				$h'_{\text{в}} = 0{,}4$ м			
d, м	0,4365	0,3705	0,3167	0,2628	0,2086	0,1543	0,1
d', м	0,1706	0,1297	0,095	0,0657	0,0417	0,0231	0,01
				$h'_{\text{в}} = 0{,}5$ м			
d, м	0,4133	0,3602	0,3075	0,2649	0,2018	0,1487	0,0956
d', м	0,1653	0,126	0,0922	0,0662	0,0404	0,0223	0,0096

в начале промывочного сезона в конце мая) следует остановиться на допустимой глубине промерзания отвалов талых аллювиальных пород сверху, равной 0,3—0,4 м. При этой допустимой глубине промерзания необходимая толщина теплоизоляционного покрытия должна быть равна 13—13,5 см.

6.7 Способы предохранения связных пород от промерзания

Все способы предохранения от промерзания можно разделить на две группы: 1) затопление водой, рыхление, снегозадержание; 2) применение искусственных теплоизоляционных покрытий.

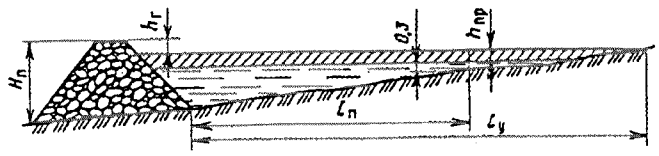


Рис. 6.7.1. *Схема предохранения промерзания связных пород при их затоплении водой:*
$H_п$ — высота плотины; $h_г$ — перепад между высотой плотины и уровнем затопления воды; $h_{пр}$ — толщина промерзания воды; $L_п$ — длина участка, где предотвращается промерзание пород; $L_у$ — общая длина участка затопления

Затопление поверхности предохраняемых участков водой (рис. 6.7.1) применяется в умеренно суровых климатических условиях при среднегодовой температуре воздуха не ниже –4—5 °С (Восточная Сибирь, Забайкалье, Южная Якутия). Такое затопление наиболее целесообразно для применения в нешироких (до 300—600 м) долинах, имеющих небольшой продольный уклон. Породы должны быть слабопроницаемы для воды и обеспечивать возможность длительного сохранения заданного уровня.

Необходимое условие предохранения от промерзания затоплением водой – наличие слоя не промерзшей воды непосредственно на поверхности предохраняемых пород в течение всего времени предохранения. Толщина этого слоя должна быть не менее 0,3 м над самым высоким местом. Основные расходы при этом способе предохранения связаны со строительством плотин и дамб. Поэтому область применения способа ограничена не только суровостью климата, но и размерами и рельефом поверхности затопляемого участка. Принято считать, что высота плотин должна быть в пределах 5—10 м, иначе способ становится слишком дорогим. Область его применения ограничивается также фильтрационной способностью пород, из которых выкладываются дамбы и плотины, а также пород, предохраняемых от промерзания.

При значительной фильтрации воды из котлована приходится искусственно поддерживать ее уровень подкачкой или самотеком из ближайших водоемов. Это не всегда возможно, особенно к концу зимнего периода. Поэтому разработаны специальные мероприятия, снижающие фильтрацию через плотины и основания. В частности, довольно широкое применение находят химическая кольматация и создание противофильтрационных экранов. При коэффициенте фильтрации пород до 40—50 м/сут целесообразна химическая кольматация, при 50—350 м/сут — пленочные экраны.

С целью снижения фильтрации пород плотины предусматривают пленочную защиту в ее теле (рис. 6.7.2).

Чтобы была обеспечена максимальная противофильтрационная защита, зуб должен достигать мерзлоты, а длина понура составлять 40—50 м (см. рис. 6.7.2). Можно считать предохранение от промерзания затоплением весьма перспективным способом, область применения которого может быть в дальнейшем несколько расширена.

