

С. И. Васильев  
В. Н. Анферов  
В. М. Мелкозеров

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ  
ГРУНТОВ К РАЗРАБОТКЕ  
В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ПРИ ОСВОЕНИИ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ  
ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА

Монография

Институт нефти и газа



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**С. И. Васильев, В. Н. Анферов, В. М. Мелкозеров**

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ГРУНТОВ  
К РАЗРАБОТКЕ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД  
ПРИ ОСВОЕНИИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ  
ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА**

Монография

Красноярск  
СФУ  
2012

УДК 624.13  
ББК 38.58  
В 191

Рецензенты:

*Б. Н. Смоляницкий*, доктор технических наук, профессор заместитель директора ИГД СО РАН;

*Д. С. Воронцов*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизация путевых, погрузочно-разгрузочных и строительных работ» Сибирского государственного университета путей сообщения;

*В. Г. Жубрин*, кандидат технических наук директор СКТБ НИИ-стройдормаш

### **Васильев, С. И.**

В 191

Технология подготовки грунтов к разработке в зимний период при освоении полезных ископаемых Восточно-Сибирского региона: монография / С. И. Васильев, В. Н. Анферов, В. М. Мелкозеров. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012 – 152 с.

ISBN 978-5-7638-2560-2

Монография содержит сведения о физико-механических свойствах сезонно-мерзлых грунтов, температурных режимах промерзания, а также о новейших карбонатных поропластах, применяемых для предохранения грунтов от сезонного промерзания и об изменении температуры утепленных грунтов в зимний период года.

Для специалистов в области проектирования, эксплуатации строительного-дорожных машин горнодобывающего оборудования, магистров направления «Технологические машины и оборудование» и аспирантов специальности 050504.

**УДК 624.13**  
**ББК 38.58**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Вероятностные физико-механические характеристики мерзлых грунтов.....	8
2. Технологии подготовки сезонно-мерзлых грунтов к разработке .....	23
3. Методика расчета эксплуатационных характеристик поропластов ....	37
4. Результаты экспериментальных исследований распределения температуры утепленных грунтов.....	55
5. Физико-механические характеристики карбамидных поропластов ...	69
6. Эксплуатационные свойства карбамидных поропластов .....	71
7. Характеристика исходного сырья для производства карбамидных поропластов.....	75
8. Технология производства карбамидных поропластов .....	89
9. Модификация поропластов .....	92
10. Технологические установки для механизированного приготовления и нанесения карбамидных поропластов на грунт .....	103
11. Утилизация использованного поропласта .....	112
12. Экологическая безопасность карбамидных поропластов, применяемых для утепления грунтов от сезонного промерзания.....	117
13. Экономические аспекты применения карбамидных поропластов для утепления грунтов.....	135
Заключение .....	144
Библиографический список.....	146

## ВВЕДЕНИЕ

Основная часть углеводородных ресурсов страны сосредоточена в Сибири и на Дальнем Востоке. Особенностью пространственно-климатического положения территории Восточной Сибири является наличие пересеченной местности, а также значительный период воздействия низких температур в течение года, что накладывает особые требования к землеройно-транспортным машинам, разрабатывающим грунт на стадии освоения месторождений полезных ископаемых.

Открытие и освоение месторождений полезных ископаемых на территории Восточно-Сибирского региона связано с выполнением большого объема строительных работ, которые в основном ведутся в зонах расположения сезонно-мерзлых и вечномерзлых грунтов. Одной из наиболее острых и актуальных проблем в области экономики России является проблема энергосбережения при проведении рекультивации нарушенных земель. Как правило, указанные мероприятия проводятся в весьма сжатые сроки. Физико-механические характеристики утепленного грунта близки к летним характеристикам, а производительность землеройных машин близка к уровню производительности при летних условиях разработки грунта. В соответствии с Земельным кодексом РФ предприятия, учреждения и организации при разработке полезных ископаемых, проведении геологоразведочных работ, строительных и других работ обязаны после окончания работ привести нарушенные земли и занимаемые земельные участки в состояние, пригодное для дальнейшего их использования по назначению.

Важной составляющей частью практически всех национальных программ перспективного экономического и социального развития в условиях энергетического и экологического кризиса во всем мире и в России является экономия и рациональное использование топливно-энергетических, материальных ресурсов и экологической безопасности.

Эффективная эксплуатация землеройных машин в условиях Восточной Сибири невозможна без детального изучения физико-механических свойств сезонно-мерзлых однородных грунтов и грунтов с каменистыми включениями с учетом зоны распространения сезонного промерзания и температурных профилей промерзания грунтов. В большой степени это объясняется своеобразием грунтовых

условий, сложными пространственно-климатическими условиями, характеризующимися широким распространением мерзлых грунтов и грунтов с каменистыми включениями, недостаточной изученностью характеристик грунта, процесса резания, а также параметров, влияющих на производительность.

Несмотря на то, что в настоящее время создано довольно большое количество типов машин и разнообразие методов, средств механизации и технологий разработки мерзлых грунтов, лишь отдельные из них удовлетворительно работают в районах с холодным климатом. Существующий парк машин отечественного производства и активно внедряемый парк землеройных машин импортного производства не в полной мере удовлетворяют современным техническим и экономическими требованиями строительного производства. Значительный объем земляных работ выполняется с использованием траншейных экскаваторов.

Характерной особенностью земляных работ, производимых в зимнее время, является и значительное их усложнение, связанное с промерзанием грунта. Вследствие этого широко применяемые ныне землеройные машины не в состоянии разработать грунт зимой без предварительной подготовки, если толщина слоя мерзлого грунта превышает определенную величину. Последняя зависит от типа, влажности, плотности и температуры грунта, а также от вида и мощности землеройного оборудования. Экскаватор – прямая лопата с емкостью ковша 0,5–0,8 м<sup>3</sup> может разработать слой мерзлого грунта до 0,25 м, с ковшом емкостью 1 м<sup>3</sup> – 0,4 м, а с ковшом емкостью 3–4 м<sup>3</sup> до 0,5–0,6 м, драглайн с ковшом такой же емкости – до 0,10 м [1]. При разработке грунта скреперами толщина мерзлого слоя не должна превышать 0,05 м, бульдозерами – 0,15 м [4]. В естественных условиях с наступлением устойчивых морозов глубина промерзания превышает указанные выше величины.

Разработка грунта в зоне Восточной Сибири, характеризующейся холодным климатом при промерзании грунта на глубину до 2–3 м и более, связана с большими трудностями. Применяемые технологии предварительного рыхления смерзшегося грунта малоэффективны и, как правило, требуют значительных дополнительных затрат.

В условиях отсутствия специальных высокопроизводительных землеройных машин мерзлые грунты разрабатываются традиционными способами рыхления с помощью навесных рыхлителей, клин-баб, посредством рыхления буровыми установками, буровзрывным спосо-

бом. Указанные способы малоэффективны и весьма дорогостоящи. Более экономичными способами являются способы подготовки грунтов обезвоживанием методом предварительного рыхления, данные методы эффективны в условиях отсутствия обильных осадков, что мало вероятно для условий Восточной Сибири в осенние периоды года.

Современная технология подготовки грунта к разработке в зимних условиях с использованием поликарбонатных порошковых основана на аккумулировании тепловой энергии летнего периода.

Способ утепления грунта от сезонного промерзания теплоизоляционными материалами является простым по технологии и относительно дешевым средством подготовки грунта к зимней разработке [2, 3]. Преимущества его заключаются в том, что покрытие грунта теплоизолятором производится до наступления морозов, что позволит сохранить запасы тепла, накопленного в течение теплого периода года; предохраняемый от промерзания грунт значительный период времени может остаться талым; возможно прогнозирование температуры грунта на любой глубине для каждого из расчетных зимних месяцев разработки.

Применение указанного способа целесообразно для мелиоративно-строительных организаций у которых большой объем земляных работ составляет прокладка траншей, каналов и других подобных сооружений. Для этих организаций рациональный выбор комплекта машин весьма затруднителен из-за большой протяженности сооружений и незначительного удельного объема земляных работ по ним [4].

В условиях Сибири задача еще больше усложняется, что связано с глубоким промерзанием грунта. Существующие буровые машины и траншейные экскаваторы не могут разрабатывать мерзлый грунт с крупными каменными включениями. Высокопроизводительные машины механического рыхления мерзлых грунтов промышленностью выпускаются еще в малых количествах.

Предохранение грунта от промерзания теплоизоляционными материалами позволяет производить разработку грунта в зимних условиях обычными землеройными машинами. Это отвечает требованиям обеспечения круглогодичной работы обычных землеройных машин в условиях Сибири, что особенно важно для подготовки строительных площадок под промышленное, гражданское строительство и дорожное полотно.

Создавшаяся ситуация обусловила актуальность проведения большого объема специальных исследований физико-механических

---

свойств мерзлого грунта и процессов его взаимодействия с рабочими органами машин, характерных для различных условий залегания, и на этой основе – поиск эффективного пути защиты грунтов Восточно-Сибирского региона от сезонного промерзания.

При написании предлагаемой работы учтены требования следующих документов:

Приказ Минприроды РФ и Роскомзема от 22 декабря 1995 г. № 525/67 «Об утверждении Основных положений о рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы»

ГОСТ 17.5.3.04–83 «Охрана природы. Общие требования к рекультивации земель»; ГОСТ 17.5.1.02–85 «Охрана природы. Земли. Классификация нарушенных земель для рекультивации»;

ГОСТ 17.4.3.02–85 «Требования к охране плодородного слоя почвы при производстве земляных работ»;

РД 51-1-96 «Инструкция по охране окружающей среды при строительстве скважин на суше на месторождениях углеводородов поликомпонентного состава, в том числе сероводородсодержащих».



## **1. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ**

Суровые климатические условия Сибири (продолжительная зима, низкая температура воздуха зимой, малая высота снежного покрова) приводят к тому, что грунт находится в мерзлом состоянии в течение шести и более месяцев в году и промерзает на большую глубину (до 2–3 м и более). Высокая механическая прочность мерзлых грунтов, по сравнению с тальми, приводит к значительному снижению производительности землеройных машин и увеличению стоимости разработки грунтов. Климат северной части Восточной Сибири резкоконтинентальный, переходный к климату субарктической зоны, с продолжительной зимой и коротким жарким летом. Наиболее холодный месяц – январь, средняя температура  $-30,4^{\circ}\text{C}$ . Наиболее теплый месяц – июль со средней температурой  $+16,7^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовая температура  $-4,0^{\circ}\text{C}$ . Резкая континентальность климата подчеркивается значительными суточными амплитудами колебания температур, достигающими летом  $15^{\circ}\text{C}$ . Снег выпадает в конце сентября и сохраняется до конца мая – начала июня. Среднегодовое количество осадков 518 мм. Ледостав на реках начинается в конце сентября – начале октября, вскрытие – в конце мая.

В Восточной Сибири отмечается хорошее развитие гидрографической сети. Скорость течения рек в нижнем течении составляет 0,5–1,5 м/с. Долины почти всех основных рек имеют сравнительно крутые склоны, плавно сочленяющиеся с плоскими, слабо заболоченными днищами, в пределах которых фиксируется значительное меандрирование русла рек, террасы за исключением пойменных отсутствуют.

Выделяются следующие особенности почвенного покрова северной части Сибири:

1. Малая мощность профиля, не превышающая 60–100 см, что связано с влиянием многолетней мерзлоты, подавляющей биологическую деятельность, и длительным периодом замерзания этих почв.

2. Процессы оподзоливания не выражены ввиду отсутствия сквозного промывания почв с выносом продуктов разрушения за пределы профиля. Это обусловлено краткостью теплого периода, малым количеством осадков, а также экранирующей ролью вечной мерзлоты.

3. Биологический круговорот замедлен из-за климатических условий.

4. В состав гумуса входит повышенное количество фульвокислот.

Основные типы почв – подзолистые почвы, подбуры, дерново-подзолистые почвы, болотно-подзолистые почвы, палевые почвы.

Сезонно-мерзлые грунты существенно отличаются своими физико-механическими характеристиками от грунтов талых и вечномерзлых.

Глубина сезонно оттаивающего слоя неодинакова в грунтах различного состава и влажности. Наибольшим эффектом протаивания характеризуются скальные щебенистые грунты, наименьшим – глинистые. Температура на поверхности грунта отличается от температуры наружного воздуха, так как летом солнечная энергия повышает температуру поверхности, а зимой снежный покров защищает ее от охлаждения.

Производительность землеройных машин в значительной степени зависит от прочности, глубины промерзания, гранулометрического состава и других характеристик мерзлых грунтов.

Распределение температуры грунтов по глубине залегания в зимний период для различных зон страны неодинаково. Согласно рекомендациям [5] вся территория страны может быть разделена на семь зон, которые определяют с помощью показателя  $A_{\text{п}}$ , учитывающего характеристики промерзания грунтов в различных районах страны:

$$A_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n (H_{\text{п}i} \sqrt{t_i}), \quad (1)$$

где  $H_{\text{п}i}$  – глубина промерзания грунта в каждом зимнем месяце;  $t_i$  – среднее абсолютное значение температуры за каждый зимний месяц;  $n$  – количество месяцев, в течение которых грунт имеет отрицательную температуру.

Распределение температур для указанных выше зон приведено на рис. 1. Время существования мерзлых грунтов (в месяцах) по районам страны показано в табл. 1. Влажность грунтов (табл. 2) в зависимости от гранулометрического состава и района страны изменяется в значительных пределах.

Согласно СНиП II–Д.5–72 вся территория страны разделена на четыре зоны:

- I – вечно- и многолетнемерзлые грунты;
- II, III и IV – сезонно-мерзлые грунты;
- I<sub>1</sub> – район высокой влажности;
- I<sub>2</sub> – район умеренной влажности;
- I<sub>3</sub> – район малой влажности;
- I<sub>4</sub> – район островной вечной мерзлоты.

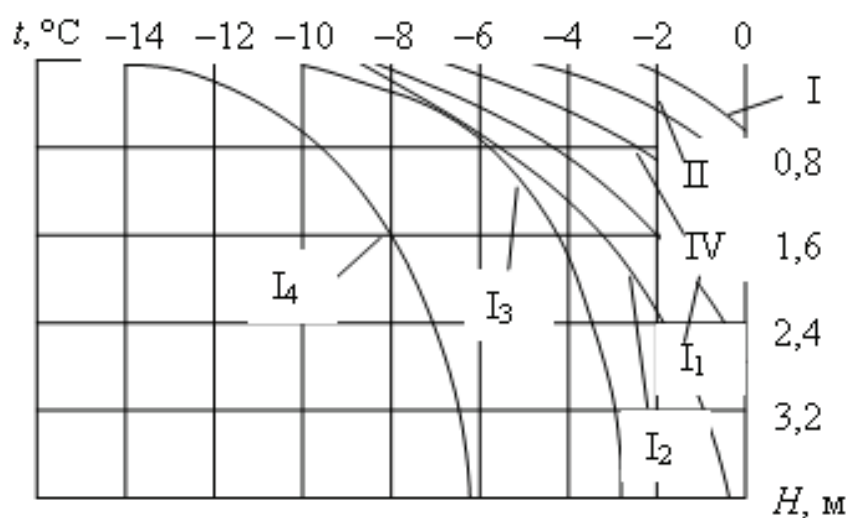


Рис. 1. Изменение средней температуры грунта в зимний период года в зависимости от глубины

Таблица 1

**Время существования мерзлых грунтов (в месяцах)  
по районам страны**

Индекс района	Показатель промерзания грунта $A_n$	Глубина залегания $H$ , м				
		1,0	1,5	2,0	2,5	4,0
II	70–110	10	11	12		
III	50–70	9		10	11	12
IV	30–50	7		8		11
I <sub>1</sub>	20–30	6	7	–	8	–
I <sub>2</sub>	10–20	–		5–6	–	–
I <sub>3</sub>	5–10	–	–	4–5	–	–
I <sub>4</sub>	2–5	–	–	–	–	–

Характерные значения влажности грунтов для указанных зон отражены в [5], в [6] приведено деление зоны I еще на четыре района:

I<sub>1</sub> – высокая влажность сезонно оттаивающего слоя (влажность грунтов выше влажности границы текучести);

I<sub>2</sub> – умеренная влажность [ $\omega = (0,8-1,0)\omega_T$ ];

I<sub>3</sub> – малая влажность сезонно оттаивающего слоя ( $\omega < 0,8\omega_T$ );

I<sub>4</sub> – островная вечная мерзлота [ $\omega = (0,7-1,0)\omega_T$ ].

Прочность мерзлых грунтов по рекомендациям [7] оценивают числом ударов  $C$  динамического плотномера ДорНИИ (табл. 3).

Таблица 2

**Распределение влажности в зависимости от зоны залегания грунта**

Грунт	Влажность $W$ , %						
	Зона						
	I				II	III	IV
	Районы первой зоны						
	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>			
Глина	45–55	37–45	32–37	25–30	28–35	22–26	18–22
Суглинок	30–45	25–37	20–32	18–25	18–28	13–22	12–18
Супесь	20–30	16–25	13–20	12–18	12–18	8–13	7–12
Песок мелкий	18–25	18–25	18–25	8–15	6–9	5–8	4–7
Песок крупный	12–20	12–20	12–20	6–10	4–8	3–6	2–5

Таблица 3

**Шкала сопротивляемости однородных мерзлых грунтов по числу ударов  $C$** 

Грунт	Влажность $W$ , %	Температура, °C						
		-1	-3	-5	-10	-15	-25	-40
Супесь	12,0	40–50	55–65	90–95	140–155	170–185	230–240	310–330
	15,0	65–75	105–120	150–170	200–230	270–290	330–360	420–435
	19,0	75–85	140–160	200–230	270–300	340–360	450–480	500–530
	28,0	65–75	120–130	165–190	215–230	280–300	400–420	460–480
Суглинок	10,0	28–33	34–37	36–40	40–43	43–50	50–56	70–80
	20,0	60–70	110–120	150–185	215–235	240–260	375–385	450–470
	25,0	70–80	150–160	195–220	250–280	320–340	425–460	480–520
	30,0	65–75	100–110	140–150	210–230	250–270	350–370	420–440
	59,0	40–45	50–60	75–80	110–125	165–175	220–240	285–315
Глина	17,0	36–40	70–80	100–110	160–165	180–200	250–270	290–315
	24,0	55–60	90–100	125–135	190–210	200–235	270–285	340–380
	31,0	65–70	12–130	140–160	230–250	290–310	290–320	380–420
	49,0	40–45	65–70	90–100	135–145	180–190	235–245	280–310
Песок	6,0	12–14	15–18	20–22	25–27	28–30	32–35	40–45
	8,0	25–30	35–38	40–45	50–53	55–58	60–65	68–70
	11,0	50–55	65–70	85–90	95–100	110–115	120–130	140–150
	18,0	150–160	200–210	220–230	240–250	260–280	285–300	325–340

Число ударов динамического плотномера ДорНИИ определяет физическое состояние грунта, оно прямо пропорционально усилиям резания и входит в расчетные зависимости для определения усилий резания.

Изменение сопротивляемости грунтов, не имеющих гравийно-галечниковые включения, приведены в табл. 3. Число ударов плотномера ДорНИИ является обобщающим показателем прочности мерзлых грунтов. Но для комплексной оценки мерзлых грунтов, как однородных по своему составу, так и содержащих включения, влажность грунта, его гранулометрический состав и температура имеют определяющее значение.

Изменение сопротивляемости грунтов с гравийно-галечниковыми включениями учитывается коэффициентами  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$ , зависящими от размера фракций, образующих включение. Значения коэффициентов для грунтов Красноярского края приведены в табл. 4, для грунтов Республика Бурятия, БАМа, Республики Саха – в табл. 5.

Таблица 4

**Распределение коэффициентов полинома в зависимости от фракционного состава грунтов и региона их залегания**

Регион	Коэффициент	Размер фракции, мм				
		0,005	0,005–0,1	0,1–0,5	0,5–2,0	2,0–10
Красноярский край, южная зона	$a_0$	0,1189	0,1162	0,05745	0,12009	0,03770
	$a_1$	-0,01658	-0,01424	-0,003816	0,012928	$-9,840 \cdot 10^{-4}$
	$a_2$	$8,650 \cdot 10^{-4}$	$6,301 \cdot 10^{-4}$	$1,001 \cdot 10^{-4}$	$5,2872 \cdot 10^{-4}$	$6,686 \cdot 10^{-6}$
	$a_3$	$-1,834 \cdot 10^{-5}$	$-1,152 \cdot 10^{-5}$	$-1,136 \cdot 10^{-6}$	$-9,2245 \cdot 10^{-6}$	0
	$a_4$	$1,349 \cdot 10^{-7}$	$7,404 \cdot 10^{-8}$	$4,71 \cdot 10^{-9}$	$5,733 \cdot 10^{-8}$	0
Красноярский край, северная зона	$a_0$	0,07724	0,04824	0,04934	0,1384	0,1003
	$a_1$	$-5,678 \cdot 10^{-3}$	$-4,694 \cdot 10^{-3}$	$-2,371 \cdot 10^{-3}$	-0,01603	$-9,270 \cdot 10^{-3}$
	$a_2$	$1,433 \cdot 10^{-4}$	$1,677 \cdot 10^{-4}$	$3,939 \cdot 10^{-5}$	$6,703 \cdot 10^{-4}$	$3,282 \cdot 10^{-4}$
	$a_3$	$-1,147 \cdot 10^{-6}$	$-2,261 \cdot 10^{-6}$	$-2,078 \cdot 10^{-7}$	$-1,171 \cdot 10^{-5}$	$4,959 \cdot 10^{-6}$
	$a_4$	0	$1,012 \cdot 10^{-8}$	0	$7,258 \cdot 10^{-8}$	$2,665 \cdot 10^{-8}$
Иркутская область	$a_0$	0,0444	0,01491	0,05120	0,1717	0,07626
	$a_1$	-0,001311	$-9,154 \cdot 10^{-4}$	-0,002878	-0,02340	-0,004374
	$a_2$	$9,746 \cdot 10^{-6}$	$3,072 \cdot 10^{-5}$	$7,374 \cdot 10^{-5}$	0,001082	$8,393 \cdot 10^{-5}$
	$a_3$	0	$-2,489 \cdot 10^{-7}$	$-8,669 \cdot 10^{-7}$	$-1,632 \cdot 10^{-5}$	$-5,197 \cdot 10^{-7}$
	$a_4$	0	0	$3,710 \cdot 10^{-9}$	0	0

Регион	Коэф- фици- ент	Размер фракции, мм				
		10–30	30–70	70–100	100–200	> 200
Красно- ярский край, южная зона	$a_0$	0,1991	0,02397	0,1589	0,3195	1,012
	$a_1$	0,001240	0,002227	-0,01921	-0,06238	-0,5853
	$a_2$	$-5,887 \cdot 10^{-5}$	$-1,307 \cdot 10^{-4}$	$7,716 \cdot 10^{-4}$	0,003904	0,09111
	$a_3$	$5,582 \cdot 10^{-7}$	$1,585 \cdot 10^{-6}$	$-9,987 \cdot 10^{-6}$	0	0
	$a_4$	0	0	0	0	0
Красно- ярский край, северная зона	$a_0$	0,1039	0,07781	0,1501	-0,02240	0,712
	$a_1$	-0,01404	$-7,202 \cdot 10^{-3}$	-0,01467	0,2367	-0,08056
	$a_2$	$8,239 \cdot 10^{-4}$	$3,325 \cdot 10^{-4}$	$3,563 \cdot 10^{-4}$	-0,04365	$9,781 \cdot 10^{-3}$
	$a_3$	$-2,047 \cdot 10^{-5}$	$-7,114 \cdot 10^{-6}$	0	0	$-3,707 \cdot 10^{-4}$
	$a_4$	$1,765 \cdot 10^{-7}$	$5,445 \cdot 10^{-8}$	0	0	0
Иркут- ская об- ласть	$a_0$	0,04525	0,005919	-0,02086	-0,02141	
	$a_1$	0,004064	0,007392	0,01526	0,009989	
	$a_2$	$-4,126 \cdot 10^{-4}$	$-4,090 \cdot 10^{-4}$	-0,001098	$-5,329 \cdot 10^{-4}$	
	$a_3$	$7,565 \cdot 10^{-6}$	$5,517 \cdot 10^{-6}$	$2,784 \cdot 10^{-5}$	$8,965 \cdot 10^{-6}$	
	$a_4$	0	0	$-2,372 \cdot 10^{-7}$	0	

Таблица 5

**Распределение коэффициентов полинома в зависимости  
от фракционного состава грунтов и региона залегания  
(Республика Бурятия, БАМ, Республика Саха)**

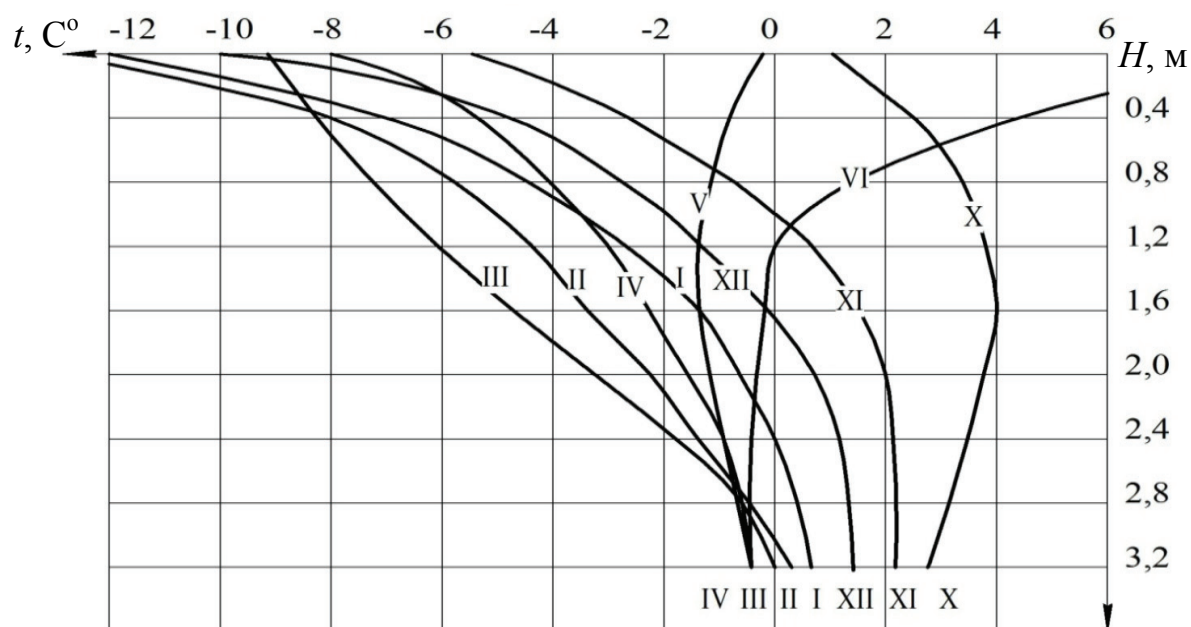
Регион	Коэф- фици- ент	Размер фракции, мм				
		0,005	0,005–0,1	0,1–0,5	0,5–2,0	2,0–10
Респуб- лика Бу- рятия	$a_0$	0,2309	0,0996	0,02231	0,07134	0,03836
	$a_1$	-0,03721	$-2,268 \cdot 10^{-3}$	$-2,947 \cdot 10^{-5}$	$-4,237 \cdot 10^{-3}$	$-8,818 \cdot 10^{-4}$
	$a_2$	$1,975 \cdot 10^{-3}$	$3,648 \cdot 10^{-5}$	$-2,738 \cdot 10^{-5}$	$9,611 \cdot 10^{-5}$	$1,484 \cdot 10^{-6}$
	$a_3$	$-3,427 \cdot 10^{-5}$	$-1,922 \cdot 10^{-7}$	$5,1837 \cdot 10^{-7}$	$9,5875 \cdot 10^{-7}$	$4,564 \cdot 10^{-8}$
	$a_4$	0	0	$-3,263 \cdot 10^{-9}$	$3,520 \cdot 10^{-9}$	0
БАМ	$a_0$	0,1441	0,04752	0,06476	0,09816	0,03858
	$a_1$	-0,02067	-0,002417	-0,003796	-0,01017	0,00093
	$a_2$	$1,167 \cdot 10^{-3}$	$5,055 \cdot 10^{-5}$	$8,874 \cdot 10^{-5}$	$4,541 \cdot 10^{-4}$	$-1,444 \cdot 10^{-4}$
	$a_3$	$-2,823 \cdot 10^{-5}$	$-4,553 \cdot 10^{-7}$	$-9,285 \cdot 10^{-7}$	$-9,076 \cdot 10^{-6}$	$3,560 \cdot 10^{-6}$
	$a_4$	$2,432 \cdot 10^{-7}$	$1,419 \cdot 10^{-9}$	$3,593 \cdot 10^{-9}$	$6,553 \cdot 10^{-8}$	$-2,660 \cdot 10^{-8}$

Регион	Коэффициент	Размер фракции, мм				
		0,005	0,005–0,1	0,1–0,5	0,5–2,0	2,0–10
Республика Саха	$a_0$	0,1808	0,10861	0,01949	0,17194	0,04780
	$a_1$	-0,03339	-0,01212	$-1,548 \cdot 10^{-3}$	-0,02405	$-3,639 \cdot 10^{-3}$
	$a_2$	$2,552 \cdot 10^{-3}$	$5,259 \cdot 10^{-4}$	$5,902 \cdot 10^{-5}$	$1,265 \cdot 10^{-3}$	$2,675 \cdot 10^{-4}$
	$a_3$	$-8,451 \cdot 10^{-3}$	$-9,534 \cdot 10^{-6}$	$-9,385 \cdot 10^{-7}$	$-2,8626 \cdot 10^{-5}$	$-8,539 \cdot 10^{-6}$
	$a_4$	$9,931 \cdot 10^{-7}$	$6,047 \cdot 10^{-8}$	$5,393 \cdot 10^{-9}$	$2,2939 \cdot 10^{-7}$	$8,608 \cdot 10^{-8}$

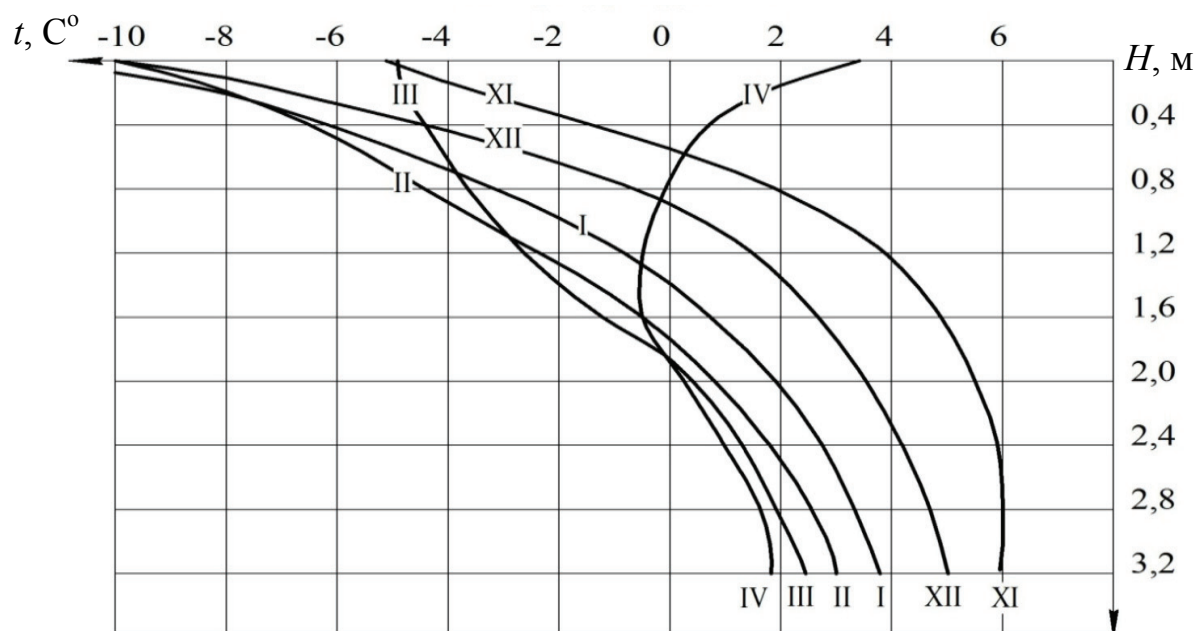
Регион	Коэффициент	Размер фракции, мм				
		10–30	30–70	70–100	100–200	> 200
Республика Бурятия	$a_0$	0,06502	0,01635	0,00251	0	10
	$a_1$	$-7,658 \cdot 10^{-3}$	$-7,022 \cdot 10^{-4}$	0,01250	3,435	1185,7
	$a_2$	$33,952 \cdot 10^{-4}$	$-1,552 \cdot 10^{-5}$	$-4,628 \cdot 10^{-4}$	-0,2153	-142,69
	$a_3$	$-8,112 \cdot 10^{-7}$	0	0	0	0
	$a_4$	$5,614 \cdot 10^{-8}$	0	0	0	0
БАМ	$a_0$	0,02318	0,003045	0,03762	0,02747	0,1901
	$a_1$	0,0005059	0,005841	0,002174	0,002866	-0,02244
	$a_2$	$-2,82 \cdot 10^{-5}$	$-3,313 \cdot 10^{-4}$	$-2,3 \cdot 10^{-4}$	$-1,840 \cdot 10^{-4}$	$8,199 \cdot 10^{-4}$
	$a_3$	$2,264 \cdot 10^{-7}$	$6,257 \cdot 10^{-6}$	$5,423 \cdot 10^{-6}$	$2,403 \cdot 10^{-6}$	$-8,193 \cdot 10^{-6}$
	$a_4$	0	$-3,940 \cdot 10^{-8}$	$-3,925 \cdot 10^{-8}$	0	0
Республика Саха	$a_0$	0,03589	0,09066	0,1223	0,1223	0,05792
	$a_1$	$7,906 \cdot 10^{-4}$	$-7,508 \cdot 10^{-3}$	-0,02202	-0,02202	$-6,747 \cdot 10^{-3}$
	$a_2$	$-1,033 \cdot 10^{-4}$	$2,194 \cdot 10^{-4}$	$2,207 \cdot 10^{-3}$	$2,207 \cdot 10^{-3}$	$3,19704 \cdot 10^{-4}$
	$a_3$	$2,145 \cdot 10^{-6}$	$-2,615 \cdot 10^{-6}$	0	0	0
	$a_4$	$-1,321 \cdot 10^{-8}$	$1,094 \cdot 10^{-8}$	0	0	0

Обработка паспортов грунта Восточно-Сибирского региона позволила получить законы распределения температур на каждый из зимних месяцев. Распределение температур на каждый из зимних месяцев по глубине в грунтах Красноярского края приведено на рис. 2, в грунтах Республики Саха и Бурятии – на рис. 3, 4. На рис. 5 представлены графики распределения температуры в грунтах Иркутской

области, отдельно выделены графики распределения температур по глубине на территории БАМа, относящейся к Иркутской области (рис. 6).



*a*



*б*

Рис. 2. Месячные распределения температуры в грунтах Красноярского края по глубине залегания: *a* – северная зона; *б* – южная зона



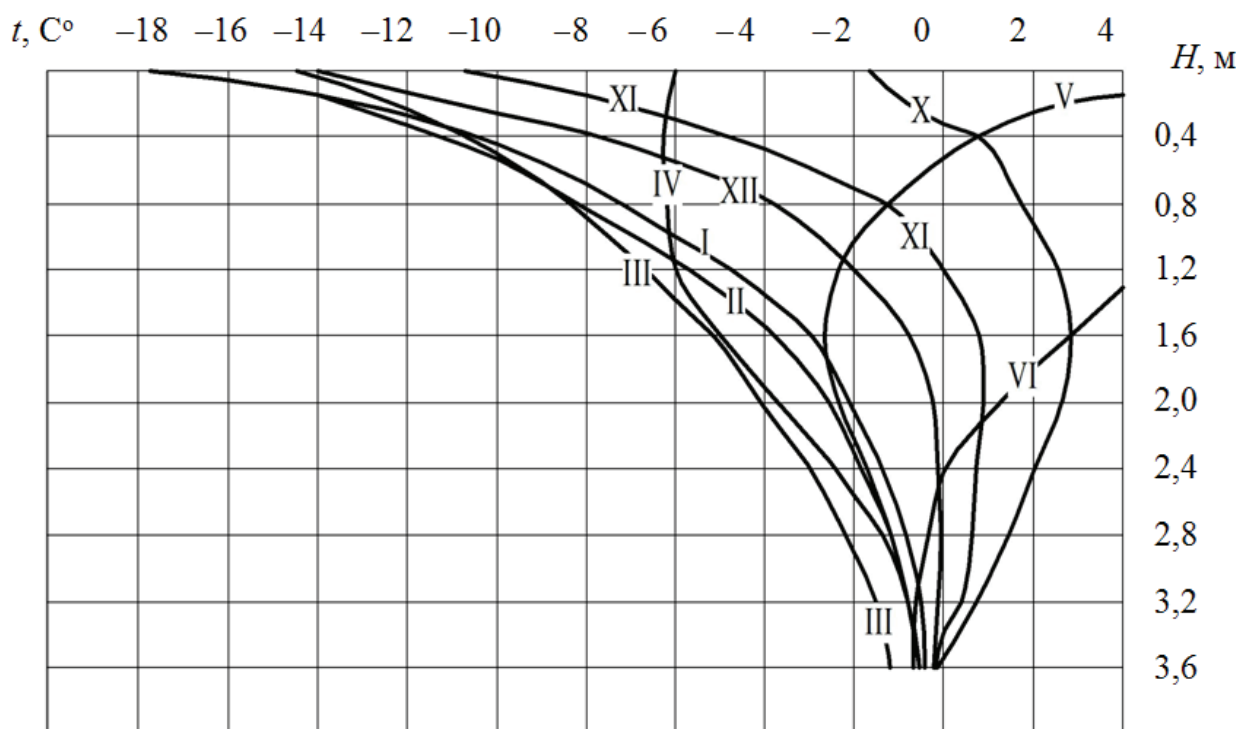


Рис. 3. Месячные распределения температуры в грунтах Республики Саха по глубине залегания

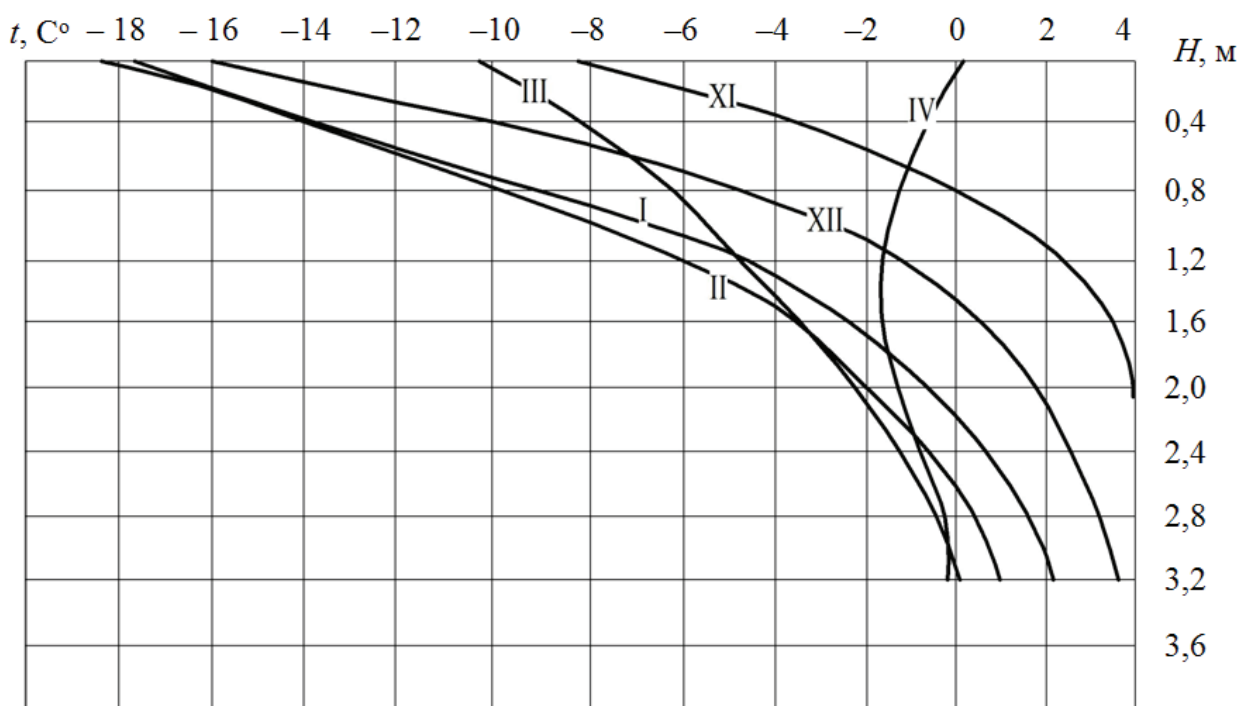


Рис. 4. Месячные распределения температуры в грунтах Республики Бурятия по глубине залегания

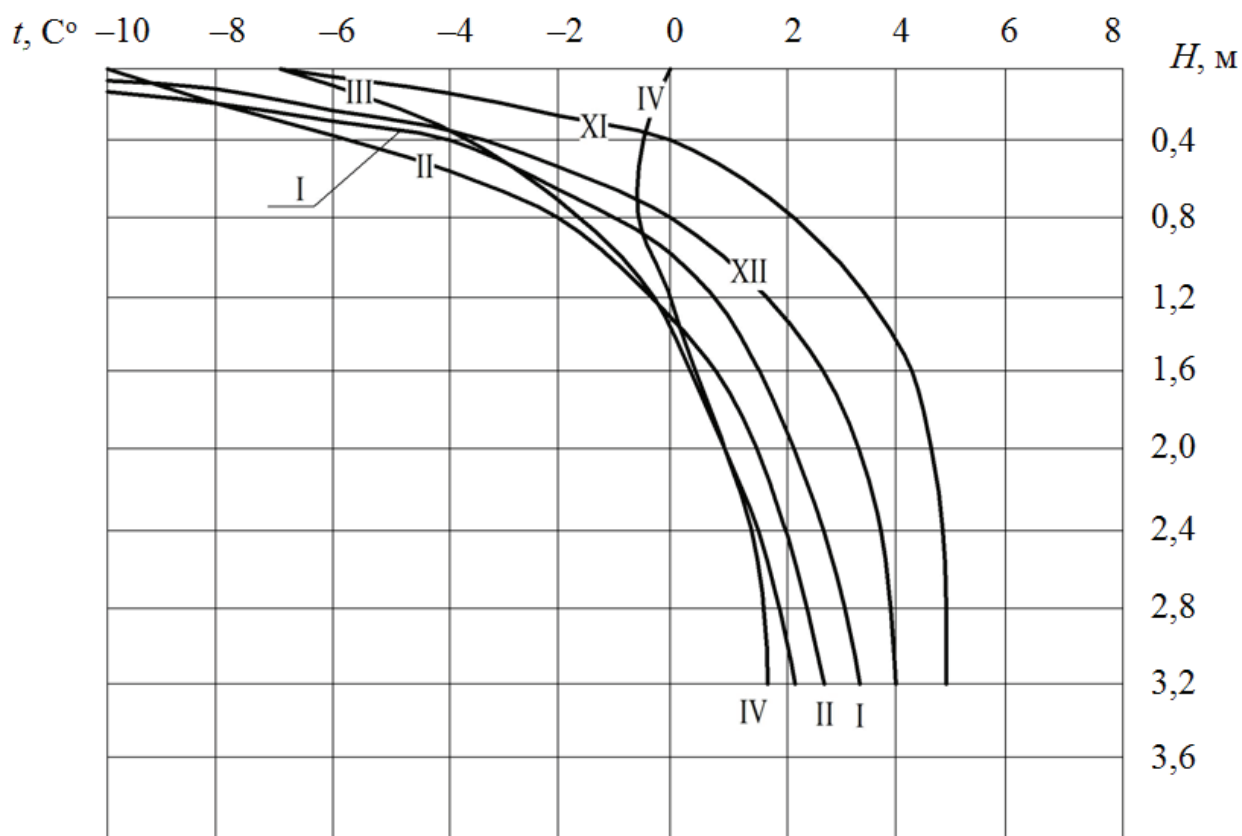


Рис. 5. Месячные распределения температуры в грунтах Иркутской области по глубине залегания

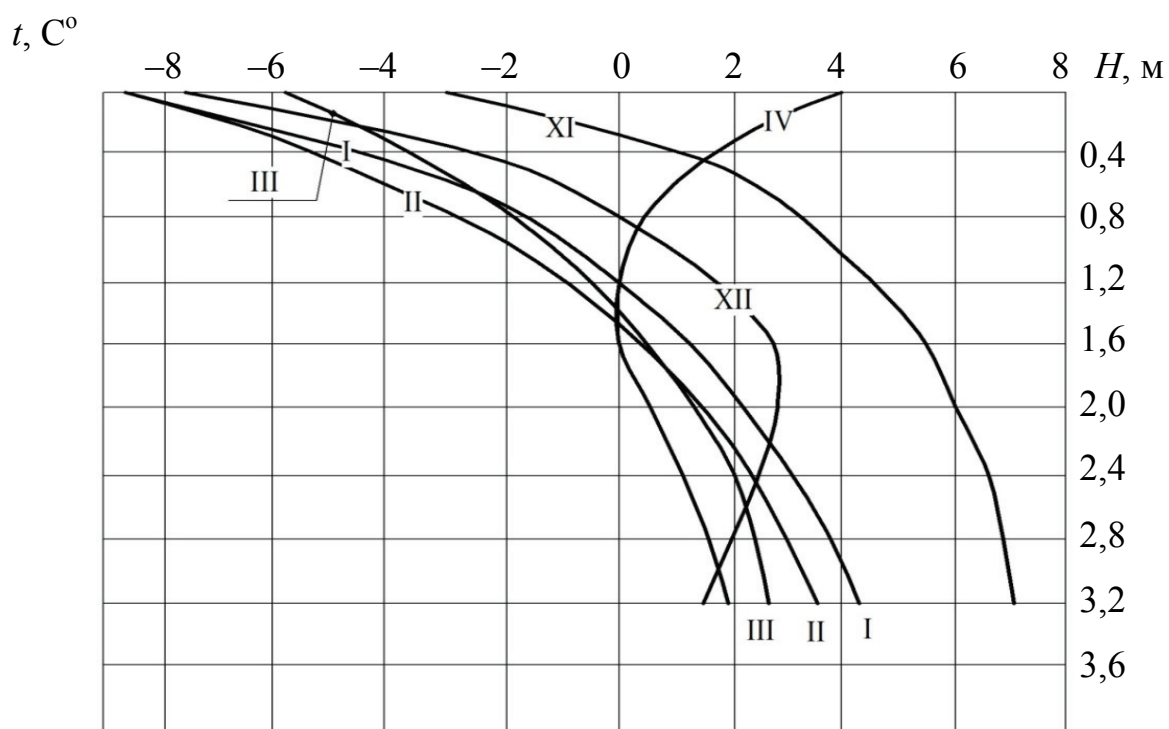
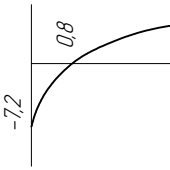
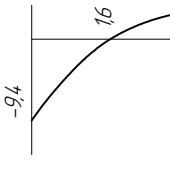
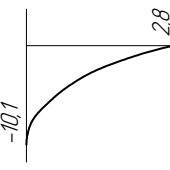

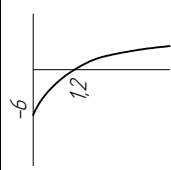

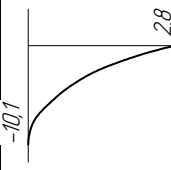
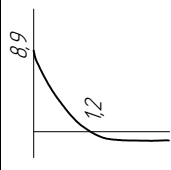
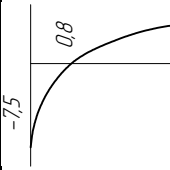
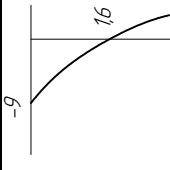
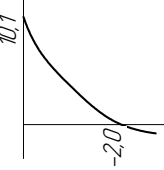


Рис. 6. Распределение температур по глубине залегания грунта на территории БАМа

Таблица 6

**Распределение температур по глубине разрабатываемых грунтов  
Красноярского края и Республики Саха**

Регион	Расчетные распределения температур грунтов по глубинам с учетом объемов работ										
	$T_1$	$T_2$		$T_3$		$T_4$		$T_5$		Относительные значения объемов работ, %	
Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С		Относительные значения объемов работ, %
Красноярский край	49,67		13,77		22,11		11,56		2,89		
Северная зона	11,56		2,89		5,78		11,56		2,89		
Южная зона	38,11		10,88		16,33						
Республика Саха										50,00	50,00

Исследуемый регион включает природные зоны Красноярского края, БАМа, Республики Саха, Республики Бурятия и Иркутской области. В табл. 6–9 показаны наиболее вероятные распределения значений месячных температур разрабатываемых мерзлых грунтов для отмеченных областей региона с учетом распределений перспективных объемов работ и среднемесячных температур. Анализ приведенных распределений показывает, что наиболее неблагоприятные условия по температурным режимам имеют место при разработке грунтов в зоне БАМа и на севере Красноярского края.

Таблица 7

**Распределение температур по глубине разрабатываемых грунтов Бурятии**

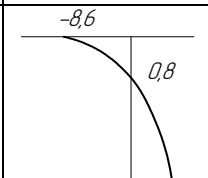
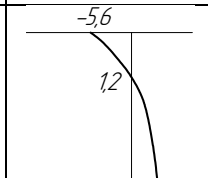
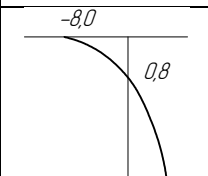
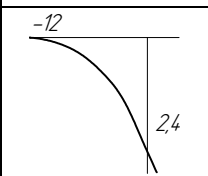
Расчетные распределения температур грунтов по глубинам с учетом объемов работ				
$T_1$	$T_2$		$T_3$	
Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %
50,0		25,0		25,0

Таблица 8

**Распределение температур по глубине разрабатываемых грунтов Иркутской области**

Расчетные распределения температур грунтов по глубинам с учетом объемов работ				
$T_1$	$T_2$		$T_3$	
Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %	Температура по глубинам, °С	Относительные значения объемов работ, %
50,0		8,33		41,67

Изменение температуры по глубине грунта весьма информативны, но большую значимость для прогнозных оценок состояния грунта в условиях планирования объемом работ землеройно-транспортных машин имеют усредненные графические и математические зависимости изменения температуры грунта по каждому из рассматриваемых регионов Восточной Сибири, отражающие и относительные объемы землеустроительных работ.

Математической обработкой графиков изменения температуры по глубине грунта для каждого из районов Восточной Сибири с учетом каждого из месяцев зимнего периода получены уравнения регрессии второго порядка (табл. 9). В условиях естественного состояния грунта распределение прочности мерзлого грунта находится в прямой зависимости от температуры и глубины его залегания.

Таблица 9

**Распределение отрицательных температур и прочности мерзлых грунтов  
Восточно-Сибирского региона**

Исследуемая зона	Температурный режим	Распределение отрицательных температур $t$ по глубине $H$	Распределение прочности грунта $C$ по глубине $H$
Красноярский край (северная зона)	$T_2$	$t = -5,9 + 8,7 H - 2,8 H^2$	$C = 228 - 201 H$
	$T_3$	$t = -10,8 + 10,5 H - 2,6 H^2$	$C = 276 - 119 H$
	$T_4$	$t = -9,7 + 7,6 H - 1,6 H^2$	$C = 232 - 48 H$
Республика Саха	$T_4$	$t = -12,5 + 10,1 H - 2,1 H^2$	$C = 277 - 57 H$
Республика Бурятия	$T_2$	$t = -8,1 + 16,3 H - 7,7 H^2$	$C = 236 - 256 H$
Иркутская область	$T_2$	$t = -8,7 + 18,1 H - 8,5 H^2$	$C = 268 - 322 H$
	$T_3$	$t = -5,2 + 5,7 H - 1,4 H^2$	$C = 208 - 134 H$
БАМ	$T_2$	$t = -6,3 + 8,9 H - 3,2 H^2$	$C = 235 - 198 H$
	$T_3$	$t = -12,9 + 10,7 H - 2,2 H^2$	$C = 377 - 105 H$
	$T_4$	$t = -1,5 + 11,3 H - 1,8 H^2$	$C = 285 - 65 H$

Для оценки грунтовых условий по температурным режимам грунтов использованы расчетные распределения, объединяющие периоды года по признаку близости глубины промерзания [8]. Подобное обобщение позволило выделить пять расчетных случаев (табл. 10). Объединение нескольких месячных распределений температур в один расчетный случай требует учета объемов работ, планируемых к выполнению за каждый из этих месяцев, а не просто усреднения, приводящего порою к значительным неточностям.

**Характеристика расчетных распределений температур грунтов**

Расчетное распределение	Характеристика распределения
$T_1$	Мерзлый грунт отсутствует по всей глубине
$T_2$	Глубина промерзания до 1,2 м
$T_3$	Глубина промерзания от 1,2 до 2,5 м
$T_4$	Глубина промерзания свыше 2,5 м
$T_5$	Мерзлый грунт находится под слоем талого

Как показывает практика строительства и данные табл. 7–10, земляные работы в течение года могут выполняться весьма неравномерно. Если ввести коэффициент  $C_m$ , учитывающий сезонную неравномерность, то относительные значения перспективных объемов земляных работ  $W_m$  в грунтах с расчетным распределением температур  $T_i$  легко найти по формуле

$$W_{Ti} = \sum_{m=1}^n W_m C_m, \quad (2)$$

где  $W_m$  – среднемесячное значение относительных объемов работ;  $n$  – количество месяцев, для которых распределение месячных температур по глубинам укладывается в  $T_i$ .

Температура грунта на  $j$ -й глубине  $i$ -го расчетного случая

$$t_{ij} = \sum_{m=1}^m C_m t_{mj}, \quad (3)$$

где  $t_{mj}$  – температура грунта на  $j$ -й глубине  $m$ -го месячного распределения, укладываемого в  $i$ -й расчетный случай.

По данным ряда организаций [9], месячные объемы работ в зимний период составляют 60–80 % от таких работ в течение времени года с положительными температурами наружного воздуха, что может служить для ориентировочной оценки коэффициента  $C_m$ .

Обработка вариационных рядов средних значений влажности на начало замерзания и оттаивания позволила получить функции плотностей распределения вероятностей значений влажности грунта для

отдельных пунктов региона, а затем обобщить эти результаты на уровне областей по формуле

$$p(W) = \sum_{Z=1}^Z p(W_i) p(W_i/W), \quad (4)$$

где  $p(W)$  – вероятность разработки грунтов в рассматриваемом районе с влажностью  $\omega$ , %;  $p(W_i)$  – вероятность разработки грунтов в  $i$ -м пункте района;  $p(W_i/W)$  – вероятность того, что разрабатываемый в  $i$ -м пункте грунт имеет влажность  $W$ ;  $Z$  – количество пунктов.

Как отмечалось ранее, значения влажности грунта хорошо коррелируют с распределением температуры по глубине разрабатываемого грунта.

Вероятность распределения гравийно-галечниковых включений по фракционному составу и частота встречаемости числа фракций в разрабатываемых грунтах исследуемого региона имеют нормальные законы распределения.

По закону распределения гравийно-галечниковые включения в грунтах Восточной Сибири разделяются на две группы. К первой группе относят грунты Красноярского края, включающие как северную, так и южную зону, и Республики Саха. Ко второй группе – грунты Республики Бурятия, Иркутской области и БАМа.

Для расчета силы резания мерзлого грунта с включениями достаточно учесть коэффициент пропорциональности силы и процентного содержания гравийно-галечниковых включений, а для описания законов формирования нагрузок на рабочем инструменте машины для разработки мерзлых грунтов с каменистыми включениями можно воспользоваться известными выражениями А. И. Зеленина [7, 10], дополненными произведением коэффициентов  $k_{\text{вкл}}$  и  $\xi_{\text{вкл}}$ .

## 2. ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ СЕЗОННО-МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ К РАЗРАБОТКЕ

Отсутствие эффективных механизированных средств разработки сезонно-мерзлых грунтов для производства земляных работ в зимнее время обуславливает необходимость предварительной подготовки грунта к разработке. Она сводится к рыхлению мерзлого грунта механическими или буровзрывными способами, уменьшению прочности смерзания грунта, оттаиванию мерзлого грунта и предохранению грунта от промерзания.

В настоящее время основной объем земляных работ в зимнее время производится после рыхления мерзлого грунта клин-бабой. Однако клин-баба имеет существенный недостаток: большие динамические нагрузки приводят к крупным поломкам машин. Кроме того, рыхление клин-бабой является одним из самых трудоемких и дорогих способов подготовки грунта к разработке.

Из статических рыхлителей серийно выпускается Д-652А. Это один из самых производительных и эффективных рыхлителей. Он работает наиболее экономично и эффективно при больших объемах земляных работ и глубине промерзания грунта до 0,7 м. С увеличением глубины промерзания его производительность падает. С уменьшением объема земляных работ стоимость рыхления мерзлого грунта рыхлителем Д-652А резко увеличивается из-за вынужденных простоев.

Исследователи считают целесообразным применять буровзрывные работы для рыхления мерзлого грунта при больших объемах земляных работ (более 1000 м<sup>3</sup> грунта на одном объекте) [11].

Существенным недостатком способов рыхления мерзлого грунта является значительное снижение производительности землеройных машин и увеличение трудовых затрат при разработке подготовленного грунта. По данным трестов «Строймеханизация» (г. Красноярск) и «Мехдорстрой» (г. Якутск), средняя выработка экскаваторов при разработке разрыхленного мерзлого грунта снижается на 30–35 % по сравнению с летней, а затраты труда увеличиваются почти в 1,5 раза [12, 13]. По другим данным [14, 15], производительность экскаваторов составляет только 40–50 % летней нормы.

Уменьшение прочности смерзания грунта осуществляется с помощью осеннего рыхления или засоления. Осеннее рыхление нарушает установившиеся связи между частицами грунта, уменьшает число



контактов между ними. Это ведет к уменьшению силы сцепления между частицами грунта при промерзании и, соответственно, к уменьшению прочности мерзлого грунта. Основным недостатком способа рыхления является то, что разрыхленный грунт после дождя уплотняется и смерзается так же прочно, как и в естественных условиях.

При засолении путем искусственного увеличения содержания водорастворимых солей в грунте повышается концентрация соли в растворе и понижается температура смерзания грунта. Засоленный грунт повышает интенсивность коррозии металла рабочих органов землеройных транспортных машин. Способ засоления имеет ограниченное применение, что связано с фильтрационными свойствами грунта.

Одним из путей повышения эффективности разработки сезонно-мерзлых грунтов как однородной структуры, так и содержащих каменистые включения являются также профилактические мероприятия подготовки грунта к производству работ в зимних условиях.

С точки зрения решения проблемы внедрения ресурсоэнерго-сберегающих и природоохранных технологий производства строительных материалов и полимерных сорбирующих изделий наиболее перспективными теплоизоляционными, сорбционными материалами являются карбамидные поропласты. Существенным моментом, повышающим конкурентоспособность карбамидных поропластов по сравнению с другими видами поропластов, является сравнительно низкий показатель его энергетического эквивалента, который был предложен в качестве критерия для оценки энергоемкости производства поропластов на базе суммарной оценки затрат энергии на изготовление исходных материалов и полупродуктов, входящих в состав композиций конечного продукта. Показатель конечного эквивалента для карбамидного поропласта равняется 480 МДж/кг против 2950 МДж/кг для пенополиуретана и 1360 МДж/кг для пенополистирола [16, 18].

Современные карбамидные поропласты на рынке России представлены под торговой маркой «Униполимер-Т», «Пеноизол», «Карбопен» и т. д. К их достоинствам можно отнести хорошие теплоизоляционные и сорбционные свойства, низкую стоимость и высокую технологичность. Отсутствие способности к развитию стабильного процесса горения и к образованию расплава свидетельствует о пониженной пожарной опасности поропласта «Униполимер-Т» по сравнению с распространенными пенополиуретанами и пенополистиролами.

Однако такие утеплители, как карбопен, униполимер-Т, пеноизол, ПКЗ-30, все карбамидные поропласты, не находят широкого при-

менения в строительстве и других отраслях промышленности из-за низкой механической прочности и значительной усадки, которые обуславливаются особенностью воздушно-механического способа изготовления, характеризующегося применением сильнообразованных карбамидных смол. Удаление в процессе сушки воды, содержащейся в карбамидной смоле, а также выделяющейся воды в результате реакции поликонденсации приводит к развитию внутренних напряжений и усадочных деформаций [17].

Из всех способов подготовки грунта к зимней разработке оттаивание является самым дорогим, энерго- и трудоемким. Поэтому оно находит весьма ограниченное применение.

Предохранение грунта от промерзания осуществляется посредством покрытия его снегом, пенольдом и теплоизоляционными материалами, а также с помощью ледовоздушной подушки.

Анализ каждого из способов предохранения грунта от промерзания показывает, что они не равнозначны по своей эффективности. Так, например, покрытие грунта снегом и пенольдом производится поздней осенью при отрицательной температуре воздуха, поэтому уменьшается только глубина промерзания, что не предотвращает сам процесс промерзания грунта.

Снегогенераторы как устройства для получения искусственного снега, используемого для предохранения грунта от промерзания, широко известны из патентно-технической литературы [А.с. СССР 339732 МКИ F 25C1/02; А.с. СССР 951031339732 МКИ F 25C3/04; А.с. СССР 1337626 МКИ F 25C3/04]. В снегогенераторах (рис. 7) вода и воздух подаются с помощью насосов 2 и 3 по трубопроводам 4 и 5 в змеевики 9 и 10, расположенные в диффузорной части 11 кожуха вентилятора 8, где охлаждаются до температуры окружающего воздуха ( $-8^{\circ}\text{C}$ ), после чего воздух поступает в коллектор 14, а вода – в коллектор 12, которые установлены в диффузорной части 6 кожуха вентилятора 8.

На трубопроводе 4, соединенном с баком 1 установлены вентиль 21 и фильтр 22, а на воздушном трубопроводе 5 устанавливаются маслоотделитель 23 и вентили 24 и 25. Соединительный трубопровод 26 и вентиль 25 используются для продувки трубопровода 4 и освобождения его от остатков воды для предотвращения размораживания насоса. Распыленный форсунками 13 факел мелкодисперсных капель воды рассекается кольцевым потоком сжатого воздуха, выходящего из отверстий коллекторов 14, при этом температура воздуха дополнительно понижается до минус  $10^{\circ}\text{C}$ , что сопровождается интенсивным замерзанием

капель воды, которые обдуваются воздухом в камере 16 генерации снега воздушным потоком вентилятора 7, что и приводит к образованию искусственного снега 17, направляемого формирующим щитом 16 на грунт, дополнительные окна 18 обеспечивают необходимый объем воздуха в камере 16. Для передвижения снегогенератора используется самоходное средство 19, оборудованное кабиной управления 22.

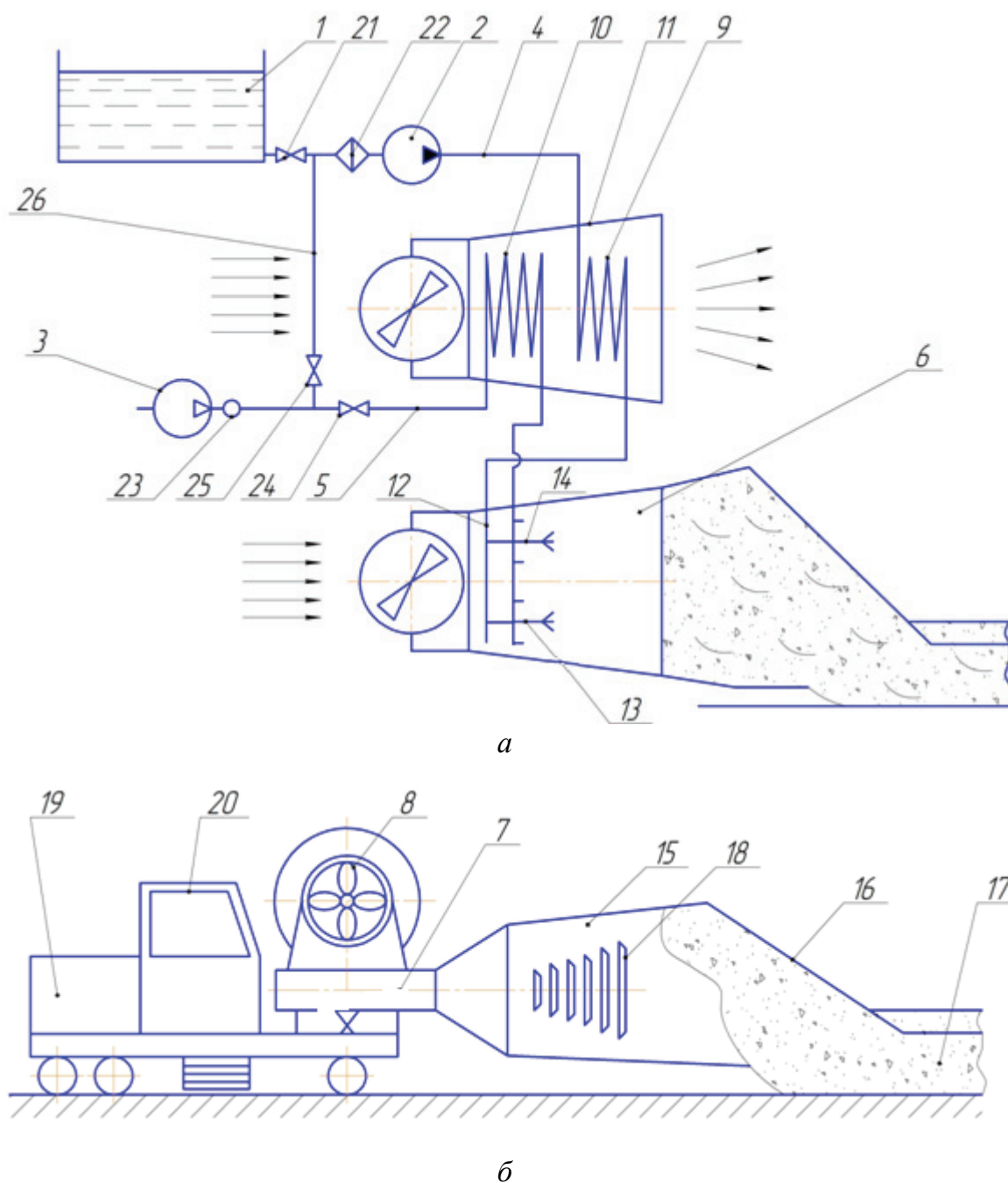


Рис. 7. Снегогенератор: *а* – принципиальная схема снегогенератора; *б* – схема мобильного снегогенератора

Покрытие снегом и пенольдом не дает должного эффекта в районах, где в зимнее время бывает переход температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, снег со временем оседает и уплотняется. В результате этого ухудшаются его теплоизоляционные свойства: коэффициент теплопроводности у свежевыпавшего снега равен  $0,09$  ккал/(м · ч · град), у осевшего –  $0,30$  ккал/(м · ч · град), у подтаявшего –  $0,55$  ккал/(м · ч · град) [12]. Малая механическая прочность, особенно под действием ветра и дождя, и легкая испаряемость, усиливающаяся под действием солнечной радиации [18], значительно сужают область применения пенольда.