Рыхление и осушение поверхностного слоя горных пород (создание теплоизоляционного слоя из рыхлой сухой породы). Поверхностный слой при этом должен быть сложен крупнозернистыми породами, хорошо отдающими воду. Применяется в условиях умеренно сурового климата. Глубина рыхления 0,2—0,5 м. Рыхление производится при помощи навесных или прицепных тракторных рыхлителей. При рыхлении образуются в породе дополнительные поры, заполненные воздухом, что резко снижает теплопроводность этих пород. Если предохранять необходимо крупноскелетные рыхлые породы с большим коэффициентом филь-

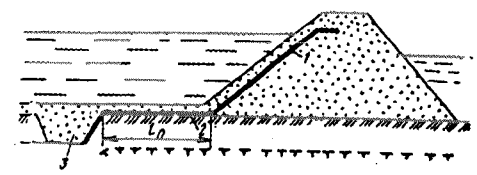


Рис. 6.7.2. *Устройство противофильтрационной пленочной завесы в плотине:*
1 — пленочная завеса; *2* — понур; *3* — зуб плотины; $l_п$ — длина понура

трации, то верхний, разрыхленный слой может быть дополнительно осушен за счет проведения сети канав глубиной, несколько превышающей глубину рыхления. Такое осушение особенно целесообразно, когда можно обеспечить остаточную влажность породы не более 10—12 %. Грунтовые воды при этом должны залегать на глубине, на 20—25 % превышающей глубину рыхления. При необходимости возможно понижение их уровня с помощью более глубоких канав. Этот способ предохранения от промерзания не нашел широкого применения в суровых климатических условиях Северо-Востока России прежде всего потому, что теплопроводность разрыхленных мерзлых галечников снижается здесь недостаточно. Кроме того, для рыхления на значительную глубину необходимо использовать мощную технику, которая, как правило, всегда бывает нужнее для других работ. Тем не менее в достаточно благоприятных условиях способ может применяться, но как вспомогательный.

Накопление снежного покрова (снегозадержание). Способ целесообразен при возможности создания снежного покрова толщиной более 0,7—0,8 м в районах со сравнительно мягким климатом и сильными ветрами.

Снегозадержание производят при помощи специальных решетчатых щитов размером примерно 1,5×2 м, устанавливаемых рядами поперек господствующего направления ветра. Расстояние между рядами щитов принимают равным 10—15-кратной высоте щита. Способ может быть эффективен там, где действуют достаточно сильные ветры. Снеговой покров, как правило, также является вспомогательным способом борьбы с промерзанием. Например, он может сочетаться с предохранением при помощи щитов из пенополистирола.

Применение искусственных покрытий из пенополистирольных щитов. Способ пригоден для любых, в том числе самых суровых климатических условий. Необходима ровная поверхность предохраняемого участка. Может быть экономически эффективен только при многоразовом применении теплоизоляционных щитов.

Щиты из пенополистирола, имеющие в плане форму шестиугольников с длиной грани 1 м и общей площадью от 2 до 2,6 м каждый, укладываются вплотную по всей предохраняемой поверхности (рис. 6.7.3). Стандартный щит имеет толщину около 15 см и весит около 7 кг. Укладку щитов производят на специально подготовленную выровненную поверхность. Поверх щитов укладывают полиэтиленовую пленку. Щиты, расположенные на границах участка предохранения, обваловывают и присыпают сверху галечником. Настилка и уборка щитов производятся вручную. За 7-часовую смену два человека могут покрыть щитами площадь в 1000 м². Снежный покров поверх щитов усиливает теплоизоляционный эффект. Сами щиты изготавливаются в специальных пресс-формах из гранулированного вспенивающегося полистирола. Расчет показывает, что этот способ предохранения от промерзания может быть экономически эффективным в том случае, если одни и те же щиты используются в течение нескольких лет. Именно это обстоятельство и ограничивает масштабы их применения.

Практикой установлено, что щиты из пенополистирола могут применяться в самых суровых климатических условиях. Слой пенополистирола толщиной 30 см сокращает промерзание до 1 м даже там, где оно без предохранения достигает 4—5 м.

Покрытие водовоздушными пенами (ВВП) и быстротвердеющими пенами (БТП). Способ может применяться в любых условиях, но наиболее эффективен в умеренно климатичес-

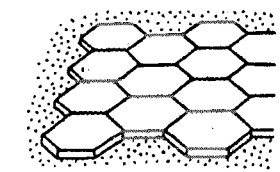


Рис. 6.7.3. *Схема утепления пенополистирольными щитами*

кой зоне. Основное преимущество — возможность механизации работ по покрытию пеной предохраняемых участков. В настоящее время этот способ представляется наиболее перспективным.