Ледовоздушная подушка также не полностью предохраняет грунт от промерзания, особенно во второй половине зимы. Другим недостатком ее является ограниченная область применения, связанная с фильтрационными свойствами грунта. Необходимым условием применения этого способа является малая водопроницаемость грунта.

Указанные выше недостатки предохранения грунта от промерзания снегом, пенольдом и ледовоздушной подушкой исключаются при утеплении грунта теплоизоляционными материалами. Этот способ утепления является простым по технологии и относительно дешевым средством подготовки грунта к зимней разработке [19]. Преимущества его заключаются в том, что покрытие грунта теплоизолятором производится до наступления морозов, что позволяет сохранить запасы тепла, накопленного в течение теплого периода года, а предохраняемый от промерзания грунт значительный период времени может остаться талым.

Уменьшение прочности смерзания грунта осуществляется с помощью осеннего рыхления или засоления. Осеннее рыхление нарушает установившиеся связи между частицами грунта, уменьшает число контактов между ними. Это ведет к уменьшению силы сцепления между частицами грунта при промерзании и, соответственно, к уменьшению прочности мерзлого грунта. Основным недостатком способа рыхления является то, что разрыхленный грунт после дождя уплотняется и смерзается так же прочно, как и в естественных условиях.

Засоление может осуществляться за счет искусственного увеличения концентрации соли на предварительной стадии подготовки к землеустроительным работам. При этом второй способ более эффективен в условиях повышенной влажности грунта.

Экспериментальными исследованиями, проведенными при подготовке к вскрышным работам на площадях угольных бассейнов ЗАО СУЭК (г. Красноярск), в практике ООО «Ачинская ДПМК» при строительстве автомобильных подъездных работ Богучанского района

в различных климатических условиях Красноярского края доказана возможность широкого применения карбамидного поропласта для предохранения грунта от промерзания. При этом выявлено, что эффективность применения поропласта незначительно зависит от типа грунта, наличия в нем каменистых включений, но существенно зависит от условий нанесения на грунт. Утепленный карбамидным поропластом, толщина которого составила 200 мм, песчано-гравийный грунт в Богучанском районе сохранялся в талом состоянии в течение двух месяцев после снижения среднесуточной температуры до  $-10^{\circ}\text{C}$ . Промерзание грунта и понижение его температуры ниже 0 началось в первой декаде января и только в конце второй декады достигло  $-7^{\circ}\text{C}$ . Выполненные подготовительные мероприятия позволили проводить землеустроительные работы без дополнительного рыхления в течение первых трех зимних месяцев.

Подготовительные работы с применением карбамидного поропласта при производстве вскрышных работ в Ирбейском районе проводились на момент промерзания суглинистого грунта влажностью 16 % на глубину 0,4 м в начале октября. В ходе выполнения вскрышных работ 10 ноября выявилось, что промерзший слой оттаял под утеплителем, а в мерзлом состоянии находится пограничный с поропластом слой, толщина которого в середине утепляемой площади не превышает 0,05 м, за счет теплового потенциала, накопленного в летний период.

Одним из перспективных способов удешевления зимних земляных работ в мелиоративном строительстве в условиях Сибири и повышения интенсификации их выполнения является предохранение грунта от промерзания теплоизоляционными материалами. В настоящее время известны высокоэффективные теплоизоляторы – заливочные вспененные полимерные материалы, изготавливаемые непосредственно на месте утепления грунта.

Для утепления грунта часто применялись традиционные утеплители: опилки, шлак, торф, солома и т. д. Однако область их применения была весьма ограничена. Эти материалы являются отходами производства местных предприятий. Перевозка их на дальнейшее расстояние значительно удорожает стоимость утепления грунта, так как не полностью используется грузоподъемность транспортных средств. Кроме того, традиционные утеплители с течением времени значительно уплотняются. Это приводит к уменьшению термического сопротивления теплоизоляционного слоя.

Для предохранения грунта от сезонного промерзания применяются эффективные теплоизоляторы – вспененные полимерные мате-

риалы, которые по своим теплоизоляционным свойствам превосходят традиционные утеплители. Так, если коэффициент теплопроводности опилок равен 0,08–0,25 ккал/(м · ч · град), то у вспененных полимерных материалов он составляет 0,025–0,068 ккал/(м · ч · град) [20].

Эффективность утепления грунта вспененными полимерными материалами на больших площадях доказана многочисленными экспериментами и опытными работами, проведенными Всесоюзным научно-исследовательским институтом нерудных материалов (ВНИИНерудом), Всесоюзным научно-исследовательским институтом гидротехники (ВНИИГ) им. Б. Е. Веденеева [21–23], Иркутским Иргиредметом [24], Центральным научно-исследовательским институтом строительных материалов ЦНИИСом [25], Институтом теплофизики СО АН СССР [26–28]. В большинстве случаев проведенных ими экспериментальных и опытных работ показано, что грунт сохраняется практически в талом состоянии в течение почти всей зимы. Применение вспененных полимерных материалов эффективно также для утепления сыпучих материалов в штабелях. Об этом свидетельствуют опытные работы ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [29]. Исследованиями ВНИИНеруда установлена эффективность зимнего утепления грунта [30].

Основой для изготовления вспененных полимерных материалов служит полиэтилен, полистирол, поливинилформаль, поливинилхлорид, политетрафтораэтилен, полиуретан, кремний органический, эпоксидные, феноло- и мочевино-формальдегидные смолы, поставляемые химической промышленностью. Большинство вспененных полимерных материалов изготавливается в заводских условиях на стационарных установках [31, 32]. Стоимость таких материалов пока еще сравнительно высока. Даже при получении дешевого вспененного полимерного материала на заводе стоимость утепления грунта им будет высокой, так как перевозка от места изготовления к месту утепления повысит стоимость работы из-за неполного использования грузоподъемности транспортных средств [33–35]. Исходя из этого наиболее приемлемыми следует считать те заливочные вспененные материалы, которые изготавливают непосредственно на месте производства работ.

В настоящее время разработаны заливочные вспененные полимерные материалы, изготавливаемые на основе полиуретана, феноло- и мочевино-формальдегидных смол [33, 37]. Технология их получения сравнительно простая и не требует сложного оборудования. Это позволило создать передвижные или переносимые установки для изготовления вспененных материалов непосредственно на месте утеп-

ления [31, 35, 38]. Вспененные материалы поступают в виде жидкой пены, хорошо покрывающей любую неровную поверхность. Этого нельзя осуществить при покрытии готовыми плитами, изготовленными заранее на заводе. Кроме того, вспененные на месте укладки материалы лучше сцепляются с поверхностью, чем заранее сделанные плиты.

Из упомянутых выше пенопластов более дешевыми являются мочевино-формальдегидные (карбамидные) вспененные материалы. В нашей стране изготавливаются несколько типов заливочных карбамидных вспененных полимеров:

- мочевино-формальдегидный пенопласт МФП, состав которого разработан во Всесоюзном научно-исследовательском институте сертификации стандартизации (ВНИИСС) [29];
- быстротвердеющая пена ПКЗ, состав ее разработан во Всесоюзном научно-исследовательском институте (ВНИИГе) им. Б. Е. Веденеева совместно с Сибирским научно-исследовательским институтом цементной промышленности (СибНИИпроектцементом) [21];
- модифицированные быстротвердеющие пены БТП-М1, БТП-М2 и БТП-М3, разработанные в Ленинградском зональном научно-исследовательском и проектном институте (ЛенЗНИИЭПе) [23];
- высокократная быстротвердеющая пена, разработанная в Институте теплофизики СО АН СССР с участием СибНИИпроектцемента [27].

За рубежом известны несколько типов вспененных карбамидных материалов [37]:

- в Германии – пиатерм ипорка и изошаум, при этом изошаум изготавливают непосредственно на месте работ;
- в Чехии – мофетерм;
- в Польше – пианисол.

Модифицированные быстротвердеющие пены БТП-М1, БТП-М2, БТП-М3 предназначены в основном для утепления строительных конструкций. Стоимость их выше стоимости пены карбамидной заливочной (ПКЗ) за счет применения модифицирующих и стабилизирующих добавок (резорцина, синтетического латекса).

Высокократная быстротвердеющая пена разработана специально для утепления грунта. Ее стоимость ниже стоимости ПКЗ за счет высокой кратности, достигающей 50–100. Кратность – это отношение объема пены к объему компонентов. С повышением кратности вспененного полимерного материала уменьшается расход компонентов

и снижаются затраты утепления. В то же время с повышением кратности механическая прочность утеплителя резко уменьшается. Прочность на сжатие высокократной быстротвердеющей пены не превышает  $1,8\text{--}2,8 \text{ г/см}^2$ . Такая малая прочность пены приводит к большой ее усадке, что снижает теплоизолирующий эффект от ее применения. Прочность же ПКЗ составляет  $0,055\text{--}0,42 \text{ кг/см}^2$  и значительно превышает прочность высокократной ПКЗ. Вследствие этого в зимнее время не происходит усадки ПКЗ.

Одним из эффективных способов подготовки грунта к зимней разработке является предохранение грунта от промерзания теплоизоляционными материалами. Принцип действия его заключается в сохранении в грунте тепла, накопленного им за лето, и в разработке зимой талого грунта обычными землеройными машинами. При этом условия разработки утепленного грунта идентичны летним, производительность землеройных машин остается почти на уровне летней. Кроме того, при укладке зимой в земляные сооружения утепленного грунта качество этих сооружений повышается по сравнению с сооружениями, уложенными с примесью мерзлого грунта. Это отвечает требованиям повышения качества продукции. Ко всему этому нужно добавить, что обеспечивается круглогодичная работа обычных землеройных машин, то особенно важно для мелиоративно-строительных организаций.

При использовании в качестве утеплителя вспененных полимерных материалов повышается эффективность предохранения грунта от промерзания, значительно снижаются затраты на утепление грунта. Это связано с тем, что вспененные полимерные материалы обладают лучшими теплоизоляционными свойствами, чем традиционные утеплители (опилки, шлак и др.). Они не являются побочными продуктами местных предприятий, как традиционные утеплители, а изготавливаются из материалов, поставляемых промышленностью. Теплоизоляционные свойства вспененных полимерных материалов в течение зимы практически не меняются, в то время как традиционные утеплители в течение зимы значительно уплотняются, уменьшая этим термическое сопротивление теплоизоляционного слоя и снижая эффект утепления грунта. То есть технология предохранения грунта от промерзания вспененным полимерным материалом является более прогрессивной. Разработка такой технологии весьма актуальна, а внедрение ее результатов в производство даст большой экономический эффект.



Эта технология имеет особо важное значение для мелиоративных организаций в условиях Сибири, где продолжительное время наблюдается глубокое промерзание грунта. В таких условиях глубина копания широко применяемых экскаваторов значительно меньше глубины промерзания грунта. Наиболее распространенное рыхление мерзлого грунта клин-бабой является одним из малопродуктивных, дорогих и трудоемких способов. К тому же при рыхлении клин-бабой невозможно выдержать проектные границы выработки из-за невозможности прицельного сбрасывания клин-бабы машинистом. Вследствие этого поперечное сечение выработки увеличивается на 10–20 %. Кроме того, из-за больших динамических перегрузок во время рыхления клин-бабой происходит частая поломка механизма, к которому подвешена клин-баба. Естественно, что все это значительно удорожает стоимость рыхления мерзлого грунта клин-бабой. Следовательно, для условий Сибири более эффективным является предохранение грунта от промерзания вспененным полимерным материалом.

В Сибирском научно-исследовательском институте гидротехники и мелиорации (СибНИИГиМе) в 1972–1975 гг. была разработана технология предохранения грунта от промерзания быстротвердеющей пеной, которая изготавливается на основе дешевой карбамидной смолы «Крепитель М» и является одной из самых дешевых среди карбамидных пенопластов и наиболее приемлемой по своим физико-механическим свойствам для утепления грунта. Дальнейшая разработка и усовершенствование этой технологии, что и рассматривается в данной работе, позволит значительно повысить ее экономическую эффективность.

Для применения любой технологии на производстве должны быть механизированы основные процессы. В технологии утепления грунта быстротвердеющей пеной такими процессами являются изготовление материала и нанесение его на грунт. Обычно эти операции выполняются с помощью специальной установки.

В СибНИИГиМе была разработана и изготовлена мобильная производительная установка для изготовления и нанесения быстротвердеющей пены. Установка агрегирована с автомашиной КамАЗ-4308 и передвижной компрессорной станцией. Испытание показало, что установка работоспособна, изготавливает качественную быстротвердеющую пену ПКЗ повышенной кратности (до 30), что позволило значительно снизить себестоимость утепления грунта. Техническая производительность установки равна 70 м<sup>3</sup> ПКЗ в час, что вполне дос-

таточно для применения на производстве. Анализ результатов испытания выявил, что разработанная СибНИИГиМом установка отвечает предъявленным требованиям и может успешно применяться на производстве.

Многие строительные организации проявляют большой интерес к технологии предохранения грунта от промерзания быстротвердеющей пеной и изъявляют желание внедрить эту прогрессивную технологию у себя на производстве. Однако этот интерес и желание значительно падают как только они узнают, что установки для выполнения этой работы промышленностью не производятся. Это и понятно, так как профиль работы этих организаций – строительство и, может быть, еще ремонт строительных машин, но не изготовление новых машин и механизмов. Поэтому настало время промышленного производства установки для изготовления и нанесения быстротвердеющей пены с целью широкого внедрения прогрессивной технологии предохранения грунта от промерзания в народное хозяйство. По нашим расчетам экономический эффект от внедрения этой технологии составит 17,1 млн руб. в год [12, 39].

Пространственно-климатические условия расположения грунта в северной части Восточной Сибири определяют необходимость утепления земель, планируемых к рекультивации.

В настоящее время существует большое количество теплоизолирующих материалов и оборудования для их производства: аэрогели; базальтовая теплоизоляция; вермикулит теплоизоляционный; вспененный каучук; вспененный полипропилен; вспененный полиэтилен; гидроизоляционные материалы; древесно-волоконистые теплоизоляционные материалы; минераловатная теплоизоляция; пена монтажная; пеноизол; пенополистирол; пенополиуретан; пеностекло; перлит теплоизоляционный; полиэфирные волокна (ПОЛИЭСТР); резольные пенопласты; совелитовые изделия; стеклоткань; целлюлозная теплоизоляция.

Самыми распространенными на сегодняшний день материалами являются минеральная вата и пенополистирол.

Сравним характеристики этих материалов с поропластами. Минеральная вата – это крупноволокнистый утеплитель, изготавливаемый из углеродистых сплавов минералов, отходов металлов и фенольных смол. Пенополистирол – лёгкий газонаполненный материал класса пенопластмасс на основе полистирола, его производных (полимонохлорстирол, полидихлорстирол) или сополимеров стирола с акрилонитрилом и бутадиеном (табл. 11).

**Сравнительный анализ технико-экономической эффективности теплоизоляции при использовании полимерных утеплителей и традиционной минеральной ваты**

Показатели	Пенополистирол	Минеральная вата	Поропласт
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °К)	0,040–0,064	0,052–0,070 (сухая) 0,18 (мокрая)	0,010–0,034
Толщина покрытия, мм	35–70	120–220	15–35
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	40–160	55–150	8–75
Пористость	Закрытая	Открытая	Закрытая
Эффективный срок службы, лет	25–30	5	20–30
Производство работ	Круглосуточно	Теплое время года, сухая погода	Круглосуточно
Влагонасыщение, агрессивные среды (растворители, кислоты и щелочи); % об. при 20°С за 30 суток	6 Устойчив	100 Теплоизоляционные свойства теряются, восстановлению не подлежат	5–8 Устойчив
Экологическая чистота	Безопасен Разрешено применение в жилых зданиях Минздравом РФСР № 07/6–561 от 26.12.86	Аллерген	Безопасен Разрешено применение в жилых зданиях Минздравом РФСР № 07/6–561 от 26.12.86
Рабочая температура, °С	–180–+150	–40°–+300	–50– +120
Фактические тепловые потери, %	До 2–3 В 1,7 раза ниже нормативных СНиП 2.04.14-88 Энергосбережение, №1, 1999	До 25 Превышение нормативных после 12 месяцев эксплуатации	До 2–3 В 1,9 раза ниже нормативных СНиП 2.04.14-88 Энергосбережение, №1, 1999

Пожарно-технические характеристики поропластов:

- группа горючести – по ГОСТ 30244–94, не выше;
- группа воспламеняемости – по ГОСТ 30402–96, не выше;

- группа дымообразующей способности – по ГОСТ 12.1.044–89 не выше

- группа токсичности – по ГОСТ 12.1.04–89 не выше [42].

Современный карбамидный поропласт на рынке России представлен под торговой маркой «Униполимер-Т», к достоинствам которого можно отнести хорошие теплоизоляционные свойства, низкую стоимость и высокую технологичность. Отсутствие способности к развитию стабильного процесса горения и к образованию расплава свидетельствует о пониженной пожарной опасности «Униполимера-Т» [40]. Но перспективы использования карбамидных поропластов сдерживаются прежде всего низкой механической прочностью и токсичностью, связанной с выделением из них формальдегида за счёт гидролитической или термодеструкции химической структуры материала по концевым группам и эфирным связям.

При изготовлении быстротвердеющей пены и ее нанесении на грунт выделяется свободный формальдегид, обладающий токсикологическим свойством. Вследствие этого необходимо знать влияние быстротвердеющей пены на экологическое состояние утепленного грунта.

Следовательно, для условий Сибири более эффективным является предохранение грунта от промерзания вспененными заливочными вспененными полимерными материалами, изготавливаемыми непосредственно на месте утепления грунта.

Утепляющий полимерный материал в традиционном исполнении имеет ряд существенных эксплуатационных недостатков – высокая горючесть, воспламеняемость, недостаточная прочность, а также большой индекс токсичности –140–150 %, при этом равномерная концентрация содержания формальдегида НСН<sub>1</sub> в рабочей зоне превышает нормы ПДК, что и сдерживает его широкое использование.

Для снижения токсичности, уменьшения степени горючести и повышения прочности пенопласта разработана и используется для предохранения от сезонного промерзания грунтов различного гранулометрического состава, влажности и температурного режима промерзания композиция карбамидного пенопласта [16].

В модернизированном карбамидном поропласте [40] массовая доля свободного формальдегида не превышает 0,15 %, экстракты коры хвойных пород содержат таннины и полифенолы, в качестве пенообразователя использована альфобензо-сульфанокислота или сульфанонол, в качестве органоминерального модификатора, повышающего

прочность, используется зола-унос, получаемая от сжигания углей и содержащая оксиды железа, алюминия, кальция, магния.

Введение на стадии изготовления в эмульсионный раствор экстрактов коры хвойных пород, содержащих таннины и полифенолы, понижает токсичность и горючесть карбамидного пенопласта за счет химического взаимодействия формальдегида с полифенолами.

Следовательно, для предохранения грунта от промерзания наиболее подходящим утеплителем является быстротвердеющая пена ПКЗ [16].

### 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОПЛАСТОВ

Для расчета толщины пены-утеплителя на карбамидной основе воспользуемся среднестатистическими метеорологическими данными месячных температур, высоты снежного покрова, плотности снежного покрова и количества суточных градусо-часов отрицательных температур по северной зоне Красноярского края. Исходя из эксплуатационных характеристик парка землеройных машин и допустимых эксплуатационных затрат на разработку грунта в зимних условиях зададимся допустимой глубиной сезонного промерзания грунта, равной 1,0 м. Показатели объемной массы грунта и его влажности приняты из паспорта грунтов Красноярского края. В качестве обязательного условия при расчетах принимаем, что нанесение пены-утеплителя на предохраняемый грунт производится в осенний период года, в условиях отсутствия снега (условно принимаем период с 20 сентября по 07 октября), а плотность снежного покрова является величиной постоянной и равна 0,2 т/м<sup>3</sup>.

Необходимая толщина пены-утеплителя на карбамидной основе для предохранения грунта от сезонного промерзания определится по формуле [19]:

$$h = K_y L_y (K_p K_w R_o - R_c), \quad (5)$$

где  $K_y$  – коэффициент усадки пены-утеплителя,  $L_y$  – коэффициент теплопроводности утеплителя, ккал/(м · ч · °С),  $K_p$  – коэффициент влияния плотности грунта,  $K_w$  – коэффициент влияния влажности грунта,  $R_o$  – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания, м<sup>2</sup> · ч · °С/ккал,  $R_c$  – термическое сопротивление снега, м<sup>2</sup> · ч · °С/ккал.

Значения фактических градусо-часов отрицательных температур каждого месяца позволяют определить величины градусо-суток и по графику (рис. 9) термическое сопротивление мерзлого грунта.

Тепловые потери с каждого 1 м<sup>3</sup> грунта под покрытием пены-утеплителя определяются по формуле

$$Q = H \cdot (G \cdot L + 0,5t_m \cdot C), \text{ ккал/м}^2, \quad (6)$$

где  $H$  – допустимая глубина сезонного промерзания грунта, м;  $G$  – содержания льда в мерзлом грунте, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – удельная теплота плавления

ния льда, ккал/кг;  $t_m$  – температура мерзлого грунта, °С;  $C$  – объемная теплоемкость мерзлого грунта, ккал/(м<sup>3</sup> °С).

Коэффициент влияния объемной плотности ( $K_p$ ) зависит от типа грунта и его гранулометрического состава. Для практических расчетов рекомендуется принимать значение  $K_p = 1,00$  для грунтов плотностью от 1 500 до 1 700 кг/м<sup>3</sup> и  $K_p = 0,85$  – для грунтов плотностью от 1 700 кг/м<sup>3</sup> и более.

Значение коэффициента влияния влажности грунта ( $K_w$ ) рекомендуется принимать при влажности грунта от 8 % до 20 % равным 1,35, а при влажности грунта более 20 % – 0,71.

Исходя из полученных значений фактических градусо-часов отрицательных температур, воздействующих на грунт, по номограмме (рис. 9) находят общее термическое сопротивление пены утеплителя, способное защитить грунт от промерзания.

При разработке грунта в январе значение термического сопротивления пены утеплителя равно 1,9 м<sup>2</sup>°С/Вт, в феврале – 2,7 м<sup>2</sup>°С/ккал, в марте – 3,0 м<sup>2</sup>°С/ккал. Принимаем характеристики планируемого к разработке грунта – значение плотности грунта 1 700 кг/м<sup>3</sup>, а значение влажности 20 %. При этом коэффициент влияния плотности  $K_p = 0,85$ , а коэффициент влияния влажности грунта  $K_w = 0,71$ .

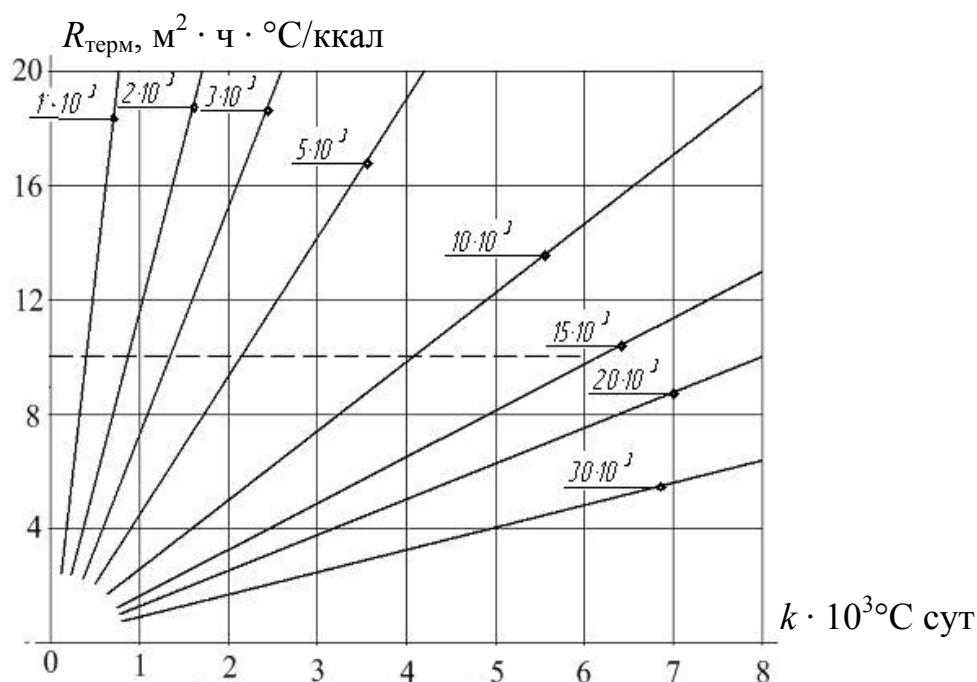


Рис. 9. Зависимость термического сопротивления грунта от индекса промерзания и допустимых тепловых потерь

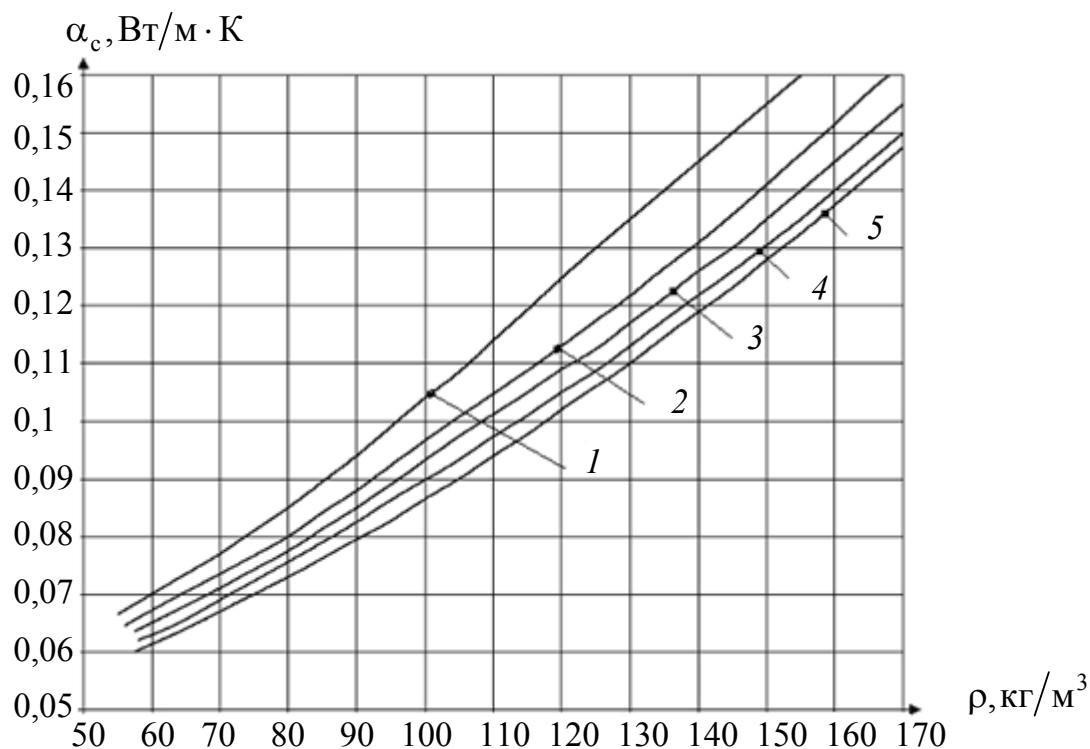


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплопроводности снега от плотности при различных отрицательных температурах: 1 – от 0 до  $-10^\circ\text{C}$ ; 2 – от  $-10$  до  $-20^\circ\text{C}$ ; 3 – от  $-20$  до  $-30^\circ\text{C}$ ; 4 – от  $-30$  до  $-40^\circ\text{C}$ ; 5 – от  $-40$  до  $-50^\circ\text{C}$

Термическое сопротивление снега определяется по формуле

$$R_c = h_c/L_c, \quad (7)$$

где  $h_c$  – высота снежного покрова, м  $L_c$  – коэффициент теплопроводности снега, ккал/(ч·град).

Коэффициент теплопроводности  $\alpha_c$  снежного покрова является величиной непостоянной и зависит от плотности покрова  $\rho_c$  и от его температуры (рис. 10).

Экспериментальные исследования теплопроводности снежного покрова выявили существенное влияние температуры окружающего воздуха при постоянной значении плотности покрова. По результатам исследования влияния температуры и плотности снежного покрова на значение коэффициента теплопроводности выявлено пороговое значение температуры и получены уравнения аппроксимации:

для диапазона температур от  $-1$  до  $-10^\circ\text{C}$

$$\alpha_c = 1,7445987 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 5,9389402 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0273363; \quad (8)$$



для диапазона температур от  $-10$  до  $-20^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_c = 1,9629831 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 4,1298844 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0351067; \quad (9)$$

для диапазона температур от  $-20$  до  $-30^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_c = 1,7112416 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 4,238921 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0332151; \quad (10)$$

для диапазона температур от  $-30$  до  $-40^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_c = 1,7676153 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 3,8117726 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0337707; \quad (11)$$

для диапазона температур от  $-40$  до  $-50^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_c = 2,1880885 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 2,8098883 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0365393. \quad (12)$$

Требуемая площадь, приготавливаемая к зимней разработке, посредством их утепления быстротвердеющими полимерными пенами рассчитывают по формуле [3]:

$$F = \frac{K \cdot V}{h \cdot j}, \quad (13)$$

где  $F$  – необходимая площадь утепления,  $\text{м}^2$ ;  $V$  – потребность в сырьевом материале, т;  $h$  – высота конуса, м;  $j$  – объемная масса сырьевого материала,  $\text{т}/\text{м}^3$ ;  $K$  – коэффициент, учитывающий заложение откоса и дополнительную ширину на боковое промерзание. Для предварительных расчетов можно принять  $K = 1,1-1,3$ . Расчет требуемого количества компонентов рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{F \cdot h \cdot C_i \cdot G_i}{100 \cdot K_{\text{кр}}}, \quad (14)$$

где  $Q$  – потребное количество  $i$ -го компонента, т;  $F$  – площадь утепления,  $\text{м}^2$ ;  $h_c$  – толщина слоя БТП, м;  $C_i$  – содержание  $i$ -го компонента в составе БТП, %;  $G_i$  – плотность  $i$ -го компонента,  $\text{т}/\text{м}^3$ ;  $K_{\text{кр}}$  – кратность БТП.

Потребность в концентрированной кислоте определяют по формуле

$$Q_{\text{к.кис}} = \frac{Q_{\text{разбав}} \cdot K_1}{K_2}, \quad (15)$$

где  $Q_{\text{к.кис}}$  – потребность в концентрированной кислоте, т;  $Q_{\text{разб}}$  – потребность в разбавленной кислоте, определяется по формуле (14);  $K_1$  – концентрация разбавленной кислоты в составе БТП, %;  $K_2$  – концентрация основного вещества в концентрированной кислоте, %.

На основании широкого внедрения способа теплозащиты с помощью БТП в различных регионах страны, а также теоретических расчетов по разработанной методике оптимальная толщина слоя карбамидного поропласта-утеплителя принимается 0,2 м. Кратность пены должна быть не менее 25 объем. единиц.

Расход компонентов на 1000 м<sup>2</sup> утепляемой поверхности составляет, т: смола – 2,2; пенообразователь – 0,42; соляная кислота – 0,24.

На весь объем (10 тыс. м<sup>3</sup>) всех компонентов потребуется соответственно в 10 раз больше.

Для расчета утеплителя по уравнению (5) необходимо:

- определить вид грунта, его влажность и объемную массу;
- получить сведения о температуре воздуха, толщине и плотности снежного покрова в зимнее время, о количестве осадков осенью (в период между нанесением утеплителя и появлением устойчивого покрова);
- по продолжительности времени предохранения грунта от промерзания и температуры воздуха рассчитать количество градусо-часов; сумму произведений среднемесячной температуры воздуха на продолжительность промерзания в течение месяца в часах.

Для расчета толщины пены-утеплителя на карбамидной основе воспользуемся среднестатистическими метеорологическими данными месячных температур, высоты снежного покрова, плотности снежного покрова и количества суточных градусо-часов отрицательных температур по северной зоне Красноярского края (табл. 12) и исходя из эксплуатационных характеристик парка землеройных машин и допустимых эксплуатационных затрат на разработку грунта в зимних условиях зададимся допустимой глубиной сезонного промерзания грунта, равной 0,4м.

Показатели объемной массы грунта и его влажности выбираем из паспорта грунтов Красноярского края. Для расчетов принимаем в качестве обязательного условия, что нанесение пены-утеплителя на предохраняемый грунт производится в осенний период года, в усло-

виях отсутствия снега (условно принимаем период с 20 сентября по 07 октября), а значение плотности снежного покрова является величиной постоянной и равна  $0,2 \text{ т/м}^3$ .

Таблица 12

### Среднестатистические данные северной зоны Красноярского края

Название месяца разработки грунта	Среднемесячная температура, °С	Высота снежного покрова, м
Ноябрь	-9,5	0,18
Декабрь	-23,1	0,22
Январь	-27	0,32
Февраль	-25,5	0,24
Март	-10,7	0,20
Апрель	-8,5	0,15

Продолжительность времени промерзания грунта по каждому месяцу определим исходя из количества дней в каждом месяце, а количество фактических градусо-часов отрицательных температур, воздействующих на грунт, – с учетом среднемесячных температур по северной зоне Красноярского края и числа дней по каждому из зимних месяцев:

$$\text{ноябрь } 9,5 \cdot 720 + 2232 = 9072;$$

$$\text{декабрь } 23,1 \cdot 744 + 9072 = 26258,4;$$

$$\text{январь } 27,0 \cdot 744 + 26258,4 = 46346,4;$$

$$\text{февраль } 25,0 \cdot 672 + 46346,4 = 63146,4;$$

$$\text{март } 10,7 \cdot 744 + 63146,4 = 71107,2;$$

$$\text{апрель } 8,5 \cdot 744 + 71107,2 = 77431,2.$$

Исходя из полученных значений фактических градусо-часов отрицательных температур, воздействующих на грунт, по номограмме (рис. 11) находим общее термическое сопротивление пены утеплителя, способное защитить грунт от промерзания.

В январе значение термического сопротивления пены утеплителя равно  $1,9 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$ , в феврале –  $2,7 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/ккал}$ , в марте –  $3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/ккал}$ . Принимаем характеристики планируемого к разработке грунта – значение плотности грунта  $1700 \text{ кг/м}^3$ , а значение влажности – 20 %. При этом коэффициент влияния плотности  $K_p = 0,85$ , а коэффициент влияния влажности грунта  $K_w = 0,71$ .

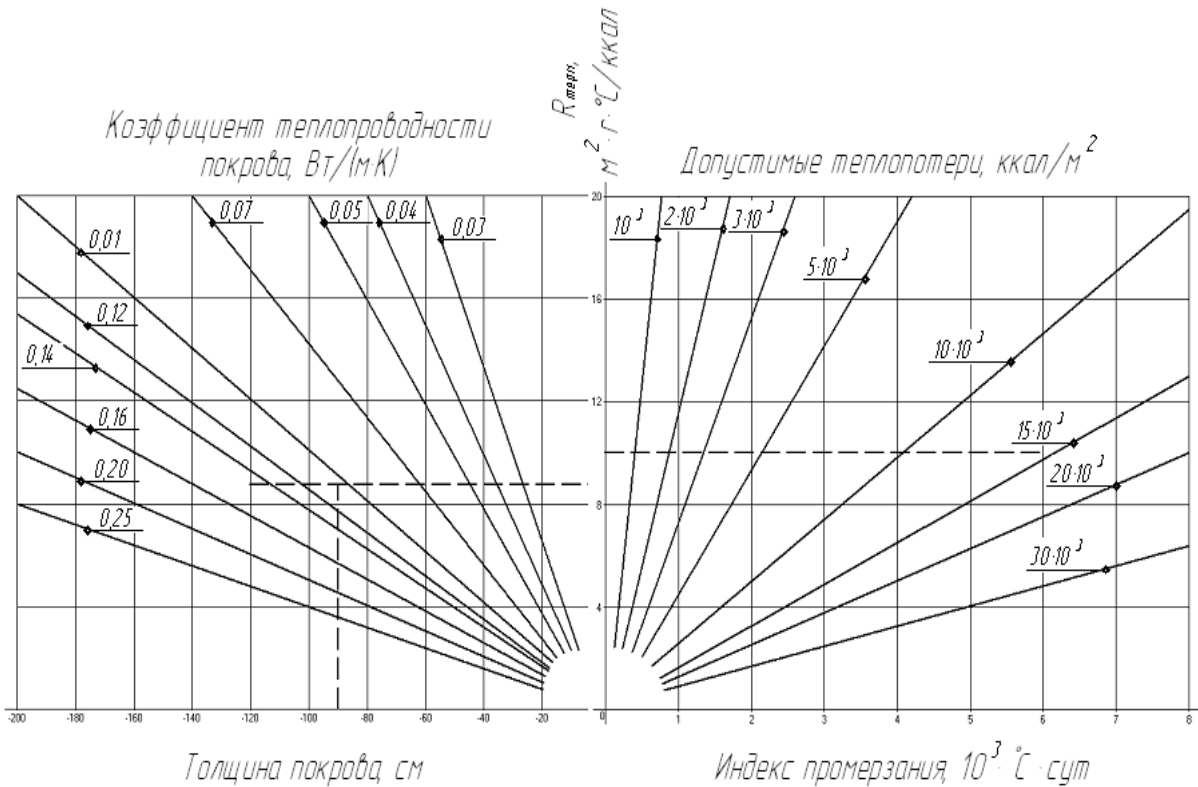


Рис. 11. Номограмма расчета параметров пен-утеплителей

Графическое отображение зависимостей коэффициента теплопроводности от температуры и плотности снежного покрова приведено на рис. 10.

С учетом значений коэффициентов теплопроводности снежного покрова, полученных по формулам (8)–(12), усредненное значение термического сопротивления снежного покрова составит:

в январе

$$R_c = (0,18 + 0,22 + 0,32) / 3 / 0,105 = 2,286 \text{ м} \cdot \text{°C} / \text{Вт};$$

в феврале

$$R_c = (0,18 + 0,22 + 0,32 + 0,24) / 4 / 0,092 = 2,609 \text{ м} \cdot \text{°C} / \text{Вт};$$

в марте

$$R_c = (0,18 + 0,22 + 0,32 + 0,24 + 0,20) / 5 / 0,105 = 1,752 \text{ м} \cdot \text{°C} / \text{Вт};$$

С учетом весовой влажности (400 %) пены утеплителя принимаем значение коэффициента теплопроводности, имеющей кратность 30 объем. единиц,  $\Lambda_{п} = 0,097 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{°C})$ .

Толщина слоя пены-утеплителя, способная предотвратить сезонное промерзание грунта, планируемого к разработке, в январе месяце

$$h = 1,1 \cdot 0,097(0,95 \cdot 0,87 \cdot 0,85 \cdot 5,4 - 2,286) = 0,161 \text{ м};$$

в феврале месяце

$$h = 1,1 \cdot 0,097(0,95 \cdot 0,87 \cdot 0,85 \cdot 6,2 - 2,609) = 0,186 \text{ м};$$

в марте месяце

$$h = 1,1 \cdot 0,097(0,95 \cdot 0,87 \cdot 0,85 \cdot 6,7 - 1,752) = 0,315 \text{ м}.$$

Таким образом, нанесение пены-утеплителя толщиной 0,315 м в октябре месяце на участок, расположенный в северной зоне Красноярского края, планируемый к разработке в марте месяце, надежно предохраняет от сезонного промерзания на глубину не более 0,4 м, что позволяет использовать при разработке мерзлого грунта одноковшовые экскаваторы емкостью от 0,5 до 1,0 м<sup>3</sup>, а также траншейные экскаваторы ЭТР-134.

Графики функции температуры утепленного грунта по глубине его залегания для зимних месяцев года позволяют оценить коэффициент их прочности, повысить эффективность разработки сезонно-мерзлых грунтов.

Натурные исследования процесса сезонного промерзания грунтов выявили одинаковый характер зависимости глубины промерзания и температуры всего разнообразия грунтов под слоем карбамидного пенопласта, исследуемого региона, независимо от их гранулометрического состава.

Допустимая глубина промерзания утепленного грунта определяется в зависимости от типа и мощности применяемого землеройного оборудования и из требований на содержание мерзлых кусков в разрабатываемом грунте.

В соответствии с типом утепленного грунта и с учетом из количества градусо-часов и допускаемой глубины промерзания грунта был разработан способ определения общего термического сопротивления по номограммам рис. 12, 13, требуемое для предохранения грунта от промерзания. Для этого расчетное количество градусо-часов отложить на оси абсцисс, на оси координат – значение допускаемой глубины промерзания [18].

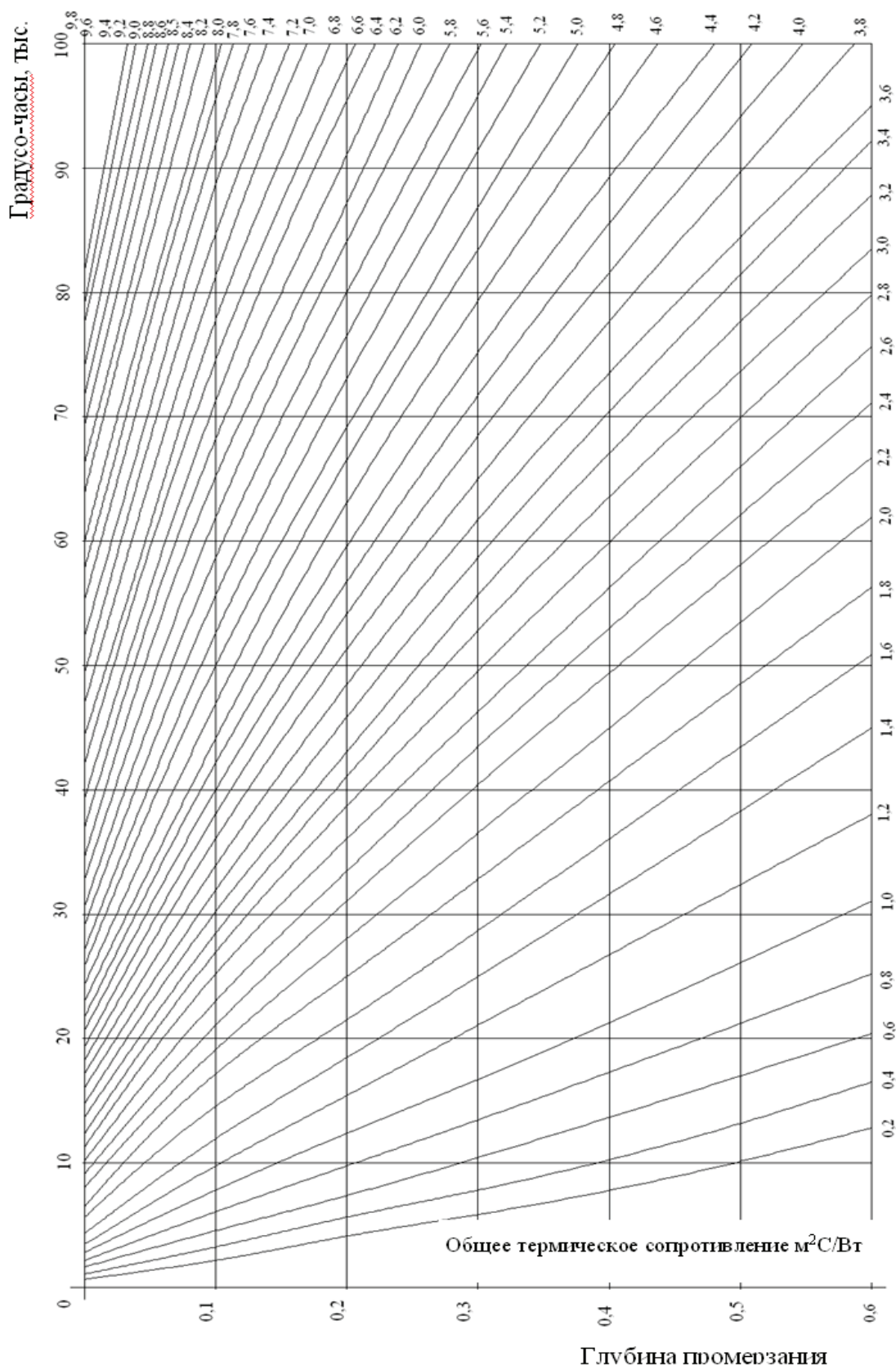


Рис. 12. Зависимость глубины промерзания глины и суглинка от количества градусо-часов при различных общих термических сопротивлениях

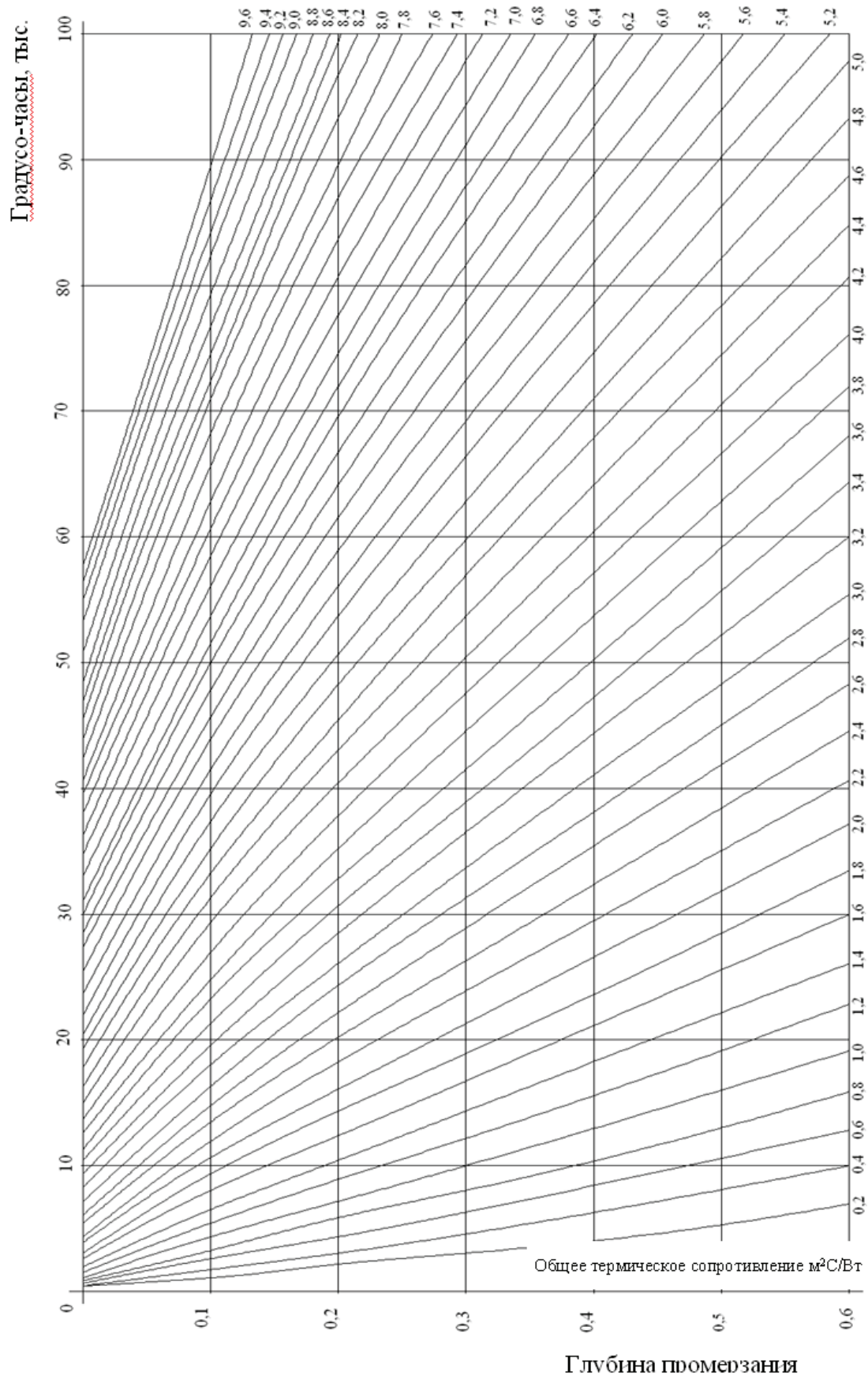


Рис. 13. Зависимость глубины промерзания песчаных и супесчаных грунтов от количества градусо-часов при различных общих термических сопротивлениях

С учетом влажности и объемной массы утепляемого грунта определяются коэффициенты влияния влажности и объемной массы (табл. 13–15).

Исходя из метеорологических сведений рассчитываются коэффициент теплопроводности снега и его термическое сопротивление, а также определяются влажность БТП и соответствующей ей эффективный коэффициент теплопроводности.

Таблица 13

**Коэффициент влияния объемной массы грунта  $K_v$** 

Вид грунта	Объемный вес грунта, кг/м <sup>3</sup>						
	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Глинистый	1,32	1,24	1,12	1,00	0,87	0,80	–
Песчаный	1,28	1,25	1,13	1,00	0,93	0,85	0,77

Таблица 14

**Коэффициент влияния влажности глинистого грунта  $K_w$** 

Влажность, %	10	15	20	25	30
Коэффициент	1,60	1,26	1,00	0,85	0,72

Таблица 15

**Коэффициент влияния влажности песчаного грунта  $K_w$** 

Влажность, %	4	8	12	16	20	24
Коэффициент	1,90	1,35	1,00	0,84	0,71	0,61

Коэффициент теплопроводности снега рассчитывается по уравнению Б. В. Проскурякова[44]:

$$L_c = (0,87\rho_c + 0,018) \cdot 1,16, \quad (16)$$

где  $L_c$  – коэффициент теплопроводности снега, Вт/(м · °С);  $\rho_c$  – плотность снега.



Термическое сопротивление снега определяется по известному уравнению:

$$R_c = \frac{h_c}{L_c}, \quad (17)$$

где  $h_c$  – толщина снежного покрова, м.

Эффективный коэффициент теплопроводности БТП находят по следующим уравнениям:

при влажности БТП до 300 %

$$L_T = 0,04 + 10^{-3} \cdot W_T^{2,78}; \quad (18)$$

при влажности БТП от 300 % до 1200 %

$$L_T = 0,021 \cdot W_T - 0,002; \quad (19)$$

где  $W_T$  – весовая влажность БТП в долях единицы;

при влажности БТП 300 %  $L_T = 0,074$  Вт/(м · °С).

Дополнительная ширина теплоизоляционного слоя обусловлена боковым промерзанием и равна глубине промерзания в естественных условиях.

Приведены результаты сравнительного анализа изменения температурных режимов промерзания в условиях применения композиционного поропласта в сочетании с защитным гидроизоляционным покрытием наиболее представительных видов грунта, находящихся в различных режимах промерзания северной зоны Красноярского края.

Как известно, количество тепла проходящее через слой любого тела, пропорционально разности температур на границе слоя и времени протекания теплового процесса и обратно пропорционально термическому сопротивлению этого слоя. В соответствии с этим при утеплении грунта количество тепла, отводимое от грунта в воздушную среду, пропорционально разности температур поверхности грунта под утеплителем и воздуха, продолжительности предохранения грунта от промерзания и обратно пропорционально сопротивлению карбамидного поропласта:

$$Q_1 = \frac{F(t_{\text{п}} + t_{\text{в}})}{R_{\alpha} + R_{\text{т.п}}} \tau, \quad (20)$$

где  $Q_1$  – количество тепла, отводимое от грунта в воздушную среду, Дж;  $F$  – площадь поверхности грунта,  $m^2$ ;  $t_{п}$  – температура поверхности грунта под утеплителем,  $^{\circ}C$ ;  $t_{в}$  – температура воздуха,  $^{\circ}C$ ;  $\tau$  – продолжительность предохранения грунта от промерзания, сутки;  $R_{\alpha}$  – сопротивление поверхности теплоизоляции теплоотдаче,  $m^2 \cdot ^{\circ}C/Вт$ .

При утеплении грунта в зимних условиях процесс теплосбережения участвует не только карбамидный поропласт, но снежный покров.

Термическое сопротивление этого комбинированного слоя можно определить по формуле

$$R_{т.п} = R_c + R_{п}, \quad (21)$$

где  $R_c$  – термическое сопротивление снежного покрова,  $m^2 \cdot ^{\circ}C/Вт$ ;  $R_{п}$  – термическое сопротивление карбамидного поропласта,  $m^2 \cdot ^{\circ}C/Вт$ .

Температура утепленного грунта, как правило, больше чем грунта, находящегося в естественных условиях промерзания, что приводит и к большей разницы температур утепленного грунта и воздуха, что логично приводит к увеличению количества отводимого тепла от укрытой площадки в воздух. Но наличие карбамидного поропласта и его термическое сопротивление значительно сокращают отводимое тепло.

Очевидно, количество тепла  $Q_1$ , отводимое через теплоизоляцию в воздух, равно количеству тепла  $Q_2$ , подводимому от грунта к теплоизоляции:

$$Q_1 = Q_2. \quad (22)$$

Количество тепла  $Q_1$ , проходящее через теплоизоляцию, определяется по уравнению (15).

К карбамидному поропласту подводится тепло, выделяющееся за счет понижения температуры грунта от  $t_1$  до  $t_2$  за интервал времени  $\Delta t$ , оно включает тепло  $Q_3$ , подводимое при понижении температуры грунта за счет его теплоемкости, и тепло  $Q_4$ , выделяемое при замерзании влаги, находящейся в грунте.

Таким образом количество тепла, передаваемое от грунта к карбамидному поропласту в период замерзания граничного слоя грунта, определяется как

$$Q_2 = Q_3 + Q_4. \quad (23)$$

Количество тепла, отдаваемое грунтом, пропорционально его теплоемкости и величине изменения температуры, а теплоемкость

грунта – его объему [3]. В соответствии с этим количество тепла  $Q_3$ , подводимое при понижении, определим по формуле

$$Q_3 = C_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma}(t_1 - t_2) = C_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma}(t_1 - t_2), \quad (24)$$

где  $C_{\Gamma}$  – объемная теплоемкость мерзлого грунта, Дж/(м<sup>3</sup> · °С);  $V_{\Gamma}$  – объем мерзлого грунта, м<sup>3</sup>;  $t_1$  – температура грунта на момент времени  $\tau_1$ , °С;  $t_2$  – температура грунта на момент времени  $\tau_1 + \Delta \tau$ , °С;  $C_{\Gamma}$  – объемная теплоемкость талого грунта, Дж/(м<sup>3</sup> · °С);  $V_{\Gamma}$  – объем талого грунта, м<sup>3</sup>.

Объем мерзлого грунта

$$V_{\Gamma} = F \cdot h. \quad (25)$$

где  $F$  – площадь, м<sup>2</sup>;  $h$  – глубина промерзания грунта, м.

Объем талого грунта

$$V_{\Gamma} = F(H - h). \quad (26)$$

Здесь  $H$  – глубина горизонта грунта, на котором наблюдается постоянная температура, м.

Количество тепла  $Q_4$ , выделяемое при замерзании влаги, находящейся в порах и линзах грунта:

$$Q_4 = L\gamma \frac{W}{100} F \Delta h, \quad (27)$$

где  $L$  – удельная теплота замерзания влаги грунта, Дж/кг;  $\gamma$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – весовая влажность грунта, %;  $F$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>;  $\Delta h$  – увеличение глубины промерзания грунта за период времени  $\Delta \tau$ , м.

После подстановки в (22) и (23) значений  $Q_1$ ,  $Q_3$  и  $Q_4$  из (22), (24) и небольшого преобразования получим следующее уравнение для определения температуры поверхности грунта под утеплителем:

$$T_{\Pi} = t_{\text{в}} + \frac{R_{\alpha} + R_0}{\tau} \left[ C \cdot h(t_1 - t_2) + C_{\Gamma} (H - h) \cdot (t_1 - t_2) + 0,01W \cdot \gamma \cdot L \cdot \Delta h \right]. \quad (28)$$

Анализ уравнения (28) показывает, что существует прямая зависимость между температурой поверхности грунта под утеплителем

и температурой воздуха. Однако влияние последней на температуру поверхности грунта под утеплителем сглаживается эквивалентной температурой, представляющей собой второй член правой стороны уравнением (28) и поддерживаемой теплом, которое подводится от грунта при понижении его температуры.

При утеплении грунта температура его под граничным слоем повышается за счет эквивалентной температуры, которая увеличивается приблизительно в  $(1 + R_n)$  раз, по сравнению с естественными условиями, когда утепление производится за счет снежного покрова толщиной 200 мм. Это увеличение проходит за счет термического сопротивления утеплителя. До начала промерзания грунта, когда толщина утепляющего поропласта равна нулю, к поверхности грунта подводится тепло, пропорциональное теплоемкости талого грунта и возникающее при понижении температуры. С началом промерзания грунта это тепло несколько уменьшится, так как теплоемкость мерзлого грунта меньше, чем талого. Однако общее количество тепла, подводимое к поверхности грунта, будет больше за счет скрытой теплоты замерзания влаги грунта. Вследствие этого температура поверхности грунта повысится и соответственно потребуются более продолжительное время для дальнейшего углубления границы (зоны) промерзания.

В естественных условиях при интенсивном промерзании грунта количество тепла, подводимого к поверхности грунта, увеличивается за счет скрытой теплоты замерзания влаги грунта. Однако оно не повысит температуру верхних слоев грунта, так как это тепло интенсивно отводится в воздух. Такой процесс, наоборот, приводит к резкому понижению температуры верхних слоев грунта и его глубокому промерзанию. При его утеплении общее количество подводимого к его поверхности тепла вследствие большой теплоемкости и высокой температуры талого грунта будет не меньше, чем при интенсивном промерзании и в естественных условиях. Здесь большое значение имеет температура грунта при нанесении утеплителя.

Влияние физических свойств грунта на эквивалентную температуру выражается через его теплоемкость и скрытую теплоту замерзания влаги. Эти же величины зависят от плотности и влажности грунта. Естественно, чем больше плотность и влажность, тем выше эквивалентная температура поверхности грунта, и он дольше предохраняется от промерзания.

Существует обратно пропорциональная зависимость эквивалентной температуры от продолжительности предохранения промерзания

грунта, поэтому с течением времени эта температура снижается. В то же время подвод тепла снизу и уменьшение его отдачи в воздух из-за создания дополнительного термического сопротивления на поверхности грунта при покрытии его теплоизоляционным материалом приводят к значительному замедлению процесса понижения эквивалентной температуры и, соответственно, температуры поверхности грунта.

Из упомянутых выше факторов управляемым является термическое сопротивление утеплителя. От его величины зависят количество тепла, отводимого от грунта в воздух, температура грунта под утеплителем и продолжительность предохранения от промерзания. На единице площади термическое сопротивление любого материала зависит от толщины его слоя и коэффициента теплопроводности [3]:

$$R = \frac{h'}{\lambda}, \quad (29)$$

где  $R$  – термическое сопротивление материала,  $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ;  $h'$  — толщина слоя карбамидного поропласта, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .

Следовательно, температуру поверхности грунта можно регулировать только с помощью таких управляемых параметров, как толщина слоя и коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала.

Влияние теплоизоляции на глубину промерзания утепленного грунта можно проследить по известному уравнению В. С. Лукьянова [44]:

$$h = \sqrt{\frac{4\lambda_r \Delta t \tau}{2Q + C_r \Delta t}} + S^2 - S, \quad (30)$$

где  $h$  — глубина промерзания грунта, м;  $\lambda_r$  — коэффициент теплопроводности мерзлого грунта,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\Delta t$  – разность температуры промерзания грунта и средней температуры воздуха за зимний сезон,  $^\circ\text{C}$ ;  $\tau$  – продолжительность промерзания грунта, С;  $Q$  – скрытая теплота замерзания влаги грунта, Дж/м ;  $C_r$  — объемная теплоемкость мерзлого грунта, Дж/( $\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ );  $S$  – толщина слоя грунта, термическое сопротивление которого равно термическому сопротивлению слоя изоляции поверхности грунта и сопротивлению теплоотдачи с поверхности, м.

При утеплении грунта толщина слоя грунта

$$S = \lambda_r (R_\alpha + R_o). \quad (31)$$

Уравнение (30) подтверждает, что глубина промерзания утепленного грунта будет тем больше, чем больше коэффициент теплопроводности грунта, разность температур  $\Delta t$  промерзающего грунта и воздуха и продолжительность промерзания. На увеличение глубины промерзания одинаково влияют как температура воздуха в течение короткого промежутка времени, так и более высокая температура воздуха в течение продолжительного времени. Следовательно, влияние температуры воздуха и продолжительности процесса на промерзание утепленного грунта можно учитывать составляющей собой произведение количества градусо-часов отрицательной температуры и количества часов промерзания грунта.

Глубина промерзания грунта уменьшается с увеличением количества тепла, выделяемого при понижении температуры (за счет теплоемкости) и при замерзании влаги, находящейся в грунте (за счет скрытой теплоты). Значения этих величин увеличиваются при повышении влажности и большей плотности. В то же время при больших влажности и плотности грунта увеличивается и его коэффициент теплопроводности. Анализ значений этих свойств, приводимых Н. С. Ивановым [43] и М. С. Керстеном [48], показывает, что коэффициент теплопроводности грунта при большей плотности и влажности увеличивается на величину значительно меньшего порядка, чем объемная теплоемкость и теплота. Вследствие этого величина промерзания утепленного грунта с большей плотностью и влажностью будет значительно меньше, чем грунта с меньшими значениями этих свойств. На одном и том же участке свойства грунта и температура воздуха будут одинаковыми. Если принять определенное значение продолжительности промерзания грунта, то правый член подкоренного выражения (30) можно принять, постоянным. Тогда в (30) переменной величиной будет эквивалентный слой  $S$ , который при утеплении в соответствии с уравнениями (31) и (22) увеличивается на величину термического сопротивления теплоизоляционного материала. С увеличением эквивалентного слоя  $S$  происходит значительное уменьшение глубины промерзания утепленного грунта.

Расчет тепловых процессов по уравнениям (21), (23), (30) является приближенным, так как учитываются не все факторы, влияющие на эти процессы.

Теплопередача в грунте является сложным термодинамическим процессом, протекающим во влажной капиллярно-пористой среде. Этот процесс еще более усложняется при промерзании грунта. Здесь

неразрывно связаны перемещения влаги в жидкой и газообразной фазах с одновременным изменением температуры. Вместе с тем при промерзании грунта происходят изменения агрегатного состояния влаги и его различных физических свойств [45].

Теоретически этот вопрос достаточно разработан. Выведены системы дифференциальных уравнений, описывающие перенос тепла и влаги в капиллярно-пористых телах [41, 48]. В них учтены все основные факторы, участвующие в этом сложном термодинамическом процессе. Пользуясь ими, можно определить динамику температурного и влажностного режимов не только грунта, но и теплоизоляционного слоя и снежного покрова. Однако если коэффициенты теплопередачи различных материалов и грунта исследованы сравнительно хорошо, то коэффициенты массопереноса – еще недостаточно. Поэтому для практического использования таких систем уравнений при изучении температурного режима грунта утепленного карбамидным поропластом необходимы комплексные экспериментальные исследования.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ УТЕПЛЕННЫХ ГРУНТОВ

В настоящее время до уровня практического применения разработаны методы расчета теплового режима промерзающих влажных грунтов. Они построены при условии наличия влаги в грунте, но без учета миграции влаги. Такой подход является оправданным, так как процесс промерзания грунта зависит прежде всего от изменений всего температурного поля рассматриваемой области [23, 43].

Их применение позволяет получать достаточно достоверные результаты. При этом в качестве исходных данных принимают эффективный коэффициент теплопроводности, который учитывает не только теплоперенос, но и наличие влаги в грунте.

Исследования, выполненные с использованием такого метода, позволили выявить закономерности теплового режима утепленного грунта.

Увеличение общего термического сопротивления приводит к изменению распределения температуры грунта по глубине, резко отличающемуся от ее распределения в условиях естественного промерзания.

Для наглядного представления распределения температуры грунта в начале его промерзания при разных значениях общего термического сопротивления (рис. 14) приняты такие значения этого сопротивления, которые сильно отличаются друг от друга: 0,86 и 16 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/ Вт. Термическое сопротивление, равное 0,86  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ / Вт, приблизительно соответствует естественному состоянию грунта, когда он покрыт снежным покровом высотой 200 мм.

При большем общем термическом сопротивлении температура грунта оказывается ниже, чем при меньшем термическом сопротивлении.

Например, на глубине 200 мм температура грунта в естественных условиях была равна 0,7°С, при общем термическом сопротивлении, равном 5,16  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$  / Вт – 0,1°С; на глубине 0,6 м – соответственно 3,9 и 1,3°С; на глубине 1,0–6,0 м и – 2,5°С и т. д. Такое распределение температуры грунта достигается при различных значениях градусо-часов: с нарастанием общего термического сопротивления увеличивается количество градусо-часов. Более высокая температура



грунта при малом общем термическом сопротивлении обусловлена тем, что поток тепла из нижних горизонтов в верхние движется медленно и не успевает компенсировать за сравнительно малый промежуток времени потери тепла, происходящие через низкое термическое сопротивление грунта. В результате этого температура в нижних горизонтах грунта значительно выше, чем в верхних, где происходит интенсивное охлаждение. С увеличением общего термического сопротивления поток тепла из нижних горизонтов в некоторой степени компенсирует тепло, отводимое от грунта в воздух через теплоизоляцию, так как этот процесс протекает дольше. Такой процесс приводит к дополнительному изменению продолжительности предохранения грунта от промерзания.

После промерзания грунта на определенную глубину распределение температуры в талой зоне его имеет характер, аналогичный описанному выше. При промерзании грунта на глубину 0,50 м (рис. 15) разница температур грунтов, утепленных снегом и теплоизоляцией с общими термическими сопротивлениями 0,86 и 5,16 м<sup>2</sup> · °С / Вт, достигала 2,7°С. Такое распределение температуры грунта в первом случае наблюдалось при 22,8 тыс. градусо-часов, а во втором – при 146,4 тыс. градусо-часов.