Основное его преимущество — возможность механизации работ по покрытию полигона пеной. Этот способ не требует такого тщательного выравнивания предохраняемой площади и обеспечивает вполне приемлемые результаты предохранения. Поэтому способ является наиболее современным и перспективным. Для получения водовоздушной пены необходимы эмульгатор «Волгонат», во-да и сжатый воздух.

Водовоздушные пены наносят на поверхность предохраняемых от промерзания пород с началом отрицательных температур (примерно 8—10 °С).

Нанесение слоев водовоздушной пены на утепляемую поверхность пород производят поочередно тонкими (3—5 см) слоями. Очередной слой наносят после того, как замерз предыдущий слой.

В качестве *теплоизоляционных материалов* используются *быстротвердеющие пены* (*БТП*), приготовленные на основе мочевиноформальдегидных смол. Синтетическую пену наносят на предохраняемую поверхность заблаговременно, в период с положительными температурами воздуха. При влажном климате и частых оттепелях в зимний период поверхность теплоизоляционного покрытия необходимо изолировать сверху водонепроницаемой пленкой.

В районах с суровым климатом для усиления теплоизоляционных качеств покрытий из БТП их сверху покрывают водовоздушными замерзающими пенами (пенолед). Пенолед наносят при температуре не выше –8 ... –9 °С.

БТП получают непосредственно в полевых условиях. В их состав входят любые типы мочевиноформальдегидных смол, поверхностно-активные вещества (ПАВ), отвердитель и вода.

Пенолед изготавливают из ПАВ и воды. В качестве отвердителя применяют соляную, щавелевую или ортофосфорную кислоту. В качестве ПАВ наиболее часто применяют жидкие пожарные пенообразователи.

Состав БТП: мочевиноформальдегидная смола — 35 %, слабоконцентрированный раствор (4—5 %), кислоты — 16 %, жидкий пенообразователь — 2—4 % и вода — 4—5 %.

Для изготовления 100 м³ БТП кратностью 20 на основе смолы М 19-62 ее требуется 1700 кг, сухой щавелевой кислоты — 40 кг, пенообразователя типа ПО-1А — 200 л и воды — 4800 л. Под кратностью понимается число, показывающее, во сколько раз объем БТП больше суммарного объема исходных веществ. Возможная кратность достигает 60.

Установки для получения БТП в полевых условиях состоят из грузового автомобиля и компрессора. В кузове автомобиля смонтированы емкости для исходных веществ, которые с необходимым расходом с помощью насоса подают в смеситель, где рабочую смесь вспенивают, и образующейся пеной покрывают поверхность складов-отвалов. Для предотвращения затвердевания пены в выходных магистралях смеситель устанавливают возможно ближе к выходному соплу. Смеситель и выходное сопло необходимо изготавливать из нержавеющей стали для предотвращения их быстрой коррозии.

Для установок производительностью до 0,03 м³/с необходим компрессор производительностью не менее 0,05 м³/с и давлением $6 \cdot 10^5$ Па. Насосы для подачи исходных компонентов должны быть производительностью не менее $(5—8)10^{-4}$ м³/с.

Время отверждения пены составляет 20—30 мин, усадка пены не превышает 10—15 %. Покрытие пеной рабо-

чих площадок рекомендуется производить слоями толщиной 5—6 см. Покрытие очередным слоем допускается только после затвердевания предыдущего слоя, т.е. не ранее чем через 30 мин.

Нанесение пены рекомендуется производить при ясной и безветренной погоде. При выпадении осадков и скорости ветра более 12—15 м/с работы по покрытию пеной рабочих площадок проводить запрещается.

Гидроизоляцию БТП осуществляют разливом по ее поверхности карбамидной смолы слоем 3—5 мм, которая затвердевает самостоятельно, или набрызгом битумной эмульсии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stefan.* Monatsschrifte fur Mathem und Phus. 1,1 (1890).

2. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности: Учебник. — М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1952. — 392 с.

3. *Гольдман В.Г., Знаменский В.В., Чистопольский С.Д.* Гидравлическое оттаивание мерзлых горных пород: Труды ВНИИ-1, 1970. — 440 с.

4. *Дмитриев А.П., Гончаров С.А.* Термодинамические процессы в горных породах: Учебник. — М.: Недра, 1990. — 360 с.

5. *Смолдырев А.Е.* Трубопроводный транспорт. — М.: Недра, 1980.