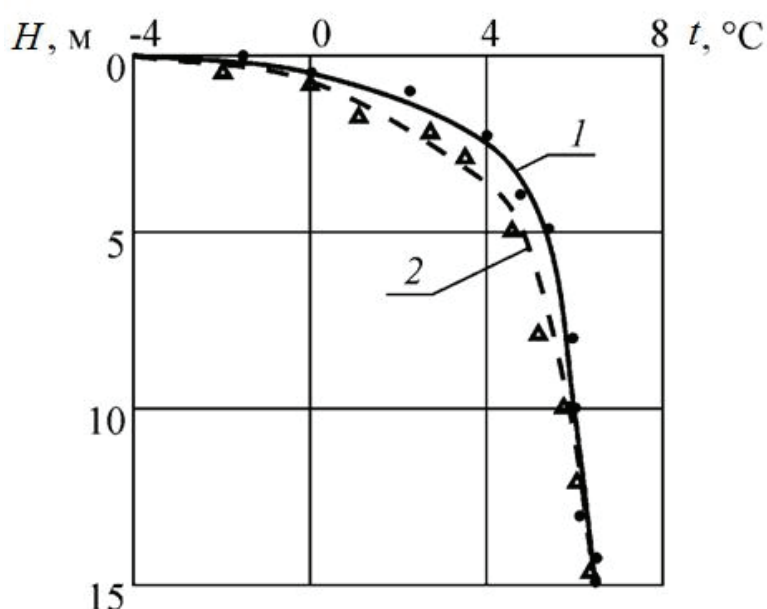


Рис. 14. Изменения температуры глины после первых 10 дней промерзания:  
1 – утепленной карбамидным поропластом; 2 – в условиях естественного промерзания

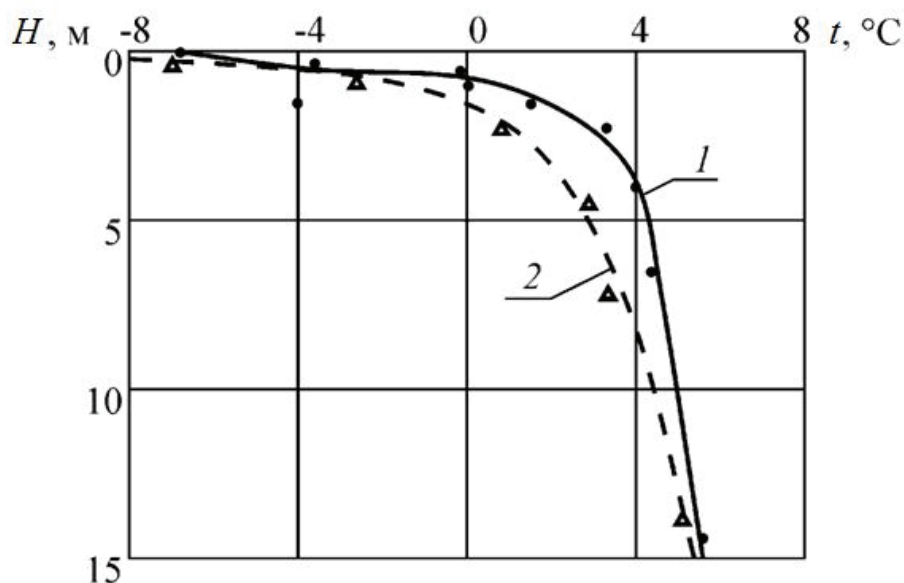


Рис. 15. Изменение температуры супеси при промерзании на глубину 0,5 м:  
1 – утепленной карбамидным порошлатом; 2 – в условиях естественного промерзания

В промерзшем слое грунта наблюдается обратный процесс. Если в естественных условиях температура поверхности грунта равна  $-5,0^{\circ}\text{C}$ , то при общем термическом сопротивлении, равном  $5,16 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$ , только  $-2,5^{\circ}\text{C}$ . Вследствие этого прочность смерзания грунта в первом случае значительно больше, чем во втором, что потребует больших затрат на рыхление или оттаивание. Здесь с увеличением общего термического сопротивления поток тепла, поступающий из нижних горизонтов, идет более на поддержание сравнительно высокой температуры промерзшего слоя грунта, чем на потери через теплоизоляцию. При промерзании грунта на глубину 0,50 м температура грунта в естественных условиях изменяется на глубину до 6,00 м, а при общем термическом сопротивлении, равном  $5,16 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$ , изменения ее доходят до глубины 11,00 м (рис. 15). Это свидетельствует о том, что с увеличением общего термического сопротивления содержащееся в толще грунта тепло полнее используется для предохранения его от промерзания.

Исследование процесса промерзания утепленного грунта позволило выявить, что с увеличением общего термического сопротивления, помимо прямого возрастания количества градусо-часов, требуемого для промерзания любого типа грунта, происходит также увеличение их количества, необходимого для приращения глубины

промерзания на определенную величину. Об этом свидетельствует уменьшение угла наклона кривой промерзания грунта при увеличении общего термического сопротивления (рис. 16) и линейаризация зависимости при малых значениях термического сопротивления поропласта.

Например, при общем термическом сопротивлении, равном  $0,86 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$ , для приращения глубины промерзания грунта от 0,10 до 0,20 м потребовалось 6 тыс. градусо-часов, а при общем термическом сопротивлении, равном  $1,72 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$ , – 10 тыс. градусо-часов.

Серия кривых глубины промерзания утепленного грунта, построенная в зависимости от количества градусо-часов (рис. 17–19) при различных значениях общего термического сопротивления и оформленная в виде графиков, позволяет облегчить задачу определения эффективного сопротивления, требуемого для предохранения грунта от промерзания. Для определения требуемого общего термического сопротивления по таким графикам исходными данными служат климатические условия района (температура воздуха), продолжительность предохранения от промерзания и допустимая глубина промерзания грунта.

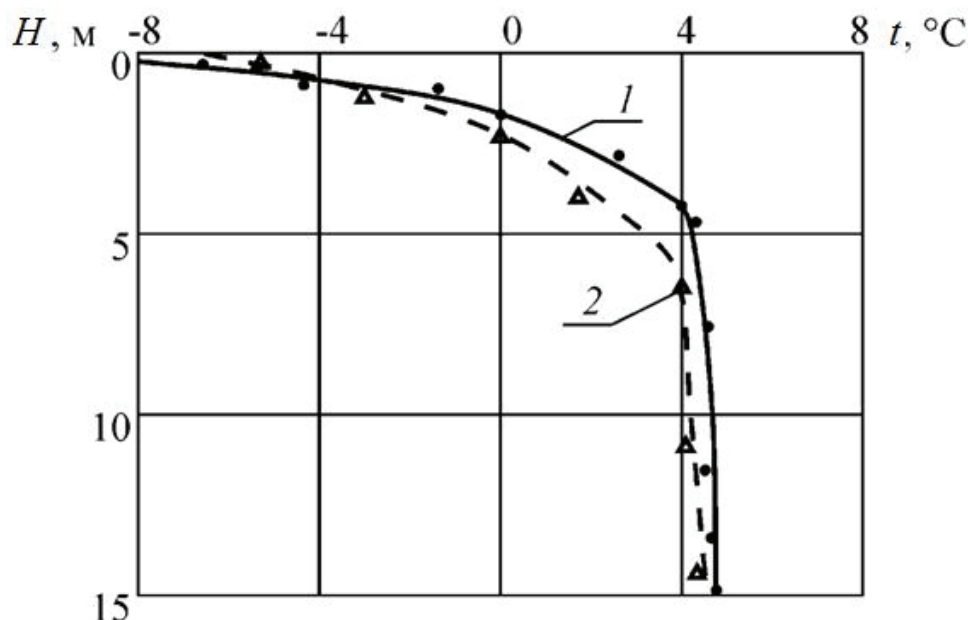


Рис. 16. Изменение температуры суглинка с 30 % гравелистых включений при промерзании на глубину 0,5 м: 1 – утепленного карбамидным поропластом; 2 – в условиях естественного промерзания

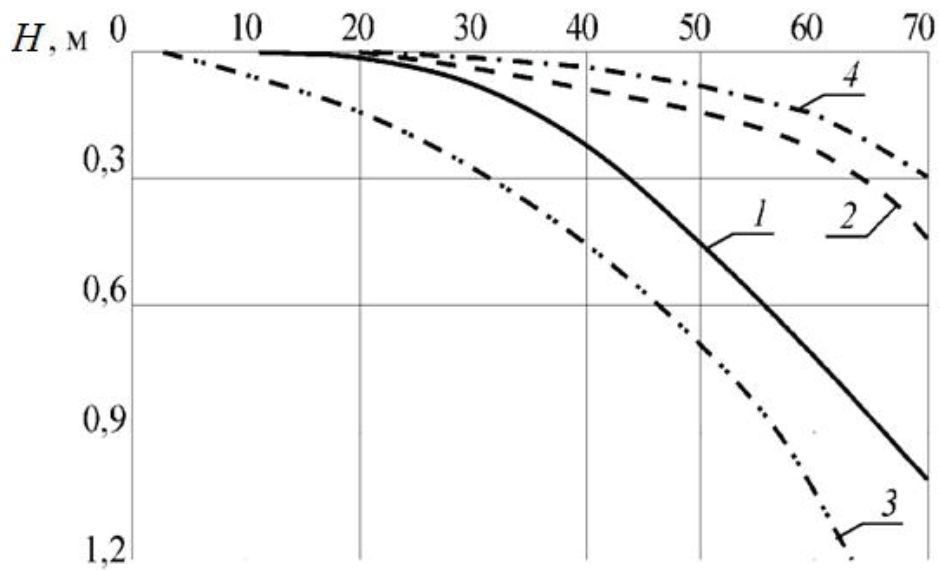


Рис. 17. Изменение глубины промерзания суглинка при различных коэффициентах термического сопротивления: 1 –  $R_0 = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{ккал.}$ ; 2 –  $R_0 = 1,9 (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{ккал.}$ ; 3 –  $R_0 = 2,7 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{ккал.}$ ; 4 –  $R_0 = 3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{ккал.}$

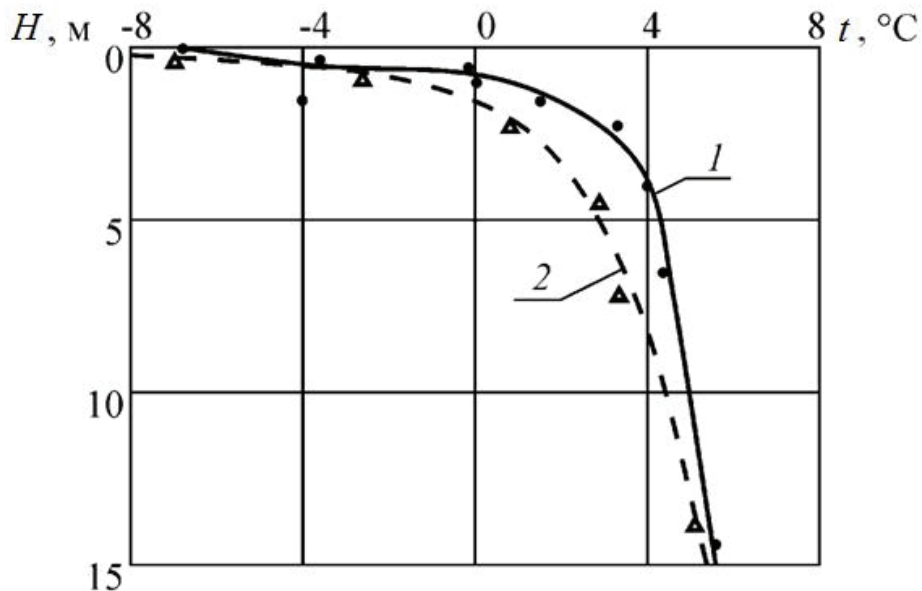


Рис. 18. Изменение температуры супеси при промерзании на глубину 0,5 м: 1 – утепленной карбамидным поропластом; 2 – в условиях естественного промерзания

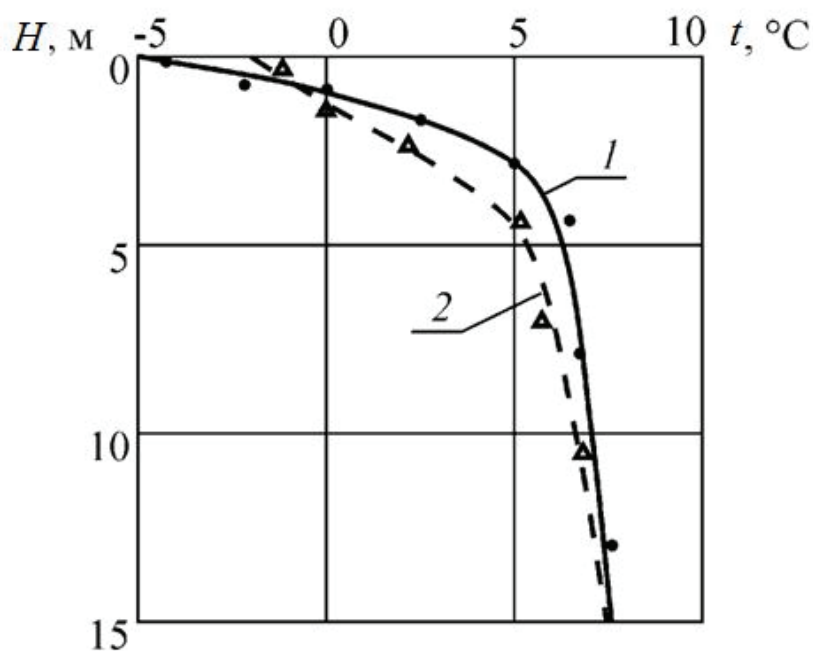


Рис. 19. Изменение температуры суглинка влажностью 20 % при промерзании на глубину 0,5 м: 1 – утепленного карбамидным поропластом; 2 – в условиях естественного промерзания

Когда известны общее термическое сопротивление карбамидного поропласта и термическое сопротивление снега, то можно определить по уравнению (21) требуемое термическое сопротивление комбинированного утеплителя. Если же последнее найдено, то по уравнению (5) можно рассчитать толщину слоя теплоизоляции.

Выявленное влияние температуры грунта в момент нанесения утеплителя (т. е. начальных условий) на продолжительность предохранения грунта от промерзания позволяет существенно уточнить инженерную методику расчета толщины карбамидного поропласта, эффективно предохраняющего грунт от сезонного промерзания.

При различных начальных условиях для промерзания грунта за одно и то же время на определенную глубину потребуется разное общее термическое сопротивление. В этом случае темпы промерзания грунтов сильно отличаются друг от друга. Различие требуемого термического сопротивления при разных начальных условиях можно выразить через коэффициент влияния срока нанесения утеплителя. Он показывает, насколько изменяется требуемое общее термическое сопротивление при нанесении утеплителя в различные сроки по отно-

шению к требуемому термическому сопротивлению, когда наносят утеплитель в начале промерзания грунта:

$$K_{\tau} = \frac{R_t}{R_0}, \quad (32)$$

где  $K_{\tau}$  – коэффициент влияния срока нанесения утеплителя;  $R_t$  – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания при нанесении утеплителя в различные сроки,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}$ ;  $R_0$  – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания при нанесении утеплителя в начале промерзания грунта,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}$ .

Если высокая температура грунта в момент нанесения утеплителя содействует более продолжительному предохранению от промерзания, то при одинаковой продолжительности предохранения от промерзания потребуются меньшее общее термическое сопротивление. Отсюда требуемое сопротивление в случае нанесения утеплителя до начала промерзания грунта будет меньше, чем когда наносят утеплитель в начале промерзания грунта, а коэффициент  $K_{\tau}$  – меньше единицы. Если карбамидный поропласт наносится после начала промерзания, то  $K_{\tau}$  будет больше единицы. Его величина будет тем больше, чем больше период времени после начала промерзания грунта.

Плотность и влажность грунта влияют не только на продолжительность периода предохранения грунта от промерзания, но на общее термическое сопротивление карбамидного поропласта и снежного покрова.

Коэффициент влияния плотности грунта:

$$K_{\gamma} = \frac{R_{\gamma}}{R_{1500}}, \quad (33)$$

где  $K_{\gamma}$  – коэффициент влияния плотности грунта;  $R_{\gamma}$  – общее термическое сопротивление, требующиеся для предохранения грунта некоторой плотности от промерзания,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}$ ;  $R_{1500}$  – термическое сопротивление грунта с плотностью  $1500 \text{ кг/м}^3$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}$ ;

На термическое сопротивление существенно влияет влажность грунта, степень влияние этого параметра оценивается уравнением:

для глины и суглинка:

$$K_W = \frac{R_W}{R_{20}}; \quad (34)$$

Песка и супесчаных грунтов:

$$K_W = \frac{R_W}{R_{12}}, \quad (35)$$

где  $K_W$  – коэффициент, учитывающий влияние влажности грунта;  $R_W$  – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения от промерзания грунта с различной влажностью, ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ ) /Вт;  $R_{20}$  – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения от промерзания для глины и суглинка с влажностью не более 20 %, ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ ) /Вт;  $R_{12}$  – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения от промерзания песчаного грунта и супесчаного с влажностью не более 12 %, ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ ) /Вт.

Если с повышением влажности грунта продолжительность предохранения грунта от промерзания увеличивается, то при тех же условиях будет требоваться меньшее общее термическое сопротивление. Соответственно, с повышением влажности грунта будет уменьшаться коэффициент влияния влажности. Аналогично этому с увеличением плотности грунта будет уменьшаться также коэффициент влияния плотности.

Плотность и влажность грунта влияют не только на продолжительность предохранения от промерзания, но и на общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта.

Анализ протекающих в утепленном грунте процессов позволяет сделать следующие выводы:

1. Сопротивление резания утепленных от промерзания грунтов зависит от влажности и не зависит от их гранулометрического состава. При предохранении грунта от промерзания покрытием его карбамидным порошковым слоем снижается поток тепла от грунта в зону отрицательных температур (зона снег – воздух), что приводит к увеличению периода нахождения грунта в условно талом состоянии.

2. Влияние температуры воздуха на температуру поверхности грунта под утеплителем существенно уменьшается за счет увеличения потока тепла от нижних слоев подводящего от грунта при понижении его температуры, глубина промерзания грунта обратно пропорционально зависит от времени нахождения под слоем пеноутеплителя.

3. При одинаковых гранулометрических составах грунта и близких климатических условиях своевременное (до выпадения снега) нанесение карбамидного порошката создает эффект совместного барьера проникновения отрицательных температур в грунт.

При этом физическая модель барьерного слоя представляет собой комбинацию «грунт – утеплитель», а условиях предотвращения попадания дождевых осадков на утеплитель превращается в комбинацию «грунт – утеплитель-снег». В этих случаях неизменным сдерживающим фактором проникновения фронта отрицательных температур в грунт является величина термического сопротивления утеплителя.

4. Термическое сопротивление барьерного слоя, способное предотвратить грунт от промерзания (или допустить его промерзание на расчетную глубину) зависит от жесткости погодных условий, продолжительности промерзания, композиционного состава карбамидного порошката и толщины снежного покрова. При известных общем термическом сопротивлении барьерного слоя можно определить требуемое термическое сопротивление утеплителя (толщину слоя), а затем и толщину.

5. Общее термическое сопротивление барьерного слоя при понижении влажности и повышении пористости грунта существенно повышается, что в дальнейшем приводит к увеличению количества тепла в пограничном слое утеплитель-грунт, выделяемого при промерзании грунта.

Приведенные удельные затраты на разработку подготовленных (утепленных) однородных грунтов траншейными экскаваторами снижаются на 10–15 %, а удельные затраты на разработку подготовленных грунтов с гравийно-каменистыми включениями, в первую очередь зависящие от грануло-метрического состава и процентного содержания фракций в разрабатываемых грунтах, в отдельных случаях могут снижаться и на 20 %.

Графики функции температуры утепленного грунта по глубине его залегания для зимних месяцев года (рис. 20) позволяют оценить коэффициент их прочности, повысить эффективность разработки сезонно-мерзлых грунтов.

Разница температур грунта в естественных условиях залегания и в условиях утепления увеличивается по глубине залегания грунта и на глубине 0,83 м достигает наибольшего значения минус 2,1°C, а на глубине 1,2 м температура утепленного грунта стабилизируется на величине + 1,64 °C.



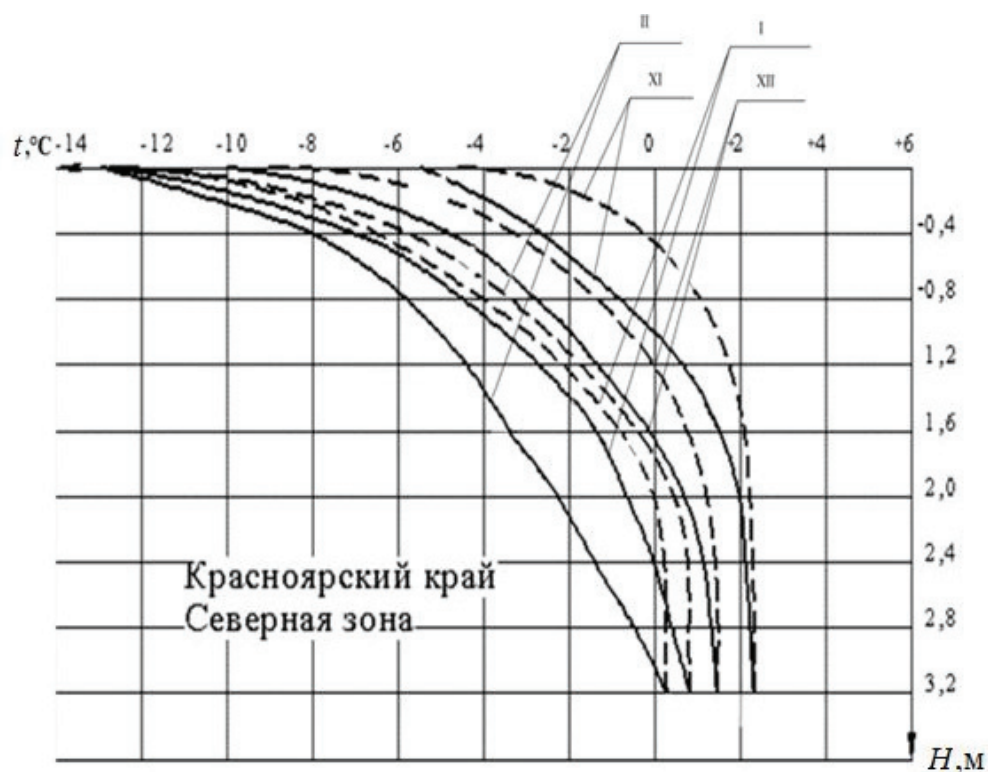


Рис. 20. Распределение температуры суглинка по глубине залегания для зимних месяцев года: XI – ноябрь; XII – декабрь; I – январь; II – февраль; — — в условиях естественного залегания грунта; - - - - в условиях утепления грунта карбамидным порошком;

Математический анализ экспериментальных данных проведен с применением программы Advanced Grapher, с помощью которой по табличным экспериментальным данным произведена математическая обработка натурного эксперимента.

Для каждой функции распределения температур утепленного суглинка, характерных для зимних месяцев северной зоны Красноярского края, надежно описаны полиномом второй степени (табл. 16).

Таблица 16

#### Распределения температур по глубине утепленного суглинка

Расчетный месяц	Распределение отрицательных температур ( $t$ ) по глубине залегания ( $H$ ) утепленного суглинка	Коэффициент корреляции
Ноябрь	$t = -0,1013729H^2 - 0,5575497H - 0,4741855$	0,98
Декабрь	$t = -0,0360997H^2 - 0,5072688H - 1,6369544$	0,94
Январь	$t = -0,0239553H^2 - 0,4517715H - 2,1028933$	0,98
Февраль	$t = -0,0250972H^2 - 0,4950154H - 2,4443109$	0,96

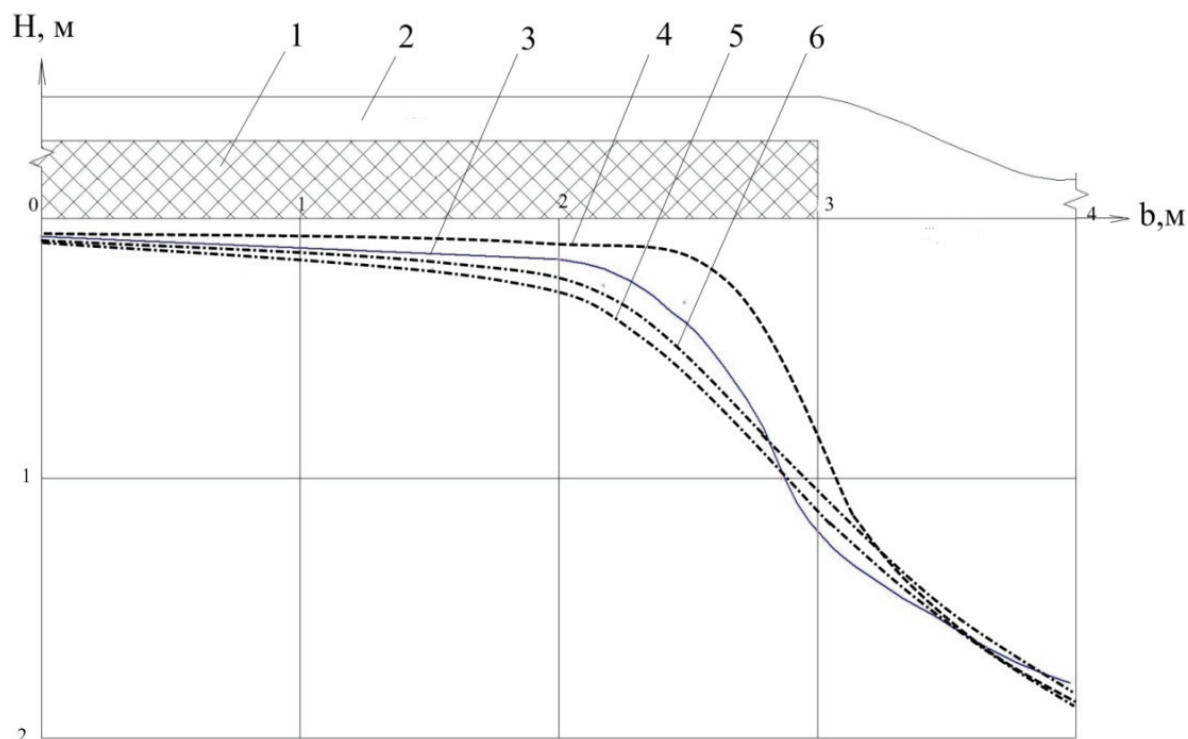


Рис. 21. Изменение глубины сезонного промерзания грунта под теплоизоляционным слоем карбамидного пенопласта с учетом бокового эффекта: 1 – поропласт; 2 – снежный покров; 3 – суглинка; 4 – глины; 5 – песка; 6 – супеси

Натурные исследования процесса сезонного промерзания грунтов выявили одинаковый характер зависимости глубины промерзания и температуры всего разнообразия грунтов под слоем карбамидного пенопласта исследуемого региона, независимо от их гранулометрического состава с учетом краевого эффекта (рис. 21), что позволяет определить дополнительную ширину утепляемого участка.

Отличительной характеристикой изменения температуры утепленных грунтов под слоем карбамидного пенопласта является глубина залегания разрабатываемого слоя (рис. 22).

По экспертным оценкам ежегодный объем земляных работ в строительстве на период с 2000 по 2015 гг. составит 26 млрд м<sup>3</sup>. Обычно в зимнее время разрабатывается около 1/8 объема грунта. В 2010 г. это составило

$$26 \cdot \frac{1}{8} = 3,25 \text{ млрд м}^3.$$

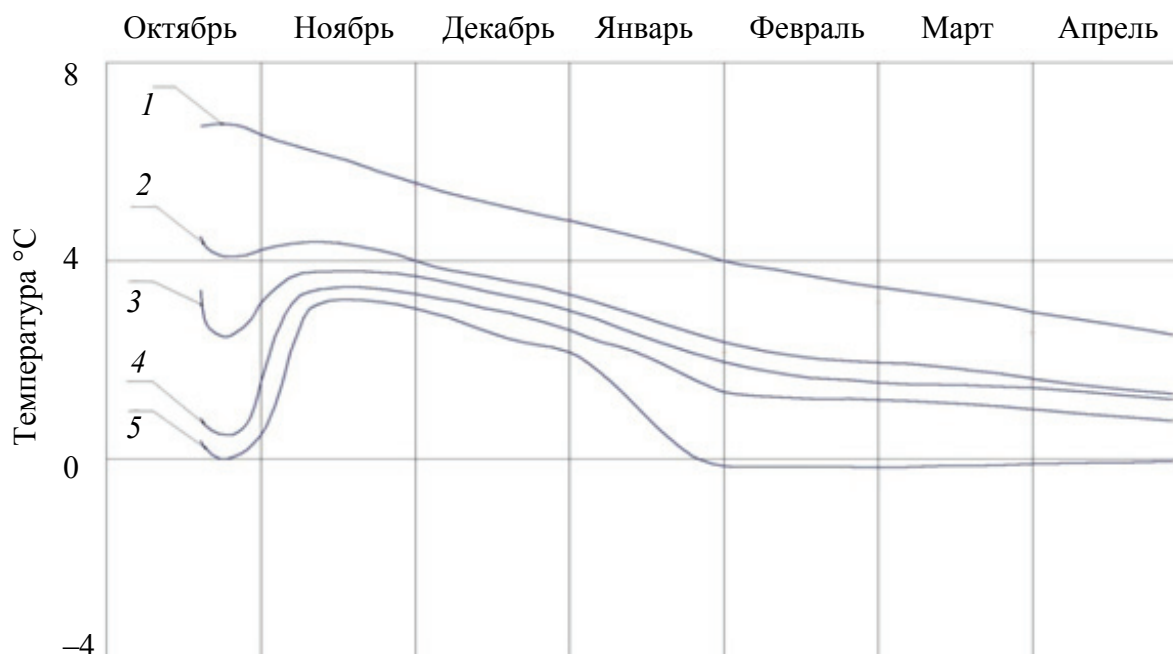


Рис. 22. Изменение температуры грунта в зависимости от времени промерзания в середине утепленной полосы на различных глубинах: 1 – 2 м; 2 – 1 м; 3 – 0,5 м; 4 – 0,2 м; 5 – под теплоизоляцией

По данным ЦНИИОМТ, предохранение грунта от промерзания можно применять для подготовки около 2 % объема грунтов, разрабатываемых в зимнее время. В 2010 г. это составило:

$$3,25 \cdot 0,02 = 65 \text{ млн м}^3.$$

Средняя высота забоя равна 2 м. Тогда площадь, необходимая для утепления на строительстве, составит:

$$65/2 = 33,5 \text{ млн м}^3 = 3,25 \text{ тыс. га.}$$

Оптимальные сроки работ, предшествующие и последующие операции, дополнительные условия определены практикой эксплуатации установок и результатами научно-исследовательской работы по разработке технологии предохранения грунта от промерзания быстротвердеющей пеной.

Таким образом, нанесение карбамидного пенопласта расчетной толщиной в осенний подготовительный период месяце на участок, расположенный в Восточно-Сибирском регионе и планируемый к разработке землеройными машинами в зимний период года, надеж-

но предохраняет от сезонного промерзания на глубину, не более допустимой технологической глубины промерзания

Пороговым значением температуры окружающего воздуха, изменяющим коэффициент теплопроводности снежного покрова является температура  $-10^{\circ}\text{C}$ , а зависимость коэффициента теплопроводности снежного покрова от плотности надежно описывается уравнениями 2-го порядка.

Величина проникновения фронта отрицательных температур под утепляемый слой несущественно зависит от гранулометрического состава грунта, основным параметром, влияющим на глубину промерзания, является влажность грунта.

Температура грунта, как правило, изменяется по гармоническому закону:

$$T(0, t) = A \cdot \cos \omega \cdot t,$$

где  $\omega = 2\pi/P_y$ ,  $P_y = 1 \text{ год} = 3,156 \cdot 10^7$ ,  $A$  – амплитуда колебаний температуры (например  $5^{\circ}\text{C}$  или  $10^{\circ}\text{C}$ ).

Закон изменения температуры по глубине является типичной задачей на решение уравнения теплопроводности (уравнение параболического типа) без начальных условий. Она формулируется таким образом: найти ограниченное решение уравнения теплопроводности

$$P \cdot C \frac{dT}{dl} K \frac{d^2T}{dh^2}, h \in (0, \infty), t \in (-\infty, \infty) \quad (36)$$

$$\rho \cdot C \frac{dT}{dt} K \frac{d^2T}{dz^2}, z \in (0, \infty), t \in (-\infty, \infty)$$

с граничным условием  $T(0, t) = A \cos \omega \cdot t$ .

Здесь  $\rho$  – плотность пород,  $C$  – их удельная теплоемкость;  $K$  – коэффициент теплопроводности, (Вт/(мК)).

Решение этой задачи [67] имеет вид

$$T(z, t) = A \cdot \exp \left[ -\sqrt{\frac{\omega \cdot \rho \cdot C}{2k}} z \right] \cos \left[ \omega \left( \frac{z}{\sqrt{\frac{2 \cdot \omega \cdot k}{\rho \cdot C}}} \right) \right].$$

Амплитуда колебаний температуры с глубиной убывает пропорционально  $\exp(-h/h_0)$ , где  $h_0$  – эффективная глубина промерзания, м,

$$z_0 = \sqrt{\frac{2k}{\omega \cdot \rho \cdot C}}.$$

По справочнику «Физические свойства горных пород» (М. : Недра, 1976) для оценок примем следующие значения физических параметров:  $\rho_{\text{почв}} = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $C_{\text{глин}} = 1200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;  $k_{\text{глин}} = 1,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

Тогда

$$z_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,2 \cdot 3,156 \cdot 10^7}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 10^3}} = 2,3.$$

На глубине  $h$  колебания температуры отстают по фазе от колебаний на поверхности на время

$$t_0 = \frac{z}{\sqrt{\frac{2\omega \cdot k}{\rho \cdot C}}}.$$

Если принять  $h = 3 \text{ м}$ , то получим  $t_0 = 6,7 \cdot 10^6 \text{ с} = 77 \text{ сут}$  (2,5 мес.).

Полученные значения позволяют прогнозировать изменение температуры грунта на любой глубине на основе данных изменения температуры окружающего воздуха.

## 5. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАРБАМИДНЫХ ПОРОПЛАСТОВ

Поропласт представляет собой термореактивный пористый материал белого цвета с открытой ячеистой структурой, изготовленный смешиванием распыленной карбамидо-формальдегидной смолы с полученной воздушно-механическим путем пенной массой, состоящей из водного раствора поверхностно-активного вещества и кислотного отвердителя.

По физико-механическим характеристикам материалы должны соответствовать требованиям ТУ–67–09–01–91 Пена карбамидная заливочная или ТУ 2254–001–02067876–2009 Поропласты композиционные, указанным в табл. 17 (ОСТ 6–05–462–86). Отпускная влажность поропласта не должна превышать 12 %. Размеры изделий из пены (плиты и т. д.) согласовываются с потребителем. Линейные размеры поропласта изоляционного по ТУ 2254–001–02067876–2009 не должны превышать по длине 1000 мм, по ширине 500 мм, по толщине 250 мм.

Анализ физико-механических и эксплуатационных характеристик позволяет произвести выбор оптимального состава карбамидных поропластов.

Таблица 17

**Характеристики карбамидного поропласта**

Показатель	Тип поропласта		
	30	80	120
Плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	30±10	80±15	120±20
Прочность на сжатие при 10 % линейной деформации, МПа, не менее	0,03	0,1	0,15
Коэффициент теплопроводности воздушно-сухом состоянии, Вт/(м · К), не более	0,03	0,035	0,04
Морозостойкость, циклы, не менее	30	50	50
Водопоглощение за 24 ч, % по объему, не более	30	18	18

Таблица 18

**Показатели композиционных поропластов**

Параметр	Значение
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	8–75
Влажность, %, не более	10–18
Прочность на сжатие при 10 % линейной деформации, МПа, не менее	0,05–0,15
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	0,05–0,30
Теплопроводность в сухом состоянии при 25±5°С, Вт/(м · К) не более	0,035–0,041
Сорбирующая способность, г неф./г сорб.	41–67
Плавучесть, %	100
Водопоглощение за 24 ч, % по объему, не более	5–8
Содержание формальдегида, г/дм <sup>3</sup> , не более	0,01
Миграция в воздушную среду загрязняющих веществ при 40°С:	
формальдегида, мг/м <sup>3</sup> , не более;	0,01
аммиака, мг/м <sup>3</sup> , не более;	0,04
Интенсивность запаха, балл, не более	2
Сорбционное увлажнение (% по массе), не более	20
РН водной вытяжки, не ниже	5,5

Таблица 19

**Физико-механические характеристики карбамидной пены-утеплителя**

Показатель	Значение
Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	10–50
Прочность при 10 % сжатии, МПа	0,196–0,0588
Водопоглощение за 24 ч, кг/м <sup>2</sup>	1,1
Пористость, %	95–98
Рабочая температура, К	От –193 до +373
Кратность изготовления	13–28
Технологическая усадка, %	10–15
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	0,03–0,064
Коэффициент температуропроводности, 10 <sup>-3</sup> м <sup>2</sup> /ч	4
Удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)	0,34

## 6. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КАРБАМИДНЫХ ПОРОПЛАСТОВ

Свойства товарных поропластов существенно влияют на качество процесса предохранения грунтов от сезонного промерзания. Контроль характеристик поропластов производится как на стадии фасовки готовой продукции, так и на стадии применения. Опыт использования поропластов показывает, что гарантийный срок хранения поропластов невозможно регламентировать, так как срок зависит от условий хранения и условий применения. В условиях защиты поропласта от солнечной энергии, ветровой эрозии, механического воздействия и соблюдения регламента утепления грунтов поропласт может использоваться в течение трех лет. В условиях правильного хранения поропласт сохраняет свои эксплуатационные свойства в течение семи лет, по истечению которых поропласт не может удовлетворительно использоваться для утепления грунтов. В условиях создания запаса поропласта на стадии производства используются модифицирующие добавки, существенно повышающие сроки его хранения.

Исследование свойств поропластов на стадии применения производится в том случае, если поропласт используется вторично.

### *Определение влажности поропластов*

Влажность поропласта определяют весовым методом. Общие требования к образцам определены ГОСТ 17177–87.

Оборудование: весы технические, бюксы стеклянные, сушильный шкаф, эксикатор.

Из куска поропласта вырезают образец (образец должен помещаться на предметное стекло или стеклянный бюкс) небольших размеров.

Образец помещают на предметное стекло или стеклянный бюкс, которые предварительно взвешивают с точностью до 0,01 г и ставят в сушильный шкаф. Образец высушивается до постоянного веса при температуре не выше плюс 30°С. Влажность определяют по формуле

$$W = \frac{q_1 - q_2}{q_2} \cdot 100 \%, \quad (37)$$

где  $W$  – влажность, %;  $q_1$  – вес образца до взвешивания, г;  $q_2$  – вес образца после высушивания, г.



Влажность определяют не менее, чем по 3 образцам, находя среднее значение.

Данные по возможности заносят в рабочий журнал.

*Определение объемного веса*

Объемный вес поропласта определяется отношением веса образца к его собственному объему, включая объем пор:

$$\gamma_0 = \frac{m}{V}, \quad (38)$$

где  $\gamma_0$  – объемный вес поропласта, г/см<sup>3</sup>;  $q$  – вес образца, г;  $V$  – объем образца, см<sup>3</sup>.

Для определения объемного веса поропласта используется оборудование: весы технические, линейка, нож.

Образец кубической формы, размером  $(50\pm 1)\times(50\pm 1)\times(50\pm 1)$  мм вырезают из готового поропласта. Образец взвешивают на аналитических весах с точностью до сотых долей. Затем линейными замерами определяют его объем. За результаты принимают среднеарифметические значения длины, ширины и высоты при не менее 3 замерах. Для образцов цилиндрической формы измеряют диаметры для двух оснований и измеряют высоту цилиндра. Объем цилиндра определяют по формуле

$$V = \frac{\pi d^2 \cdot h}{4}, \quad (39)$$

где  $d$  – значение величины диаметра, см;  $h$  – высота цилиндра, см;  $\pi$  – постоянная (3,14).

За окончательное значение берут среднюю величину, определяемую не менее чем по 3 образцам.

*Определение удельного веса*

Удельный вес поропласта определяют с помощью пикнометра. От предварительно высушенного образца поропласта берут пробу и измельчают в порошок. Измельченную в порошок пробу взвешивают на аналитических весах в количестве 10 г с точностью до 0,1 мг.

Взвешенную навеску высыпают в сухой, чистый и предварительно взвешенный пикнометр. Пикнометр с навеской взвешивают и наполовину заполняют водой. Чтобы удалить пузырьки воздуха пикнометр в несколько наклонно положении ставят на водяную баню на 10–15 мин. Затем пикнометр охлаждают до комнатной температуры, доливают водой до метки и снова взвешивают.

Удельный вес поропласта рассчитывают по формуле

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{q \cdot \gamma_{\text{в}}}{q + q_1 - q_2}, \text{ (г/см}^3\text{)}, \quad (40)$$

где  $q$  – вес навески материала, г;  $q_1$  – вес пикнометра с жидкостью, г,  $q_2$  – вес пикнометра с жидкостью и навеской, г;  $(q + q_1 - q_2)$  – величина, соответствующая объему материала (пробы), см<sup>3</sup>;  $\gamma_{\text{в}}$  – удельный вес воды.

Расчеты производят с точностью до 0,01 г/см<sup>3</sup>.

При обычных условиях удельный вес воды принимают равным единице.

Удельный вес органических материалов (поропластов) находится в пределах  $\gamma_{\text{в}} = 0,9\text{--}1,6$ .

#### *Определение плотности и пористости*

Плотность поропластов характеризуется отношением объемного веса к удельному весу и выражается в долях единицы или в процентах:

$$P = \frac{\gamma_0}{\gamma_y}, \text{ или } P = \frac{\gamma_0}{\gamma_y} \cdot 100 \%. \quad (41)$$

Плотность пористых материалов, как правило, меньше единицы (т. е. менее 100 %). Поэтому пористость их определяется как величина, дополняющая плотность его до 100 % (выражение в %):

$$\Pi = 1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_y} \cdot 100 \%. \quad (42)$$

#### *Определение водопоглощения*

Сущность метода заключается в измерении массы воды, поглощенной образцом сухого материала при определенных условиях испытания в течение заданного времени. Для испытания вырезают образцы в форме куба со стороной  $30 \pm 2$  мм ГОСТ 17177–87.

Предварительно высушенный до постоянного веса образец 3 (рис. 23) взвешивают с точностью до 0,01 г и замеряют его объем. Затем образец помещают в эксикатор 1 на сетчатую подставку 4 и фильтруют его положение сетчатым пригрузом 2.

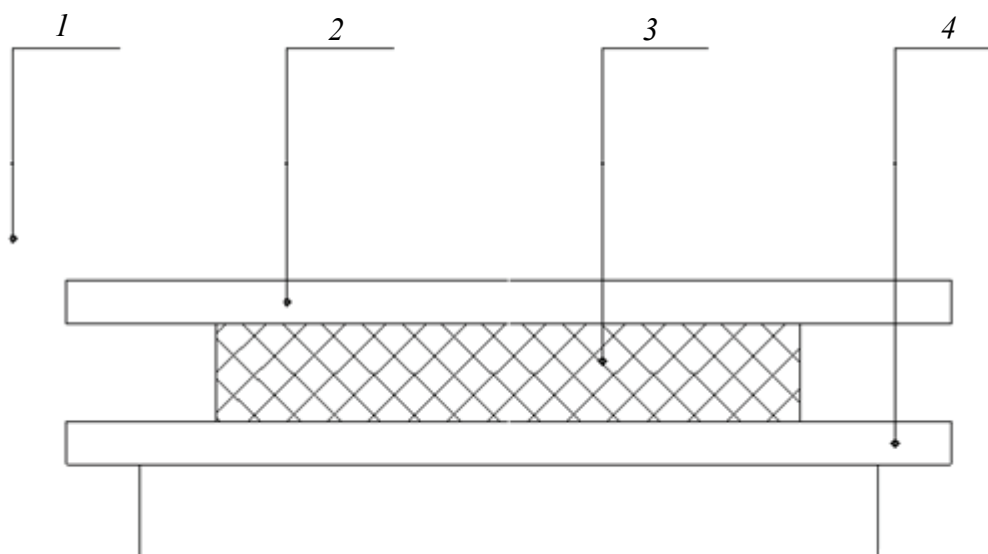


Рис. 23. Эскиз эксикатора

В эксикатор заливают воду температурой  $22 \pm 5^\circ\text{C}$  так, чтобы уровень воды был выше сетчатого пригруза 2 на 20–40 мм.

Образец 3 выдерживают в воде 24 ч. Через 24 ч образец переносят на сухой поддон, протирают фильтровальной бумагой и взвешивают. Массу воды, вытекшей из образца во время взвешивания, в поддон, включают в массу насыщенного водой образца.

Водопоглощение поропластов рассчитывают по формуле

$$W = \frac{m_1 - m_2}{V \cdot \rho_{\text{в}}}, \quad (43)$$

где  $m_1$  – масса образца после насыщения водой, г;  $m_2$  – масса образца предварительно высушенного до постоянной массы, г;  $V$  – объем образца,  $\text{см}^3$ ;  $\rho_{\text{в}}$  – удельный вес воды,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

## 7. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КАРБАМИДНЫХ ПОРОПЛАСТОВ

Для производства пены карбамидной заливочной и композиционных поропластов используют смолу карбамидно-формальдегидную, кислоту ортофосфорную, воду питьевую ГОСТ 2874–82.

Смола карбамидо-формальдегидная КФ-МТ015 по ГОСТ 14231–88, ТУ 6–06–12–88, представляет собой продукт поликонденсации карбамида или раствора карбамида и формальдегида. Внешний вид – однородная суспензия от белого до светло-желтого цвета без механических включений.

Массовая доля сухого остатка  $-65,5 \pm 2,0$ , массовая доля свободного формальдегида не более 0,15 %. Вязкость условная по вискозиметру ВЗ-4, с 50–80 сСт – после изготовления в конце гарантийного срока хранения не более 200 сСт. Концентрация водородных ионов, рН 7,5–8,5. Время желатинизации при  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  не менее 8 ч.

Смолу транспортируют в зимнее время в цистернах, имеющих водяную рубашку или теплоизоляцию, в летнее время – при температуре воздуха выше  $26^\circ\text{C}$  не более 10 сут, хранят смолу при  $5\text{--}20^\circ\text{C}$ , в чистых закрытых емкостях, защищенных от воздействия солнечных лучей и атмосферных осадков, периодически перемешивая.

Гарантийный срок хранения смолы 45 сут со дня изготовления. По истечении указанного гарантийного срока смолу испытывают на соответствие требованиям технических условий.

Пенообразователь ПО-1 (табл. 20) состоит:

- из контакта Петрова (керосиновый контакт с содержанием сульфокислот не менее 55 %), нейтрализованный натром едким техническим по ГОСТ 2263 –  $89,5 \pm 3\%$ ;
- клея костного по ГОСТ 2067 –  $4,5 \pm 1\%$ ;
- спирта этилового синтетического –  $6,0 \pm 2\%$ .

Внешний вид ПО-1 – жидкость коричневого цвета без посторонних включений. По токсичности пенообразователь ПО-1 соответствует третьему классу опасности, вызывает раздражение кожных покровов и слизистых оболочек глаз. Рабочие растворы пенообразователя безвредны. При работе с пенообразователем необходимо применять индивидуальные средства защиты.

**Характеристики пенообразователя ПО-1**

Показатель	Норма
Наличие осадка	Отсутствие
Вязкость кинематическая при 20 °С, м <sup>2</sup> /с (сСт), не более	40,0 · 10 <sup>-6</sup> (40)
Кратность пены водного раствора, не менее	6,0
Устойчивость пены, с, не менее	270
Водородный показатель (рН) концентрата	7,0–9,0
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> , не менее	1,1
Температура застывания, °С, не выше	–8
Минимальная температура пенообразователя при применении, °С, не выше	–2
Время тушения, с, не более	300
Кратность пены, не менее, на генераторе: ГПС-200 (ГПС-600)	60(70)
Показатель смачивающей способности 4 %-го (по объему) водного раствора, не более	9,0

Производственные помещения должны быть оборудованы precisely-вытяжной вентиляцией. Заправка пенообразователя в емкости для хранения и транспортирования должна быть механизирована.

Пенообразователь ПО-1 является биологически жестким продуктом, слив которого запрещен в водоемы и сточные воды. Он относится к легковоспламеняющимся жидкостям.

Пенообразователь ПО-3 (ТУ–6–14–508–80) представляет собой триэтаноламиную соль алькилсульфата, полученную сульфатированием синтетических первичных спиртов фракции С10–С16 хлорсульфоновой кислотой и последующей нейтрализацией сульфэфира техническим триэтаноламином. Внешний вид ПО-6 – легкоподвижная жидкость от коричневого до темно-коричневого цвета. Водородный показатель (рН) 10 %-го водного раствора 6,0–8,0. Содержание активного вещества – не менее 37 %. Содержание сульфатов в пересчете на сернокислый триэтаноламин – не менее 12,0 %. Пенообразующая способность 1 %-го раствора (в расчете на активное вещество), мл, не менее: через 30 с – 350, через 1 мин – 320. Коэффициент устойчивости пены 0,92 (не менее).

Пенообразователь ПО-3 хранят в закрытой таре в закрытых складских помещениях. Перед использованием продукт необходимо нагреть до 30–35°C. Гарантийный срок хранения пенообразователя ПО-3 – один год со дня изготовления продукта.

Кислота ортофосфорная техническая (ГОСТ 10678–76) представляет собой продукт гидратации фосфорного ангидрида, образующегося при сжигании желтого фосфора.

Характеристики пенообразователя (ПО-6) представлены в табл. 21.

Таблица 21

### Характеристики пенообразователя ПО-6

Показатель	Норма
Внешний вид	Однородная жидкость без осадка и расслоения
Плотность при 200°C, кг/м <sup>3</sup>	1000–1200
Кинематическая вязкость при 200°C, мм <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> , не более	200
Водородный показатель (рН) при 200°C, в пределах	6,5–10,0
Температура застывания, 0°C, не выше	минус 5
Кратность пены водных растворов: низкая, не более средняя, не менее высокая, не менее	20 80 200
Показатель смачивающей способности 2 % раствора, не более	9
Гарантийный срок хранения в таре изготовителя, мес., не менее	48

Ортофосфорную кислоту хранят в стальных футерованных закрытых емкостях или стеклянных бутылках. Гарантийный срок хранения технической ортофосфорной кислоты – шесть месяцев со дня изготовления.

Все применяемые материалы должны иметь технические паспорта завода-изготовителя и удовлетворять по качеству требованиям соответствующих ГОСТов и ТУ.

Исходными материалами для получения быстротвердеющей пены служат мочевино-формальдегидная смола «Крепитель М» (МРТУ 6–05–1101–67), пенообразователь ПО-1 (ГОСТ 6948–54), соляная кислота (ГОСТ 1382–42) и вода.

Соотношение этих компонентов (по объему) для получения ПКЗ:

смола «Крепитель М»	35 %
пенообразователь ПО-1	4 %
вода	45 %
соляная кислота 5–6 % -й концентрации	16 %.

Смола, пенообразователь и кислота широко производятся отечественной промышленностью, поэтому они дефицита не представляют.

Соляная кислота служит отвердителем для поликонденсации вспененной смолы. Для изготовления ПКЗ пригодна любая вода, не содержащая соду или щелочь, так как при их наличии происходит нейтрализация кислоты и пена не твердеет.

Быстротвердеющая пена ПКЗ является мелкопористым материалом белого цвета. Объемная масса воздушно-сухого образца ПКЗ колеблется в пределах 10–15 кг/м<sup>3</sup>.

Влажность быстротвердеющей пены сразу после изготовления колеблется в пределах 400–500 % (весовая), а после высыхания в естественных условиях снижается до 90–100 %.

Быстротвердеющая пена является поропластом, так как в ней преобладают открытые поры. Как все открытопористые материалы, ПКЗ гидрофильна. Увлажнение ее происходит от жидких осадков, выпадающих в период между ее нанесением и наступлением устойчивых морозов. Зависимость влажности ПКЗ от количества осадков, выпадающих в период между ее нанесением и временем устойчивого перехода температуры воздуха через 0°С, полученная по данным наблюдений в различных климатических районах, приведена на рис. 24. Для практического расчета основных параметров утепления грунта (толщины утепления и рационального срока его нанесения) можно принять, что в течение зимнего периода влажность ПКЗ остается постоянной.

После нанесения ПКЗ на грунт наблюдается технологическая усадка ее. При нанесении ее в рациональные сроки усадка происходит в период 7–10 дней и колеблется в пределах 5–15 % от первоначальной толщины. При расчете основных параметров утепления грунта можно принять усадку, равную 10 %.

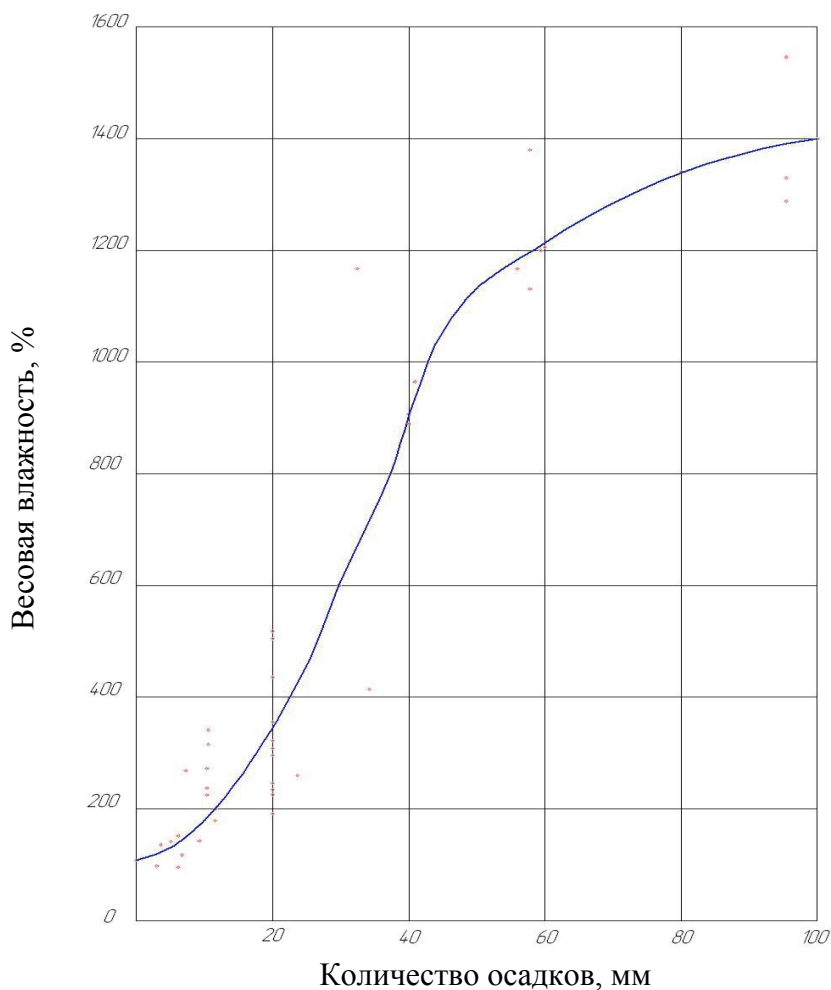


Рис. 24. Зависимость влажности ПКЗ от количества осадков

Прочность ПКЗ небольшая, в связи с чем возможно разрушение теплоизоляционного слоя из ПКЗ ветром со скоростью более 25 м/с.

Удельная теплоемкость ПКЗ составляет 0,34 ккал/(кг · град) [40]. Коэффициент теплопроводности ПКЗ зависит от температуры, объемной массы и влажности (рис. 25). Для практических расчетов следует учитывать только зависимость коэффициента теплопроводности ПКЗ от влажности, так как влияние изменения объемной массы и температуры на коэффициент теплопроводности ПКЗ незначительно по сравнению с влажностью.

Физические свойства ПКЗ в течение зимнего периода изменяются весьма незначительно, поэтому для практических расчетов теплоизоляционные свойства ее можно принять постоянными.

В процессе изготовления карбамидных пенопластов и во время их отверждения происходит выделение свободного формальдегида [36],



обладающего токсичными свойствами в больших концентрациях. Ввиду того, что карбамидные пенопласты находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе для предохранения грунта от промерзания, в качестве теплозвукоизоляции для строительных конструкций, в сельском хозяйстве для теплоизоляции животноводческих помещений, для структурирования почв, возрастает проблема исследования влияния карбамидных пенопластов на окружающую среду. В литературе по этому вопросу имеются довольно немногочисленные и разобщенные данные.

Х. Бауманом [46] установлено, что следы формальдегида в растительном субстрате не приносят ущерба росту растений. Считалось, что формальдегидный остаток, содержащийся в карбамидном пенопласте, имеет бактерицидное свойство и может тормозить рост растений, но в опытах Х. Баумана это не подтвердилось.

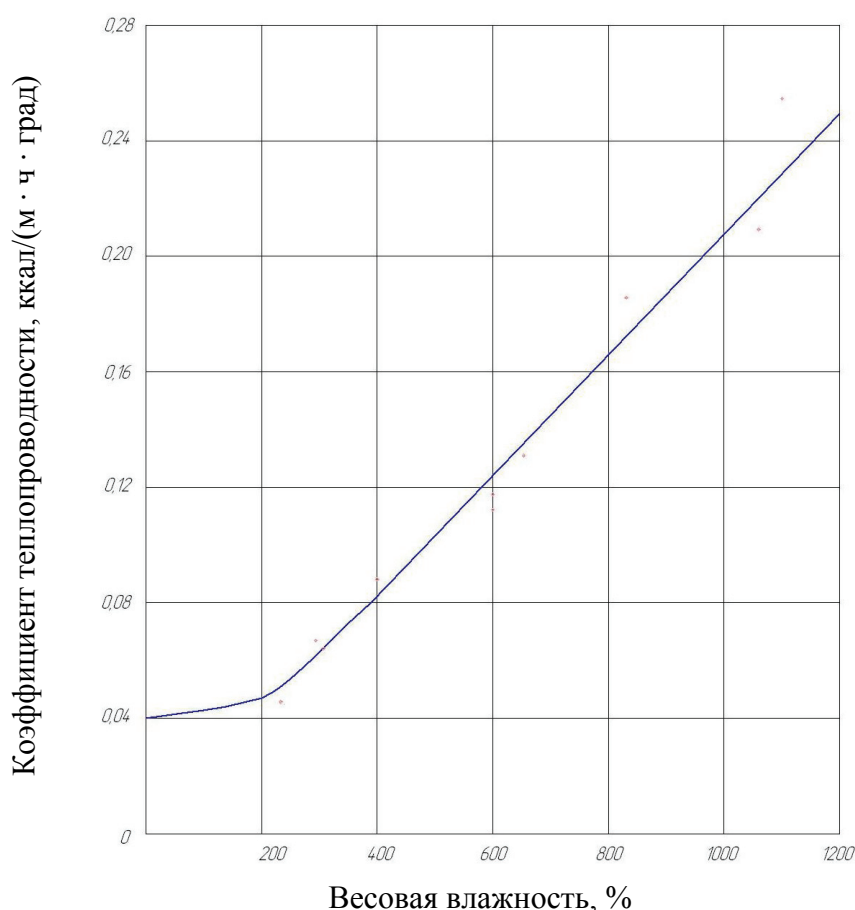


Рис. 25. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности ПКЗ от влажности

Исследованиями установлено, что при утеплении грунта в условиях Сибири карбамидным пенопластом выпадающие осенью осадки не будут смывать формальдегид из теплоизоляционного слоя, так как водоудерживающая способность его превышает количество выпадающих осадков. Свободный формальдегид из теплоизоляционного слоя переходит в верхний слой утепленного грунта. Содержащийся в грунте формальдегид может попасть в водоем следующим летом при вымывании его атмосферными осадками, фильтрующимися через грунт земляных сооружений или отвала утепленного грунта. Расчеты показывают, что концентрация формальдегида, поступающего в водоем фильтрующимися атмосферными осадками и грунтовыми водами, будет ниже предельно допустимой концентрации.

Результаты проведенного эксперимента показывают, что влияние состава компонентов композиции на различные свойства поропласта неодинаково. На кратность вспенивания существенное влияние оказывает количество поверхностно-активного вещества (ПАВ) (рис. 26), в частности с увеличением его более чем на 50,0 мас.ч кратность вспенивания растет.

С увеличением количества синтезированной поливиниловым спиртом полимерной смолы (СПС) кратность вспенивания снижается (рис. 27). При добавлении количества от 5 до 5,5 мас.ч. кратность вспенивания немного увеличивается, а от 5,5 до 9 мас.ч. – уменьшается до 3,8 %.

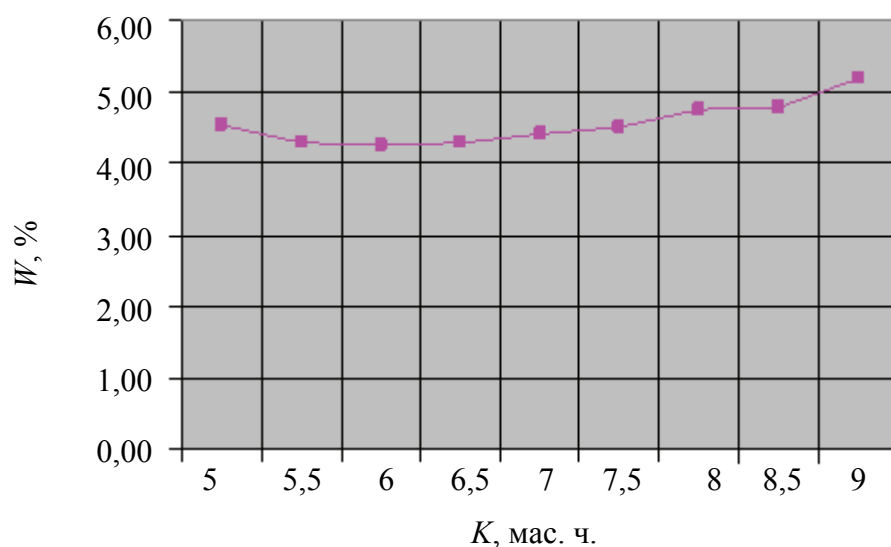


Рис. 26. Влияние поверхностно-активных веществ на кратность вспенивания поропласта

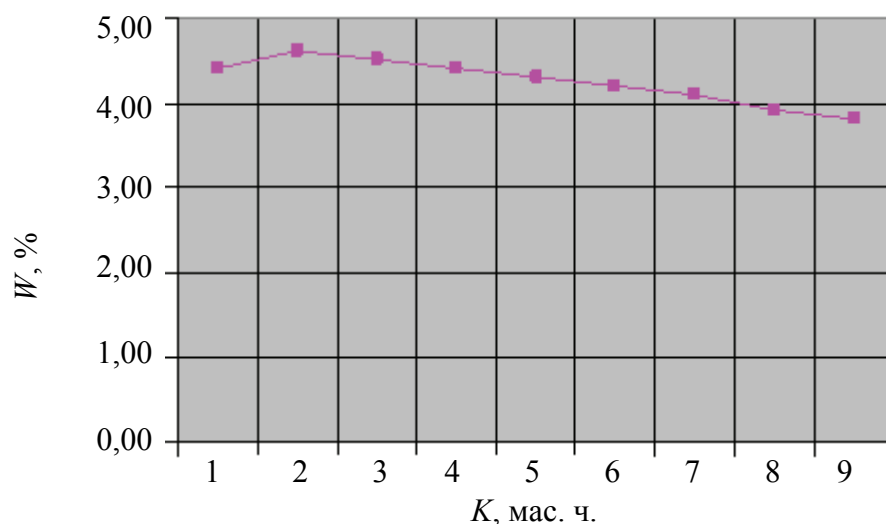


Рис. 27. Влияние синтезированной полимерной смолы на кратность вспенивания поропласта

Таким образом, исследованиями установлены рациональные параметры поверхностно-активных веществ и синтезированной полимерной смолы для получения карбамидо-формальдегидного поропласта наибольшей кратности вспенивания при наименьших экономических затратах.

Возможные способы улучшения прочностных характеристик карбамидных поропластов согласно требованиям разработанных ТУ 2254–001–02067876–2009 представлены на рис. 28.

Одним из способов улучшения карбамидных поропластов является подбор оптимального режима сушки. Недостаток данного способа заключается в длительности процесса сушки, так как испарение влаги идет весьма интенсивно из-за открытопористой структуры, характерной для карбамидных поропластов. Уменьшение усадочной деформации путем увеличения объемной доли полимерной основы за счет снижения пористости карбамидного поропласта, т. е. увеличение плотности, приводит к повышению полимероёмкости, что отрицательно сказывается на теплозащитных характеристиках карбамидного поропласта и не всегда экономически целесообразно. Другой способ улучшения прочностных свойств карбамидных поропластов – химическая модификация карбамидных смол на стадии синтеза. Однако применение известных, специально синтезированных карбамидных смол для производства поропласта «Униполимер-Т» приводит к незначительному увеличению его прочности (до 0,03 МПа).

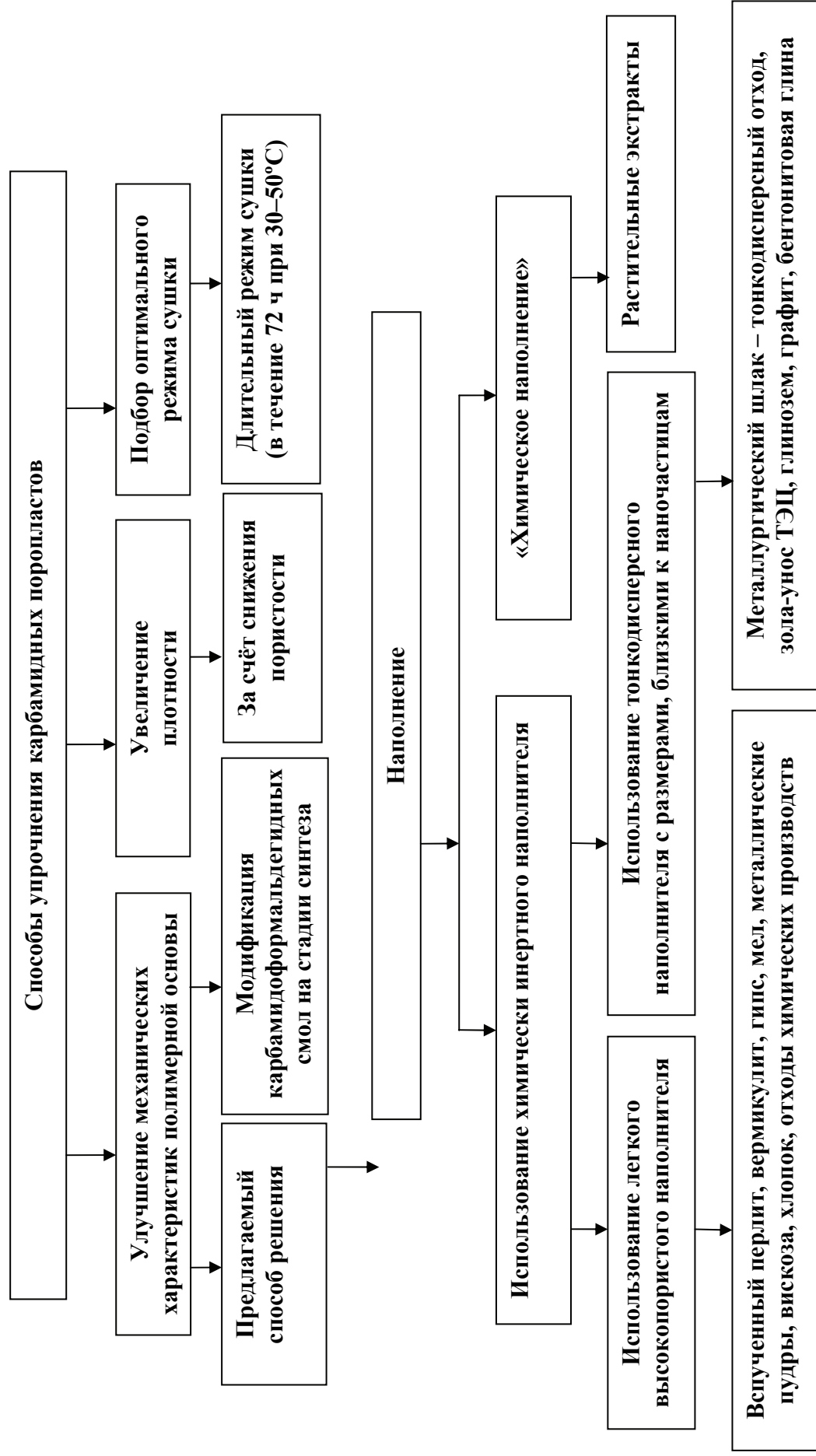


Рис. 28. Блок-схема возможных способов упрочнения карбамидных поропластов

На наш взгляд, наиболее рациональным путем улучшения механических свойств карбамидных поропластов является применение принципов физической модификации полимерной основы, в частности за счет введения наполнителя [16, 48].