6. *Нурок Г.А.* Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ. — М.: Недра, 1979.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 5

Глава 1
ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СВЯЗНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД 11

1.1. Инженерно-геокриологическая характеристика многолетнемерзлых горных пород 13
1.2. Подготовка многолетнемерзлых пород к разработке 17
1.3. Физические свойства мерзлых пород 26

Глава 2
ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВОДОВОДАХ 35

2.1. Физические свойства воды 37
2.2. Гидравлические элементы потока 39
2.3. Энергия потока 41
2.4. Основное уравнение гидродинамики 44
2.5. Уравнение Бернулли, гидравлический и пьезометрический уклоны 46
2.6. Потери напора и режимы движения потока 49
2.7. Истечение жидкости из насадок 54

Глава 3
РАЗРАБОТКА ЗОЛОТОНОСНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ СВЯЗНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ПРОМЫВКИ 57

3.1. Гидросмеси и их параметры 59
3.2. Условия, обеспечивающие движение частиц горной массы в потоке пульпы 62
3.3. Распределение весовой концентрации твердой фракции по высоте потока гидросмеси в промывочных шлюзах 68
3.4. Режимы и параметры движения пульпы в промывочных шлюзах 70
3.5. Определение длины зоны осаждения частиц золота при движении пульпы в промывочных шлюзах при установившемся режиме 75
3.6. Определение вертикальной составляющей пути осаждения частиц золота на участке неустановившегося режима движения пульпы в промывочном шлюзе 80
3.7. Определение горизонтальной составляющей пути осаждения частиц золота на участке неустановившегося режима движения пульпы в промывочном шлюзе 83

Глава 4
ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОМЫВКИ ПРИ ДОБЫЧЕ РОССЫПНОГО ЗОЛОТА 87

4.1. Гидроэлеваторы 89
4.2. Расчет гидроэлеваторных установок 91
4.3. Гидроэлеваторы с конической и цилиндрической горловиной 101
4.4. Гидромониторы 107
4.5. Гидроэлеваторные приборы 111
4.6. Передвижная гидромониторная промывочная установка (ПГПУ) 121

Глава 5
ИГЛОВАЯ ГИДРООТТАЙКА МЕРЗЛЫХ ЗОЛОТОНОСНЫХ ПОРОД 125

5.1. Механизм и математическая модель процесса гидрооттайки 127
5.2. Параметры теплообмена при гидрооттаивании 135
5.3. Расчет и оптимизация параметров оттайки при работе одиночной гидроиглы 138
5.4. Технические средства и технология игловой гидрооттайки 147

Глава 6
ПРОМЕРЗАНИЕ СВЯЗНЫХ ПОРОД И ЕГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА МЕТОДОМ ПРОМЫВКИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ 155

6.1. Общая постановка задачи 157
6.2. Расчет глубины промерзания связных пород на основе решения Стефана 159
6.3. Приближенное решение задачи промерзания связных пород методом Лейбензона 168
6.4. Приближенное решение задачи промерзания в складах-отвалах талых связных пород 169
6.5. Предотвращение промерзания талых золотоносных аллювиальных пород в зимний период 177
6.6. Теплоизоляция талых аллювиальных золотоносных пород на складах-отвалах при условии допущения промерзания на заданную глубину 182
6.7. Способы предохранения связных пород от промерзания 189

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 197

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СВЯЗНЫХ МНОГОЛЕТНЕ-МЕРЗЛЫХ ПОРОД

Евгений Леонидович **Бельченко**

Режим выпуска «стандартный»

Редактор текста *А.Н. Сытдыкова*
Компьютерная верстка оригинал-макета: *Е.В. Воронцова*
Дизайн переплета: *Е.Б. Капралова*

Диапозитивы изготовлены в Издательстве МГГУ

Подписано в печать 21.11.2000. Формат 60×90/16. Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Times». Печать офсетная. Уч.-изд. л. 15,25. Усл. печ. л. 12,5. Тираж 1200 экз. Заказ 529.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Лицензия на издательскую деятельность ЛР № 062809 от 30.06.98 г.
Код издательства 5Х7(03)

Отпечатано в Московской типографии № 6 Минпечати РФ
109088, Москва, ул. Южнопортовая, 24

Магниевые штампы изготовлены в Первой Образцовой типографии

117935, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 6; Издательство МГГУ; тел. (095) 236-97-80; факс (095) 956-90-40