В данной работе рассмотрена возможность применения промышленных отходов в качестве наполнителей карбамидных поропластов с целью улучшения их физико-механических свойств.

С этой целью использован как классический способ наполнения (введение химически инертного наполнителя), так и метод самонаполнения, когда наполнитель создается в ходе образования самого поропласта.

В качестве химически инертных наполнителей были использованы легкие высокопористые наполнители и тонкодисперсные наполнители с размерами, близкими к наночастицам.

Легкие наполнители низкой плотности более целесообразны для применения, поскольку при наполнении карбамидных поропластов возникают сложности из-за резкого снижения кратности вспенивания и стабильности пены. В качестве легкого наполнителя низкой плотности был выбран вспученный перлитовый песок (насыпная плотность  $38 \text{ кг/м}^3$ ) или вермикулит. Вспученный перлитовый песок состоит в основном из пористого бесцветного прозрачного алюмосиликатного стекла и характеризуется открытопористой структурой. Было исследовано влияние гранулометрического состава вспученного перлитового песка на свойства карбамидного поропласта и установлены оптимальные фракции – от 250 до 63 мкм.

Отличительной особенностью наполнения карбамидного поропласта другим химически инертным наполнителем – золой-уносом ТЭЦ, состоящим на 80 % из оксида железа, размер которого близок к наночастицам (удельная поверхность  $135\,000 \text{ см}^2/\text{гр}$ ), является возможность введения большого количества наполнителя (до 40 масс. ч) без существенного снижения кратности вспенивания и ухудшения стабильности пены. При реализации способа «самонаполнения» наполнитель создается в ходе реакции взаимодействия реакционноспособных компонентов с катализатором отверждения карбамидоформальдегидной смолы – ортофосфорной кислотой.

В качестве реакционноспособного компонента был выбран шлам – алюмонатриевый отход, состоящий на 96 % из гидроксида алюминия, и отход водоочистки ТЭЦ, состоящий примерно на 87 % из карбонатов кальция и магния, а роль наполнителей играют фосфа-

ты алюминия, кальция и магния, образующиеся в результате реакции взаимодействия наполнителей с катализатором отверждения карбамидной смолы. В случае использования отхода водоочистки ТЭЦ применялось сочетание механического вспенивания и газообразования за счет выделяющегося углекислого газа в результате реакции взаимодействия ортофосфорной кислоты с карбонатами кальция и магния.

Однако недостатком использования отхода водоочистки ТЭЦ является необходимость введения большого количества кислоты, кроме того, за счет интенсивной химической реакции появляются остаточные усадочные напряжения, которые приводят к трещинообразованию поропласта.

В связи с этим была проведена частичная замена отхода водоочистки ТЭЦ менее активным наполнителем – цеолитсодержащей породой (ЦСП) и установлено оптимальное соотношение ЦСП: отход водоочистки ТЭЦ, равное 1:6 [48].

Зависимости основных технологических показателей – времени гелеобразования и кратности вспенивания пенomассы – показаны, соответственно, на рис. 29 и 30, где 1 – вспученный вермикулит; 2 – зола-унос; 3 – металлическая пудра; 4 – мел.

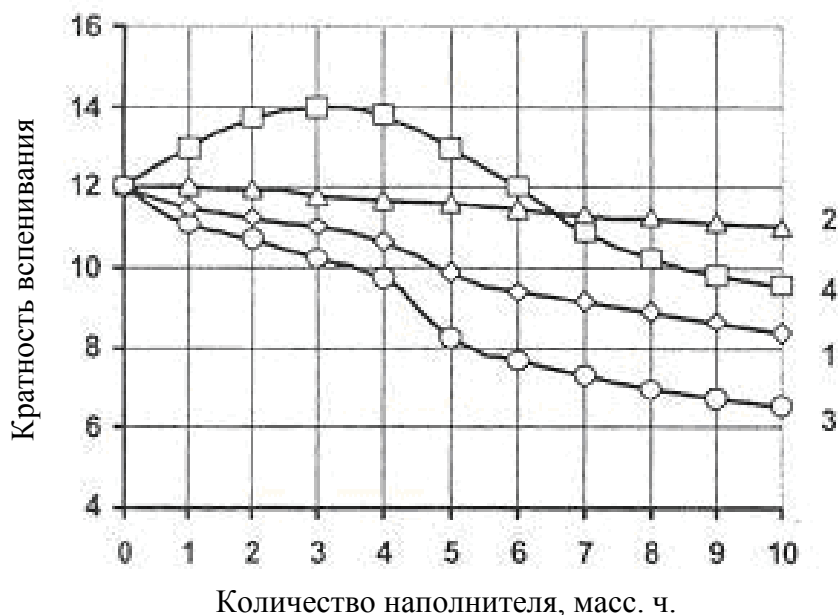


Рис. 29. Зависимость кратности вспенивания пенomассы от содержания наполнителя

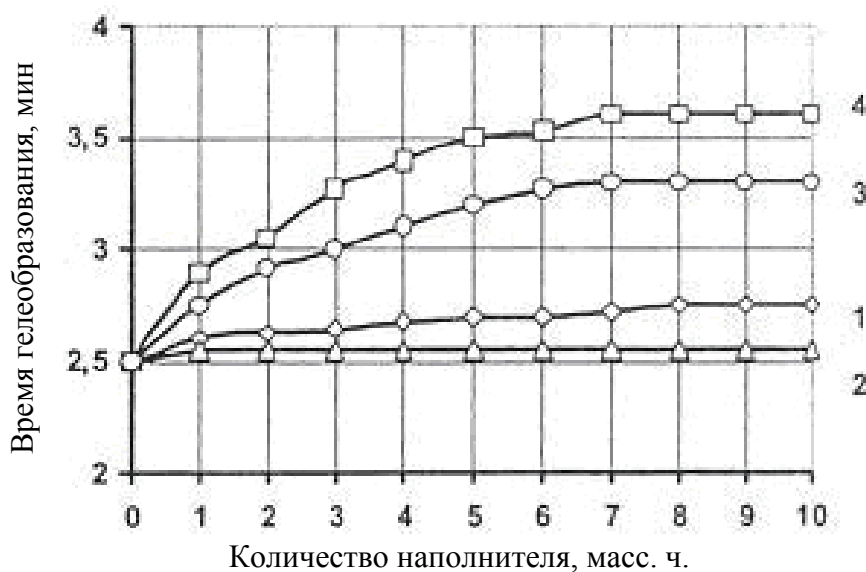


Рис. 30. Зависимость времени гелеобразования пенномассы от содержания наполнителя

Увеличение времени гелеобразования при использовании алюмонатриевого отхода и смеси отхода водоочистки ТЭЦ с ЦСП обусловлено тем, что значительная часть ортофосфорной кислоты взаимодействует с ними, что и приводит к ослаблению каталитического влияния ортофосфорной кислоты на процесс отверждения карбамидоформальдегидной смолы. Увеличение кратности вспенивания при наполнении смесью отхода водоочистки ТЭЦ с ЦСП объясняется выделением углекислого газа в результате реакции взаимодействия ортофосфорной кислоты с карбонатами кальция и магния.

Из анализа изменений плотности и прочности поропласта (рис. 31, 32) следует, что введение наполнителя закономерно увеличивает плотность, а наибольшая упрочняющая способность характерна для наполнителя на основе алюмонатриевого отхода. Вспученный перлитовый песок в качестве объемного наполнителя в силу своего размера является межструктурным, что объясняет незначительное увеличение прочности карбамидного поропласта. Однако наполнение карбамидного поропласта вспученным перлитовым песком позволяет снизить линейную усадку на 70–80 %.

В табл. 22 представлены разработанные составы карбамидных поропластов, наполненных промышленными отходами, характеризующиеся высокими физико-механическими показателями – прочностью на сжатие, низким сорбционным увлажнением, высокими теплозащитными свойствами и низкими значениями усадочных деформаций.

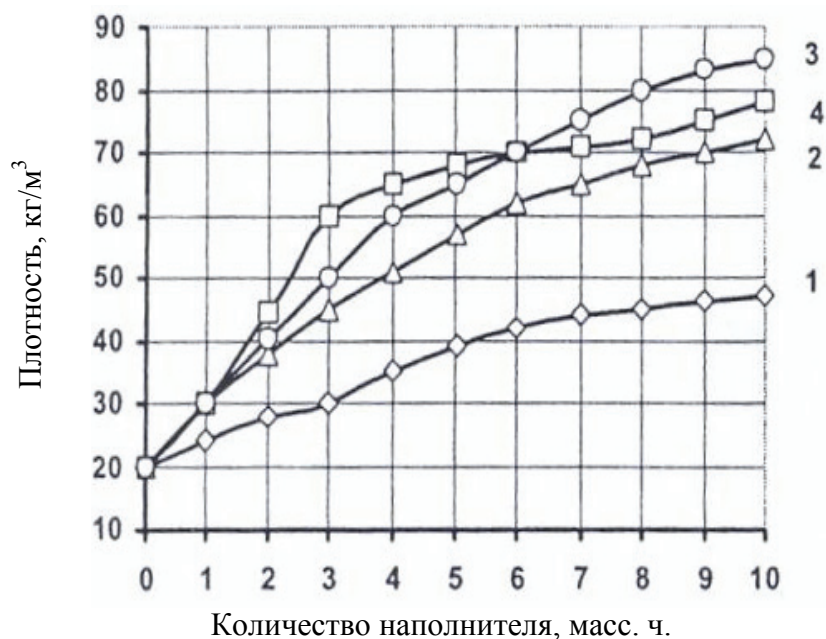


Рис. 31. Зависимость плотности карбамидного поропласта от содержания наполнителя

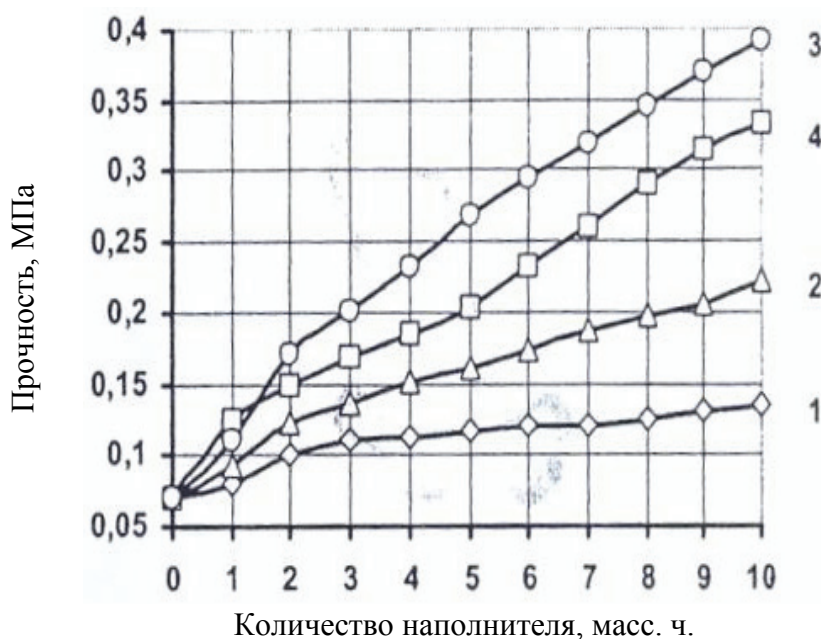


Рис 32. Зависимость прочности карбамидного поропласта от содержания наполнителя

На основе водорастворимой смолы, ПАВ, катализатора отверждения (КО) и дубильных растительных экстрактов по заданной рецептуре были получены образцы поропластов, исследовано влияние модифицированных агентов на механические характеристики и сорбционные свойства поропластов.



**Характеристики карбамидных поропластов**

Составы, масс. ч.	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	Сорбционное увлажнение за 24 ч, %	Линейная усадка, %
Униполимер-Т теплоизоляционный	20–30	0,007–0,05	0,035–0,047	15–20	8
Карбамидный поропласт, наполненный смесью отхода золы-уноса	40	0,11	0,038	10	1
Карбамидный поропласт, наполненный вспученным вермикулитом	65	0,2	0,037	8	3
Карбамидный поропласт, наполненный металлической пудрой	50	0,22	0,032	15	2,5
Карбамидный поропласт, наполненный мелом	60	0,16	0,035	18	2

Практически во всем мире быстрому росту производства и применению поропластов способствуют высокие эксплуатационные показатели, многообразие способов получения и переработки, обеспечение высокого экономического эффекта, но перспективы использования карбамидных поропластов сдерживаются прежде всего из-за низкой механической прочности и токсичности, связанной с выделением из них формальдегида за счёт гидролитической или термодеструкции химической структуры материала по концевым группам и эфирным связям. В связи с повышением требований к экологичности используемых материалов в строительстве основные усилия разработчиков направлены на разработку новых технологий получения пеноматериалов с целью расширения области их эффективного применения.

## 8. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА КАРБАМИДНЫХ ПОРОПЛАСТОВ

Принцип получения поропластов заключается в том, что к водному раствору поверхностно-активного вещества (ПАВ) и катализатора отверждения ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), предварительно вспененных сжатым воздухом, быстро добавляют водную дисперсию карбамидо-формальдегидной смолы. По мере смешивания со смолой пена выделяется через сопло в форму или конструкцию отверждается и высыхает.

Технологический процесс получения поропластов состоит из следующих операций:

- подготовка рабочих растворов (смолы, ПО в воде, ортофосфорной или соляной кислоты) и загрузка их в соответствующие отсеки установки;
- подготовка к работе и пуск установки;
- получение, отверждение пены и сушка поропласта;
- остановка установки и ее чистка.

Приготовление рабочего раствора смолы КФ-МТ заключается в введении в ее состав 5–10 % сорбента для получения поропластов с плотностью более  $30 \text{ кг/м}^3$ . Приготовление смолы производится на специализированном узле подготовки компонентов, оснащенный лопастной мешалкой с определенным рабочим объемом.

В мешалку на 1/4 ее рабочего объема заливается смола, включается перемешивание. При работающей мешалке в смолу вводятся небольшими порциями все количество сорбента, необходимое по рецептуре, на полный рабочий объем мешалки. Перемешивание продолжается в течение 10–15 мин (до исчезновения комочков поропласта) затем заливается оставшаяся часть смолы, и перемешивание продолжается еще в течение 10 мин.

Готовая смесь смолы с пеной перекачивается в отсек установки. Для предотвращения засорения шестерен насоса на конец всасывающих шлангов необходимо закрепить металлическую сетку с размерами ячеек не более 0,5 мм.

В случае поступления смолы с повышенной вязкостью допускается ее разбавление водой в количестве не более 5 % от объема смолы. Разбавление также производится в мешалке с обязательным точным дозированием и перемешиванием. В отсеке установки смолу

с пеной необходимо периодически перемешивать сжатым воздухом для предотвращения оседания поропласта на дно.

Приготовление 5 %-го раствора пенообразователя ПО-1, ПО-3 или ПО-6 производится непосредственно в соответствующем отсеке установки. Для этого в отсек с помощью мерника дозируется 5 л пенообразователя и 95 л воды, затем смесь перемешивается сжатым воздухом.

Ортофосфорная или соляная кислота заливается в бак емкостью 150 л, выполненный из нержавеющей стали.

При подготовке установки к работе следует проверить сборку всех узлов и деталей установки, герметичность и прочность соединений узлов и подводящих шлангов, чистоту насадки смешивания и сопла. Пуск установки ведут следующим образом:

- в насадку смешивания подают сжатый воздух давлением 4–5 атм;
- открывают запорные вентили на линиях подачи компонентов из расходных емкостей, включают компрессор, обеспечивая давление сжатого воздуха на линии подачи смолы и в пеногенераторе 4–5 атм, и приводят в действие дозирующие насосы;
- одновременно с включением насосов открывают запорные вентили в блоке управления, в результате чего исходные компоненты подаются в смеситель и в пеногенератор.

Перед генератором подводящие шланги водного раствора пенообразователя и отвердителя соединяются в один, по которому смесь поступает в пеногенератор.

В пеногенераторе смесь под напором сжатого воздуха проходит через сетки и металлическую стружку, создающие сопротивление, в результате чего образуется пена достаточно равных по размеру ячеек. Из пеногенератора пена поступает в смесительную головку. Одновременно в смесительный реактор подается карбамидно-формальдегидная смола под давлением 4–5 атм., распыляется в форсунке сжатым воздухом и впрыскивается в пену, поступившую из пеногенератора. При этом в реакторе получается жидкая карбамидно-формальдегидная пена, которая подается в форму или заливается непосредственно в полость конструкции, обеспечивающей возможность высыхания.

Рецептура карбамидно-формальдегидной пены, % об.:

Смола КФ-МТ	– 50;
Пенообразователь ПО	– 50;
Ортофосфорная кислота	– 5;
Вода	–40;

Примечание: соотношение компонентов в рецептуре может меняться в зависимости от качества исходных компонентов, плотности поропласта, однако содержание ортофосфорной или соляной кислоты не должно превышать 5 %.

При производстве поропласта должны обеспечиваться стабильные режимы подачи рабочих растворов и сжатого воздуха, которые отрабатываются при наладке установки.

Настройка режимов подачи, рабочих растворов и сжатого воздуха осуществляется в определенной последовательности :

- при отключенных линиях подачи ортофосфорной кислоты и раствора ПО устанавливается расход смолы КФ-МТ, величина, которого определяется исходя из заданной производительности;
- при отключенных линиях подачи смолы и ортофосфорной кислоты устанавливается подача раствора пенообразователя ПО-3 исходя из расхода смолы и рецептуры пены;
- при отключенных линиях подачи смолы и раствора ПО устанавливается подача ортофосфорной кислоты исходя из рецептуры пены;
- при подаче раствора ПО и отвердителя регулируется расход сжатого воздуха на пенообразование. При этом требуется получить кратность вспенивания 20–40, которая определяется соотношением объема пены в см<sup>3</sup> к ее весу в граммах;
- при подаче смолы под давлением 4–5 атм регулируют расход сжатого воздуха на ее распыление, задавшись целью получить мелкодисперсное распыление с равномерным распределением смолы, поступающей в насадку пены.

При остановке линии производства поропласта необходимо тщательно промыть трубопроводы и насосы водой и продуть их воздухом. Кроме того, следует разобрать смеситель и очистить его от отвердевшей пены механически.

## 9. МОДИФИКАЦИЯ ПОРОПЛАСТОВ

Поропласты обладают некоторой токсичностью (содержание свободного формальдегида – 0,35 %). Предварительные исследования показали возможность устранения данного недостатка путем введения в смоляную композицию в качестве модифицирующих агентов растительных дубильных экстрактов коры лиственницы сибирской: спирто-щелочного экстракта, спирто-щелочного сульфитированного экстракта и щелочного экстракта.

Основными компонентами дубильных экстрактов коры лиственницы сибирской являются таниды, молекулы которых имеют фенольные остатки, содержащие несколько гидроксильных групп. Таким образом, все таниды являются производными многоатомных фенолов, т. е. полифенолами. Находящиеся в реакционных положениях атомы водорода способны участвовать в реакциях присоединения и конденсации. В результате присоединения формальдегида в орто- и параположениях к фенольной гидроксильной группе количество свободного формальдегида в смоляной композиции снижается [16].

Характеристикой реакционной способности дубильного экстракта могут служить функциональные группы или реакционные центры. А именно – наличие бромлируемых веществ характеризует возможность фенольных веществ экстракта вступать в реакции конденсации. В композицию модифицирующие агенты вводились в количестве 10–50 % от массы воды в составе композиции.

На эксплуатационные свойства карбамидного поропласта большое влияние оказывает порядок внесения карбамидно-формальдегидной смолы в композицию. На основании имеющейся информации [17, 19, 54] и проведенных предварительных исследований были выбраны следующие варианты внесения компонентов в композицию:

- кислота, экстракт, вода, пенообразователь, смола (вариант I);
- смола, экстракт, вода, пенообразователь, кислота (вариант II).

Установлено, что внесение компонентов по варианту II позволяет получить поропласт с более высокой кратностью вспенивания (4,4) и меньшей усадкой (13 %), чем по варианту I (соответственно 2,7 и 15,3 %). Поэтому в дальнейшей работе внесение компонентов в полимерную композицию осуществляли по варианту II.

Кратность вспенивания у поропласта, полученного без модификатора, равна 4,4. При введении спирто-щелочного экстракта в коли-

честве 10–50 % кратность вспенивания уменьшается и составляет 3,7. Спирто-щелочной сульфитированный и щелочной экстракты ведут себя аналогично, кратность вспенивания соответственно составила 3,5 и 3,1. На основании вышеизложенного делаем вывод о том, что введение растительных экстрактов в смоляную композицию, с одной стороны, привело к уменьшению кратности вспенивания, а с другой – к уменьшению хрупкости пеносорбента, что связано с изменением его пространственной структуры.

При введении спирто-щелочного, спирто-щелочного сульфитированного и щелочного экстрактов в качестве 10–25 % усадка уменьшается и составляет 9,9 %. При дальнейшем увеличении доли вводимого модифицирующего агента до 50 % усадка начинает возрастать. Это связано с усилением конденсационных процессов, которые приводят к структурным изменениям и, как следствие, повышению усадки.

Главным недостатком карбамидных поропластов при использовании их в качестве утеплителя грунтов от сезонного промерзания является их пожароопасность. Пенополистиролы и пенополиуретаны при пожаре способствуют распространению пламени и разрушению конструкции, что ограничивает область их применения и требует принятия специальных технических решений, обеспечивающих пожаробезопасность [16, 19].

Установлено [13, 16], что при введении в смоляную композицию растительных дубильных экстрактов происходят сразу два типа взаимодействия между полимером и фенольными веществами экстракта:

- физико-химическое сцепление, соединяющее полярные группы, т. е. водородная связь;
- химические реакции, приводящие к образованию ковалентной связи, которая необратимо связывает первоначальные компоненты.

Благодаря этим взаимодействиям значительно снижаются хрупкость, усадка, улучшается структурообразование, что и подтверждают полученные нами результаты.

Таким образом, для улучшения прочностных характеристик поропласта и повышения его пожаробезопасности целесообразно вводить в смоляную композицию экстракты из коры лиственницы сибирской в количестве 10–25 %.

В процессе сушки поропласта вода и формальдегид удаляются из материала одновременно. При этом общее количество выделенной воды изменяется незначительно, а количество выделяемого формальдегида существенно возрастает. Поэтому помимо улучшения физико-

механических свойств полимерных материалов стоит задача снижения их токсичности, что является очень важным с экологической точки зрения.

Учитывая, что снижение содержания формальдегида в исходной карбамидно-формальдегидной смоле, на базе которой получают поропласт, имеет свои пределы, имеется способ химического связывания свободного формальдегида при отверждении поропласта путем введения в пенообразующий состав перед его изготовлением растительных экстрактов коры лиственницы сибирской.

Неоднозначное влияние экстрактов на содержание свободного формальдегида связано с особенностями их химической природы. Содержание формальдегида в образце, полученном без модификатора составляет 0,35 %. При введении спирто-щелочных и спирто-щелочного сульфитированных экстрактов в количестве 10 % содержание свободного формальдегида снижается до 0,15 %. Максимально уменьшить содержание свободного формальдегида до 0,08 % удалось при использовании в качестве модифицирующего агента щелочного экстракта, вводимого в количестве 30 %.

Отсутствием способности к развитию стабильного процесса горения обладают карбамидные поропласты на основе карбамидо-формальдегидной смолы. Однако при всех положительных характеристиках карбамидные поропласты уступают пенополистиролам и пенополиуретанам из-за свойственных им низкой механической прочности, хрупкости, значительной усадочной деформации при отверждении и сушке. Одним из путей улучшения механических характеристик карбамидных поропластов, является применение принципов физической модификации за счет введения в их структуру наполнителей в виде опилок осины, окорки осины, коры осины и коры хвойных деревьев. Для наполнения карбамидных поропластов используется те же наполнители, которые применяются и для монолитных пластмасс, но при этом выбор наполнителя определяется с учетом физико-механических особенностей процесса образования полимерных пен, их морфологией и назначением. Главной сложностью при введении традиционных наполнителей в воздушно-механическую карбамидную пену является резкое снижение кратности механического вспенивания и, как следствие, ухудшение ячеистой структуры пенопласта, что требует разработки эффективных методов наполнения и поиск эффективных наполнителей [50].

Анализ литературных данных показывает, что в зависимости от природы и свойств наполнителя, размера его частиц и содержания

наполнителя в матрице поропласта возможно получать материалы с сохранением хороших теплозащитных характеристик [54, 56].

Материалами для наполнения карбамидных пенопластов являются любые органоминеральные отходы химической, металлургической промышленности и лесопромышленного комплекса. Анализ характеристик сырьевой базы растительных отходов лесоперерабатывающих предприятий Восточной Сибири показывает, что наибольший интерес для создания карбамидных поропластов представляют отходы деревопереработки благодаря своей доступности и дешевизне. Введение в матрицу карбамидного пенопласта гидролизного лигнина до 90 массовых частей (далее масс.ч.) на 100 масс.ч. смолы, позволяет получать композиционный материал с высокими прочностными и теплоизоляционными свойствами. При этом введение антипиренов позволяет снизить горючесть композиционных материалов [50].

Вовлечение такого сырья в производство карбамидного поропласта позволяет сократить долю древесных отходов, вывозимых в отвалы. За счет использования органических наполнителей уменьшается доля синтетического материала в композите, что снижает экологическую техногенную нагрузку при утилизации отработанных пеноутеплителей. Одновременно достигается снижение себестоимости карбамидного поропласта, что увеличивает его конкурентоспособность на рынке пеноутеплителей.

Для получения полимерной матрицы пеноутеплителя использована рецептура поропластов полученных с использованием ТУ 2254–001–02067876–2009 «Поропласты композиционные» [40].

Проведенные исследования композиционных поропластов на основе карбамидно-формальдегидной смолы, наполненных древесными отходами, позволило изучить их прочностные свойства.

В процессе исследований в реакционную емкость загружались все компоненты рецептуры, за исключением ортофосфорной кислоты с последующим перемешиванием и на стадии быстрого начального пенообразования внесением наполнителей. Перемешивание осуществляется механическим способом со скоростью 2500 об/мин с одновременным барботированием воздуха в течение 3–5 мин или насыщением озоном в течение 8–10 мин, что приводит к разложению выделяемого из раствора газообразного формальдегида  $\text{НСОН}$  на муравьиную кислоту  $\text{НСООН}$  и воду и способствует быстрому окислению формальдегида и снижению его содержания в готовом карбамидном пенопласте до 0,08 ПДК. Затем приготовленная композиция подается



в реактор первой ступени пеногенерирующей установки ПГУ-М, где воздушно-механическим способом композиция вспенивается до кратности 25–40 объем. ед. далее вспененная композиция поступает в реактор второй ступени, оснащенный форсункой для ввода катализатора отверждения – 10–12 % ортофосфорной кислоты  $H_3PO_4$ . Вспененная желеобразная масса пневмотранспортом отправляется в заливочные формы и выдерживается в течение  $40 \pm 5$  мин в стандартных температурных условиях с последующей сушкой согласно технологическому регламенту.

В качестве древесных наполнителей использовались береста, опилки, окорка (смесь опилок и коры в соотношении 1:1), кора осины и сосны с размером частиц 0,25–1,0 мм. Древесные наполнители предварительно активировали методом взрывного автогидролиза (ВАГ) на установке [16], при следующих условиях: температура 200°C, давление 4 МПа, время выдержки 60с. Сущность метода ВАГ заключается в пропитке в реакторе измельченных древесных материалов водяным паром при заданной температуре, давлении и времени выдержки. Затем производится резкий (менее 1с) сброс давления. При этом пар вырывается из частиц и разрушает их структуру. Размер частиц активированных древесных наполнителей также составляет 0,25–1,00 мм. Количество вводимых в поропласт наполнителей варьировали от 10 до 70 масс. %.

Прочность на сжатие композиционных материалов определена по общепринятым методикам для теплоизоляционных материалов.

Как показывают данные табл. 23, исследованные свойства композиционных материалов, наполненных необработанными исходными древесными материалами, практически не зависят от природы наполнителя, но существенно зависят от количества наполнителя.

Статистический анализ с учетом ошибок воспроизводимости результатов эксперимента при уровне значимости  $q = 0,05$  и числе степеней свободы  $f = 2$  показал, что различие прочности карбамидного пенопласта для исследованных наполнителей не значимо.

Методом регрессионного анализа были получены уравнения, описывающие зависимость прочности карбамидного поропласта на сжатие ( $\sigma_{пр}$ ) от количества наполнителей ( $K$ ):

$$\sigma_{пр} = 0,1991 - 0,0123 K + 0,0005 K^2, R^2 = 0,937. \quad (44)$$

Использование уравнения аппроксимации позволяет на предварительной оценить возможную прочность поропласта, при этом достоверность аппроксимации ( $R^2$ ) составляет 0,937.

Таблица 23

**Свойства карбамидных пеноутеплителей в зависимости от природы  
и количества древесных наполнителей**

Материал для наполнения карбамидных пеноутеплителей	Количество наполнителя, масс. %	Прочность при сжатии карбамидных пеноутеплителей $\sigma_{пр}$ , МПа	
		Наполнитель исходный	Наполнитель после ВАГ
Опилки осины	10	0,22	0,27
	30	0,39	0,45
	50	0,63	0,82
	70	1,76	1,82
Окорка осины	10	0,21	0,25
	30	0,41	0,47
	50	0,65	0,81
	70	1,78	1,84
Кора осины	10	0,20	0,24
	30	0,38	0,53
	50	0,63	0,79
	70	1,80	1,85
Кора сосны	10	0,20	0,26
	30	0,39	0,51
	50	0,65	0,82
	70	1,79	1,83
Береста березы	10	0,20	0,28
	30	0,40	0,47
	50	0,67	0,58
	70	1,81	0,72
Экстракты хвойных деревьев	10	0,23	0,33
	30	0,42	0,51
	50	0,73	0,85
Карбамидный пенопласт «карбопен»	–	0,19	1,93

Оценка значимости коэффициентов уравнений регрессии (44) при уровне значимости  $q = 0,05$  показала, что все коэффициенты значимы. Проверка адекватности регрессионного уравнения по критерию Фишера подтвердила их адекватность. Уравнение (44) позволяет определить прочность карбамидных пенопластов при варьировании количества наполнителя и обоснованно подходить к получению пеноутеплителей с заданными теплоизоляционными свойствами.

Расчетное значение прочности на сжатие  $\sigma_{пр}$  для карбамидного поропласта, содержащего 75 масс. % лигнина фракции 0,25–1,0 мм

составляет 2,09 МПа, экспериментальное значение  $\sigma_{пр}$  для этого образца составляет 1,93 МПа, сравнение значений прочности карбамидного поропласта с учетом доверительного интервала показывает, что уравнение (44) эффективно прогнозирует исследуемую характеристику, что подтверждает применимость уравнения.

Увеличение количества древесных наполнителей приводит к значительному росту прочности модифицированных карбамидных поропластов в сравнении с серийно выпускаемыми (табл. 23). Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что для получения утепляющих композиционных карбамидных поропластов с высокими прочностными характеристиками и высокими теплоизоляционными характеристиками целесообразно внесение более 50 масс. % древесных наполнителей.

Прочность исследованных модифицированных карбамидных поропластов не зависит от природы древесных наполнителей, предварительно не активированных методом взрывного автогидролиза. Наблюдаемый факт повышения прочности поропластов после активации взрывным автогидролизом объясняется тем, что при использовании инертного наполнителя свойства формирующегося пенополимера в большей степени зависят от фракционного состава наполнителя [19–21]. Поскольку для получения композитов использовали одинаковые фракции наполнителей, влияние этого фактора на формирование прочности одинаково для всех древесных добавок.

Известно, что в процессе взрывного автогидролиза происходит механическая деформация структуры обрабатываемого материала в момент быстрой декомпрессии (взрыва). В результате наблюдается разрыхление и разрушение древесных частиц с образованием волокон [50].

Разрушение и разрыхление древесных частиц в процессе автогидролиза также приводит к росту удельной поверхности по сравнению с исходным материалом [16]. В результате увеличивается площадь контакта частиц наполнителя с компонентами реакционной смеси, что приводит к большему увеличению прочности в сравнении с неактивированными наполнителями (табл. 23). Следует отметить, что композиционные материалы, наполненные автогидролизованной берестой, демонстрируют меньшее увеличение прочности по сравнению с остальными активированными наполнителями. Наиболее существенное снижение прочности наблюдается для образцов, содержащих 50 и 70 масс. % берестяного наполнителя. Однако все образцы

с берестой по показателю прочности превосходят образец сравнения карбамидного пенопласта по ТУ [40].

В процессе взрывного автогидролиза помимо механической деформации структуры древесных материалов происходит также гидролиз и деполимеризация лигноуглеводного комплекса древесины. Причем по мере увеличения количества кислот, образующихся в ходе процесса, ускоряется общий гидролиз углеводов. Это приводит к увеличению реакционно-активных функциональных групп различного характера для автогидролизованых древесных материалов [49–51]. Наглядным подтверждением служат данные ИК-спектров опилок осины до и после взрывного автогидролиза (рис. 33).

Как следует из рис. 33, в ИК-спектре автогидролизованного образца опилок осины наблюдается значительное увеличение интенсивности полос поглощения в интервале  $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ . Реакционные функциональные группы этого образца представлены следующим набором:

- карбоксильные группы и их функциональные производные (полосы поглощения валентных колебаний  $\nu_{\text{C-O}}$  при  $1717,7\text{ см}^{-1}$ , полосы в области  $1264\text{--}1225\text{ см}^{-1}$  за счет валентных  $\nu_{\text{C-O}}$  и деформационных колебаний  $\delta_{\text{O-H}}$  соответствующих связей);
- простые эфирные группы (полосы поглощения в области  $1058,6\text{--}1033,5\text{ см}^{-1}$  за счет колебаний  $\nu_{\text{C-O-C}}$  связей в циклических и алифатических простых эфирах);
- спиртовые группы (полосы поглощения при  $1058,6$ ,  $1113,3$  и  $1161,8\text{ см}^{-1}$  за счет колебаний  $\nu_{\text{C-O}}$  связи в первичных, вторичных и третичных спиртах соответственно).

Об увеличении доли поверхностных структур ароматического характера, в частности фенолов, в процессе автогидролиза можно судить по увеличению интенсивности полосы поглощения  $1608,0\text{ см}^{-1}$  за счет колебаний сопряженных углерод-углеродных связей  $\text{C=C}$  в ароматической структуре. Увеличение интенсивности полосы с максимумом при  $1515,2\text{ см}^{-1}$  свидетельствует о росте доли неконденсированных ароматических структур для продукта ВАГ. Рост количества активных функциональных групп в образце после взрывного автогидролиза позволяет прогнозировать снижение количества свободного формальдегида в карбамидных поропластах, что достигается в результате взаимодействия формальдегида с функциональными группами (в частности, с фенольными гидроксильными группами) растительных экстрактов, применяемых для модификации карбамидных утепляющих поропластов [40].

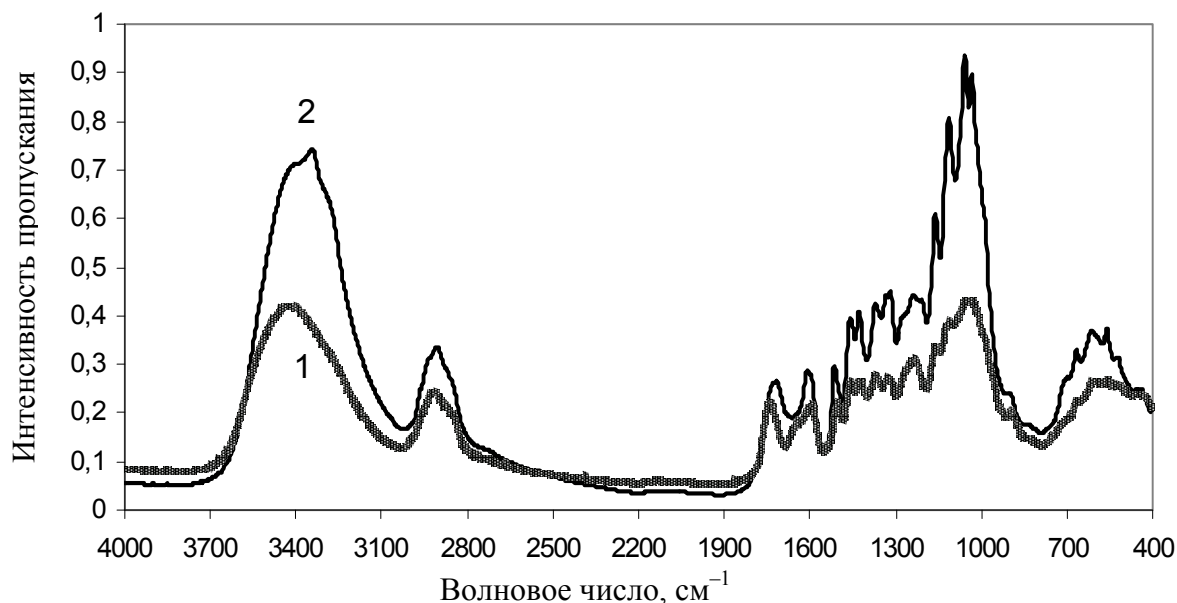


Рис. 33. ИК-спектры опилок осины до обработки (1) и после взрывного автогидролиза (2)

Как показывают данные рис. 34, использование автогидролизованых образцов опилок и окорки осины и коры сосны и экстрактов хвойных деревьев в качестве наполнителей карбамидных поропластов приводят к уменьшению количества свободного формальдегида, что существенно снижает уровень экологической нагрузки на утепляемый мерзлый грунт и на грунт, контактирующий с ним.

Причем наибольшее снижение свободного формальдегида достигается для образца с экстрактами хвойных деревьев, наименьшее снижение характерно для опилок осины. Это объясняется различием в химическом составе компонентов древесных наполнителей, активированных взрывным автогидролизом.

Эффективность снижения формальдегида увеличивается в ряду исследованных наполнителей: опилки осины < окорка осины < кора сосны < экстракты хвойных деревьев. Установлено, что для приведенного выше ряда наполнителей наблюдается увеличение выхода веществ, экстрагируемых 1 %-м раствором NaOH, –32, 42 и 53 % соответственно. Известно, что обработка водным раствором щелочи сопровождается переходом в раствор смол, жиров, лигногуминовых веществ, низкомолекулярного лигнина, полисахаридов и полифенольных кислот [51]. Поэтому выход таких экстрактивных продуктов может использоваться для характеристики содержания активных (в отношении формальдегида) веществ в автогидролизованных древесных материалах.

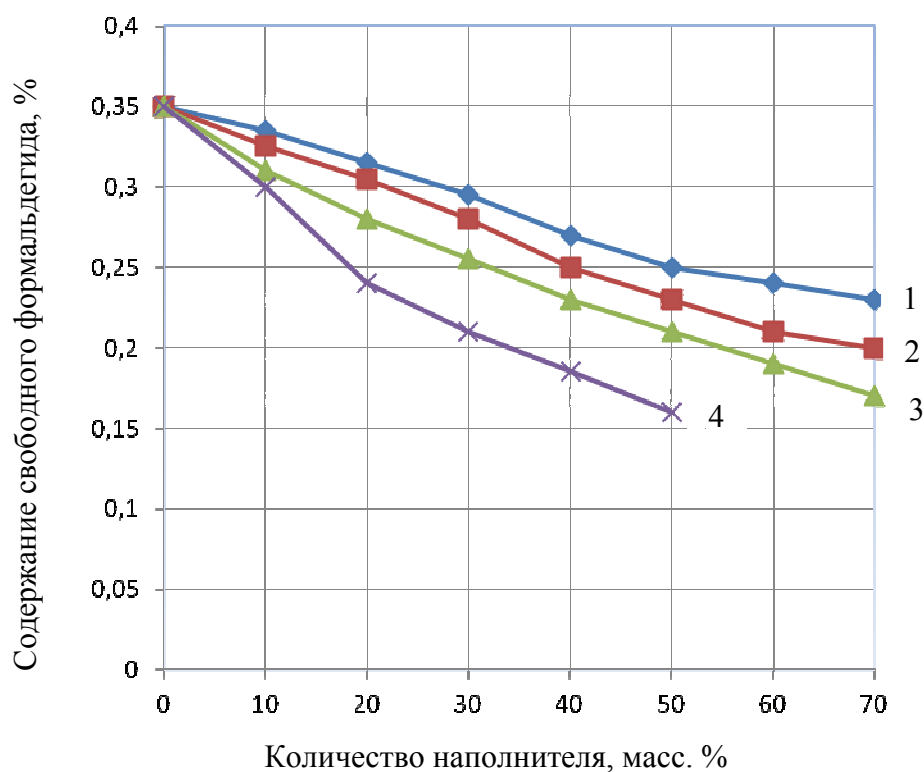


Рис. 34. Зависимость содержания свободного формальдегида в карбамидном поропласте от количества древесного наполнителя: 1 – опилки осины; 2 – окорка осины; 3 – кора сосны; 4 – экстракт коры хвойных деревьев

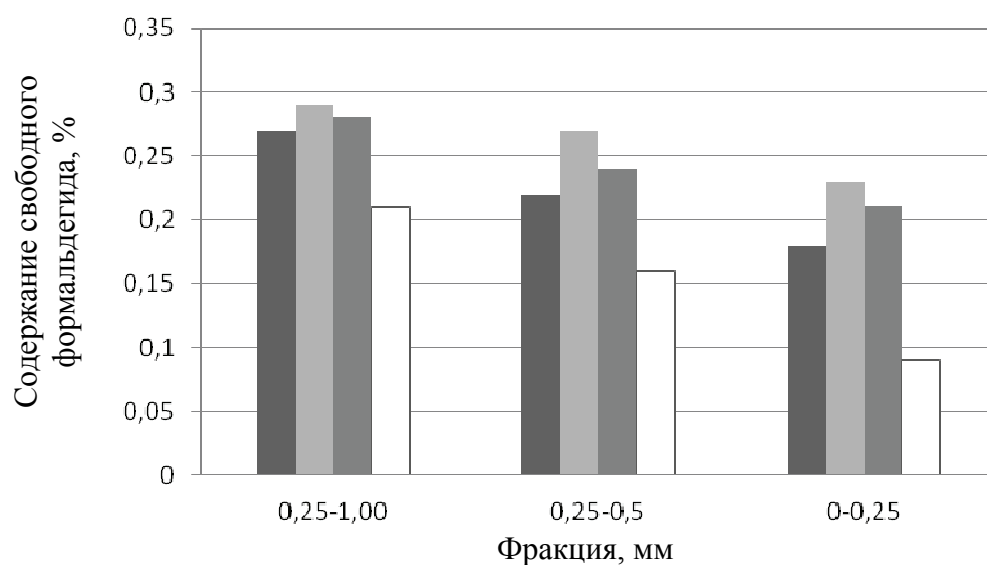


Рис. 35. Влияние размера частиц наполнителей на содержание свободного формальдегида в карбамидном пенопласте: ■ – кора сосны; ■ – опилки сосны; ■ – окорка осины; □ – экстракт хвойных деревьев

Эффективность снижения свободного формальдегида для композиции карбамидного утепляющего поропласта увеличивается с уменьшением размера частиц наполнителя. На рис. 35 приведены данные о влиянии размера фракции древесных наполнителей, активированных взрывным автогидролизом, на содержание свободного формальдегида в карбамидных поропластах (содержание наполнителя 30 масс. %).

Фракции различного размера изготовлены измельчением исходного автогидролизованного материала с размером частиц от 0,25 до 1 мм.

Наблюдаемый эффект обусловлен увеличением контакта частиц наполнителя и компонентов реакционной смеси за счет роста контурной поверхности частиц при уменьшении размера фракции. В результате взаимодействие формальдегида с активными веществами наполнителя протекает более интенсивно.

## 10. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОГО ПРИГОТОВЛЕНИЯ И НАНЕСЕНИЯ КАРБАМИДНЫХ ПОРОПЛАСТОВ НА ГРУНТ

В зависимости от базы основного оборудования, технологических условий, имеющейся номенклатуры химических компонентов, от объемов производимого и наносимого поропласта для утепления грунта от сезонного промерзания, производство может осуществляться в стационарном и автономном вариантах и реализовываться в качестве переносных (рис. 36) или стационарных установок (рис. 37), а также мобильных технологических комплексов (рис. 38, рис. 39) [53, 54].

Переносимые установки представляют собой устройства ранцевого типа, применение которых целесообразно при производстве и нанесении утепляющего поропласта объемом от 7 до 12 м<sup>3</sup> в зависимости от кратности и кажущейся плотности, в то время как стационарные установки рекомендуется применять при объеме производства поропласта до 250 м<sup>3</sup>, а мобильные установки применимы на узкополосных объектах при объеме готового поропласта более 200 м<sup>3</sup>.

Стационарная установка включает (рис. 37) кроме основных компонентов включает дозирующие устройства, систему трубопроводов, агрегаты термостатирования компонентов, контрольно-измерительные приборы с запорно-регулирующей аппаратурой.

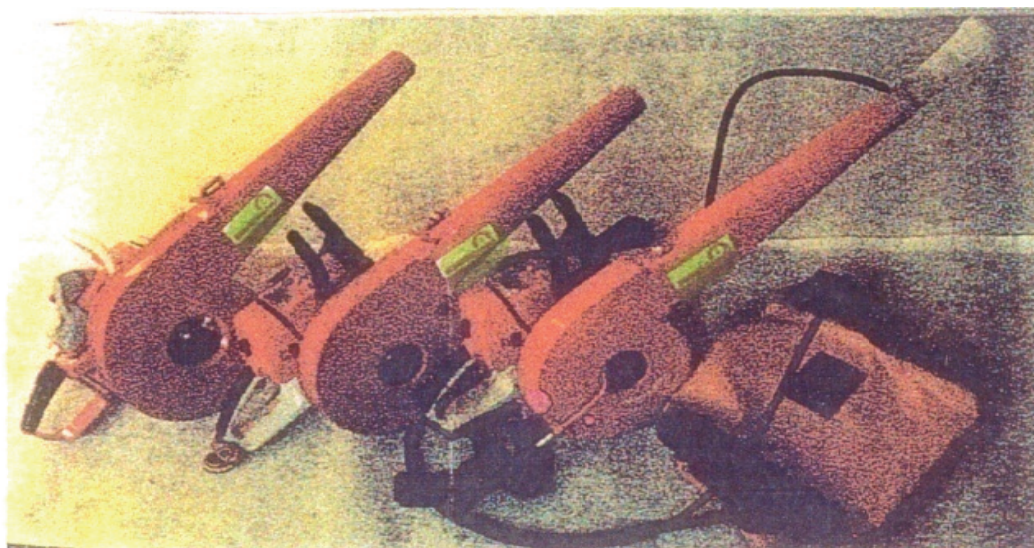


Рис. 36. Ранцевая газожидкостная эжекторная установка



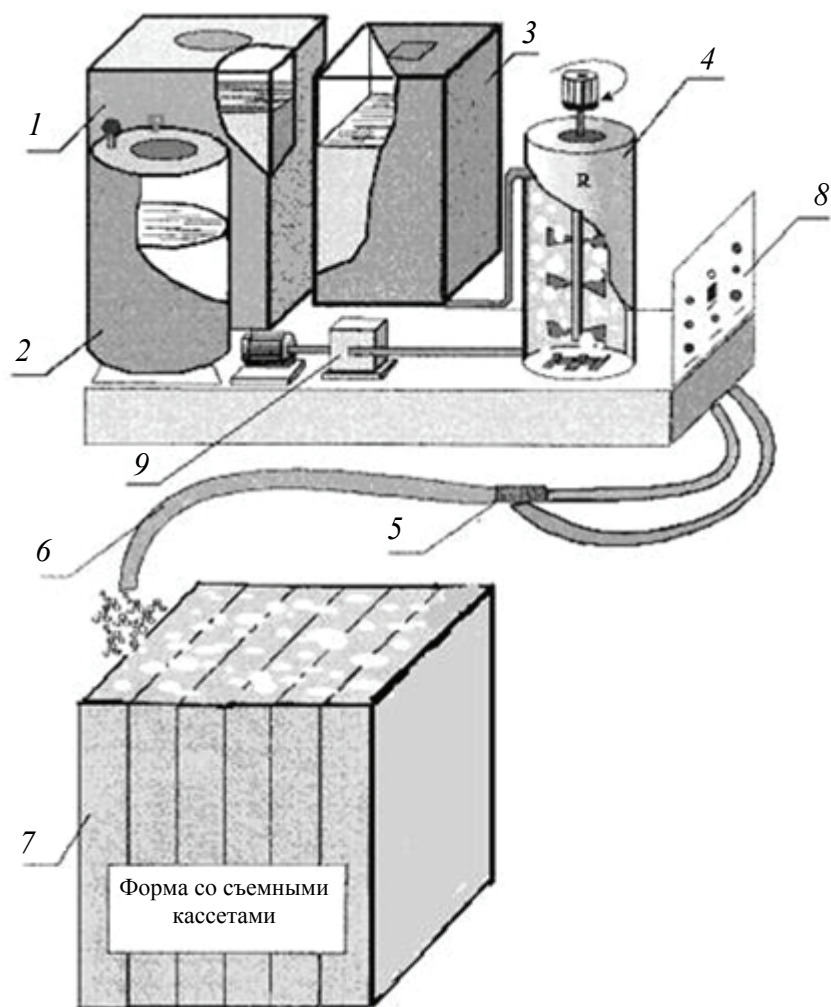


Рис. 37. Стационарная пеногенерирующая установка для получения самоотверждающейся полимерной композиции: 1 – бак с эмульсией; 2 – бак с отвердителем; 3 – бункер для модификаторов и отвердителей; 4 – реактор; 5 – смеситель; 6 – дозирующее устройство систем трубопроводов; 7 – конструктивные исполнения для заливки; 8 – контрольно-измерительные приборы; 9 – насос с электродвигателем

В установку входит смеситель 5, формы различных конструктивных исполнений для заливки 7 и специальный реактор, выполненный в виде трёх камер. Камера вспенивания первой ступени с массообменным турбулентным устройством, камера стабилизации и созревания пены второй ступени, камера отвердевания третьей ступени с формирующим приспособлением.

При работе установки, сжатый воздух от компрессора по системе трубопроводов подается через коллектор в реактор и бак с отвердителем. Подаваемая в реактор, расчетной величины эмульсия, под давлением сжатого воздуха в турбулентном потоке мгновенно вспе-

нивается. Встроенное в реактор массообменное устройство позволяет не только увеличить контактную поверхность воздуха с эмульсией, но и создать при этом высокую турбулентность, тем самым интенсифицировать и стабилизировать процесс вспенивания.

Полученная пеновоздушная смесь подается в камеру второй ступени дополнительной стабилизации и созревания пены, увеличивая порог стартового времени в 1,5–2 раза, после чего, по пенопроводному рукаву она подается в камеру смешения третьей ступени. При этом одновременно со смесью, через специальную форсунку впрыскивается оптимальный расход отвердителя, с помощью которого пеновоздушная смесь равномерно перемешивается и частично отверждается. Окончательная реакция поликонденсации, т. е. полного отверждения, осуществляется в формирующем приспособлении, где полимерная масса в течение нескольких минут превращается в пенополимерный быстротвердеющий олигомер заданной формы.

Данная установка для получения сорбента в основном используется как стационарная, но при необходимости может быть установлена и на шасси различных транспортных средств.

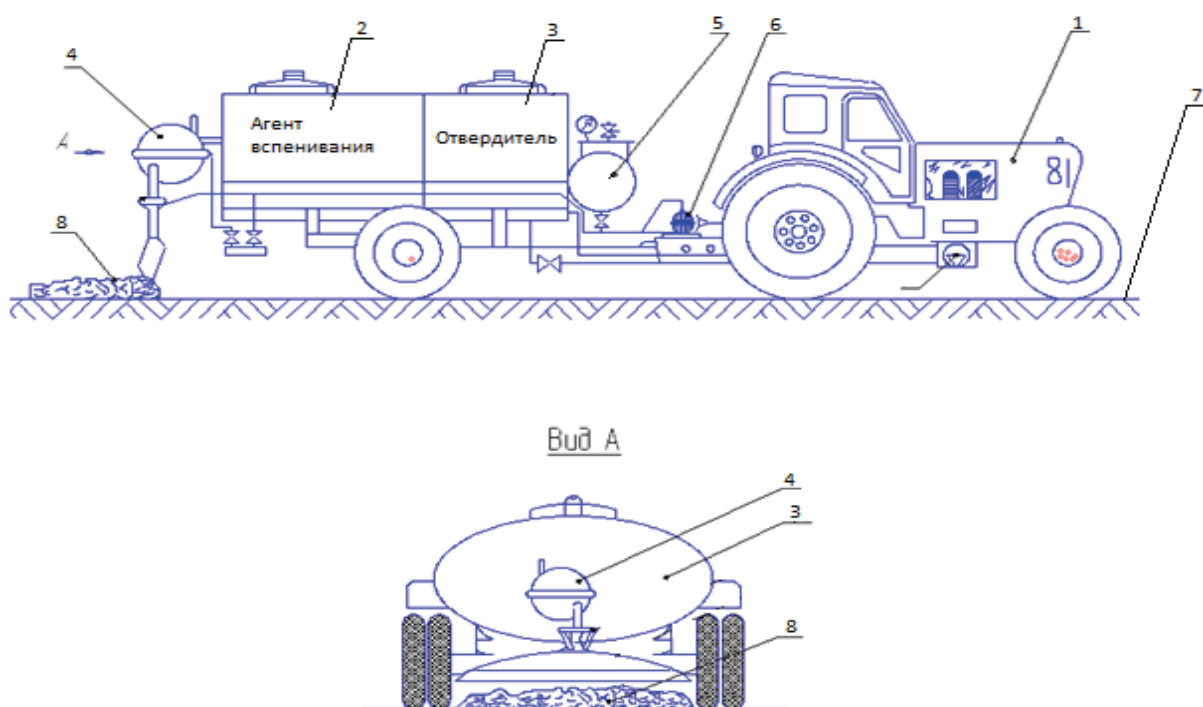


Рис. 38. Мобильный комплекс на базе колесного трактора: 1 – тягово-силовой агрегат; 2 – агент вспенивания; 3 – агент отверждения; 4 – дозатора-смесителя поропласта; 5 – компрессора; 6 – системы привода агрегатами комплекса; 7 – утепляемый грунт; 8 – карбамидный поропласт

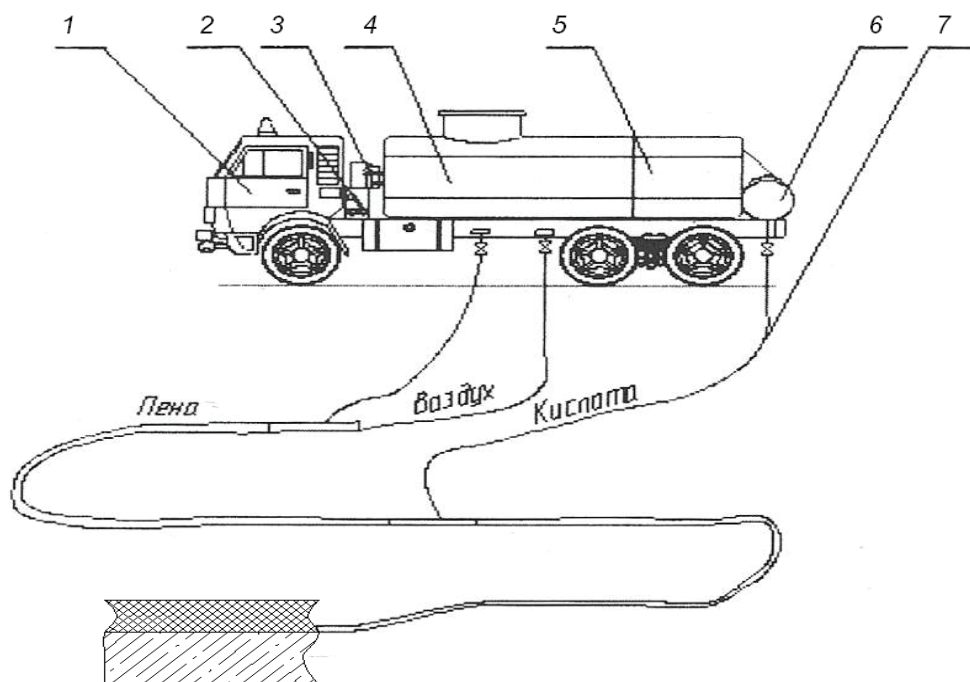


Рис. 39. Мобильный комплекс на базе КАМАЗ

Мобильный комплекс (рис. 38) представляет собой полунавесную установку, которая агрегатируется с тягово-силовым агрегатом – гусеничным или колесным трактором. Принцип действия мобильного комплекса заключается в следующем.

С помощью механизма навески трактора полунавесной комплекс присоединяется к силовому агрегату 1. Крутящий момент от вала отбора мощности трактора передается на систему привода 6, посредством которой приводится в действие пневмогидравлическая система 5 мобильного комплекса и карбамидный поропласт 8 наносится на грунт 7, через дозатор-смеситель 4.

Одной из разновидностей мобильного комплекса на базе автомобильного шасси (рис. 39) для приготовления и нанесения карбамидного поропласта является установка, состоящая из базового автомобиля 1, вала отбора мощности 2, компрессора 3, агентов вспенивания и отверждения 4, 5, дозатора кислоты 6 и трубопровода 7.

Особенность мобильного комплекса заключается в том, что процесс приготовления поропласта разделен на две стадии, первая из которых реализуется в мобильном комплексе, а ее продукт в виде пены-полуфабриката поступает по пенопроводу под действием воздуха и, смешиваясь с кислотой, дозируемой устройством 6, превращается в готовый продукт – карбамидный поропласт. Дозирование кислоты

позволяет регулировать стартовое время химической реакции поликонденсации (отверждения) поропласта.

Компоновка мобильного комплекса зависит от разновидности применяемых компонентов, составов композиций и их способов получения (физико-энергетический, воздушно-механический с применением ультразвуковых диспергаторов, а также с применением ротационно-гидродинамических устройств, агрегатов термостатирования, парогенераторов и реакторов вспенивания, созревания и отверждения).

При применении карбамидного поропласта для утепления грунта от сезонного промерзания целесообразно, используя разработанную методику, определить толщину поропласта на каждый из месяцев разработки грунта по формуле (5):

$$h = K_y L_y (K_p K_w R_o - R_c),$$

где  $K_y$  – коэффициент усадки пены-утеплителя;  $L_y$  – коэффициент теплопроводности утеплителя, ккал/(м · ч · °С);  $K_p$  – коэффициент влияния плотности грунта;  $K_w$  – коэффициент влияния влажности грунта;  $R_o$  – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания, м<sup>2</sup> · ч · °С/ккал;  $R_c$  – термическое сопротивление снега, м<sup>2</sup> · ч · °С/ккал.

С практической точки рекомендуется использовать технологию дифференцированного нанесения поропласта (рис. 40), что существенно снижает стоимость предохранения грунтов от сезонного промерзания.

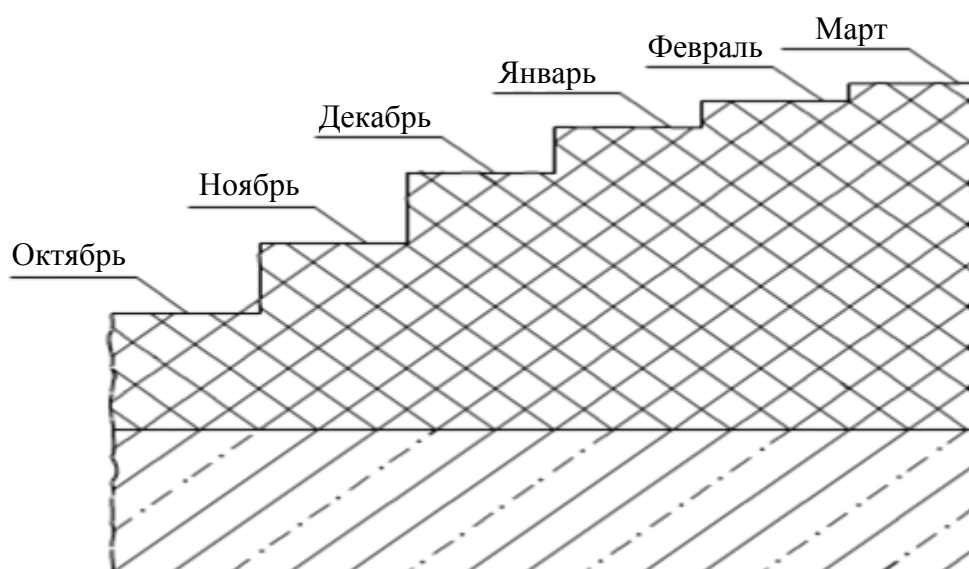


Рис. 40. Дифференцированная схема нанесения карбамидного поропласта

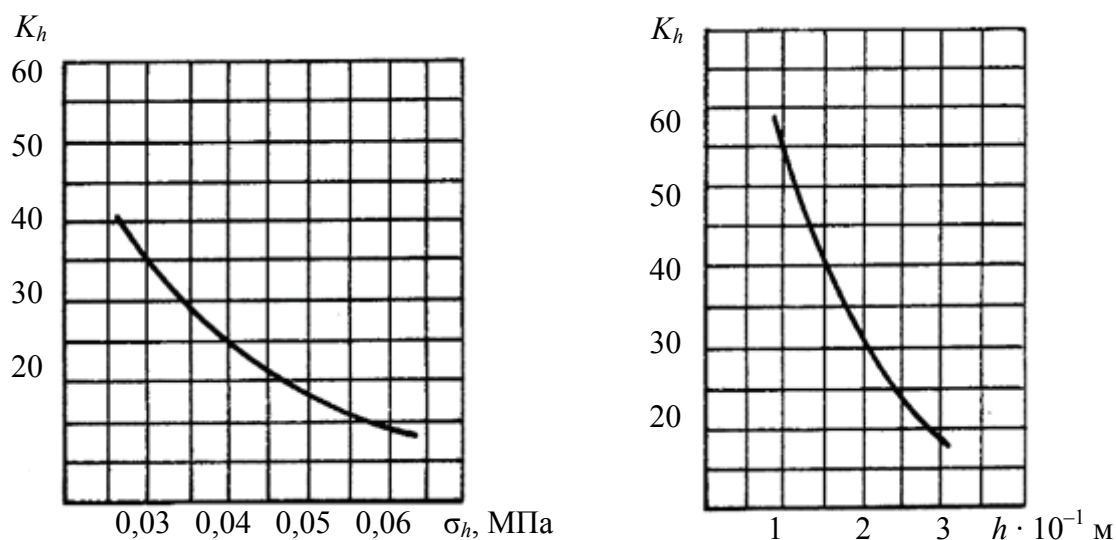


Рис. 41. Зависимость кратности пены от прочности  $\sigma_h$  и глубины слоя закладки поропласта  $h$

Эксплуатационными недостатками карбамидного поропласта являются малая прочность и малый удельный вес, что накладывает дополнительные требования к процессу нанесения его на грунт и сохранения на утепленном грунте.

Графические зависимости (рис. 41) показывают, что кратность поропласта выше в верхних слоях утепляющего слоя, а это приводит, как следствие, к уменьшению несущей прочности этого слоя. Таким образом, естественным путем невозможно повысить прочность верхних слоев и достичь эрозийной стойкости утепляющего покрытия поропласта. Одним из решений данной проблемы является послойное нанесение поропласта различной кратности (рис. 42), при этом поропласты большей кратности 2 наносятся на утепляемый грунт 1, а поропласт меньшей кратности в качестве защитного экрана 3, закрывающего нижний (рабочий) слой и предохраняющего его от ветровой эрозии.

Мобильные комплексы (рис. 38, 39), как правило, применимы при объемах утепления грунтов до  $250 \text{ м}^3$  и в условиях распределенного по времени процесса нанесения поропласта. Такие комплексы малоприменимы в условиях севера, когда зимний период наступает в сжатые сроки, а летний – подготовительный период весьма краток по продолжительности.

На рис. 43 приведен технологический мобильный комплекс по производству и нанесению поропласта в полевых условиях. Комплекс позволяет, в отличие от ранее рассмотренных, получать быстротвер-



деющие самоотверждающиеся полимерные покрытия различных рецептур, кратности и кажущейся плотности объемом более 300 м<sup>3</sup>.

Показатель кратности зависит от способа приготовления поропласта, но при этом следует отметить, что данный показатель не постоянен по глубине слоя закладки поропласта даже при одном из выбранных способов.

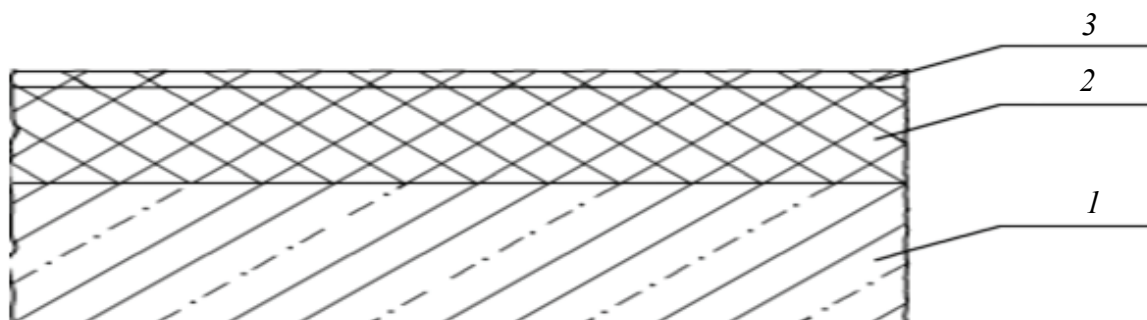


Рис. 42. Схема нанесения поропластов различной кратности на утепляемый грунт

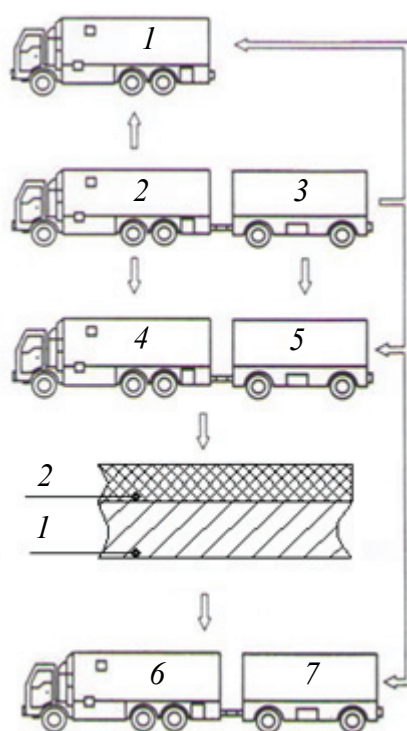


Рис. 43. Мобильный технологический комплекс

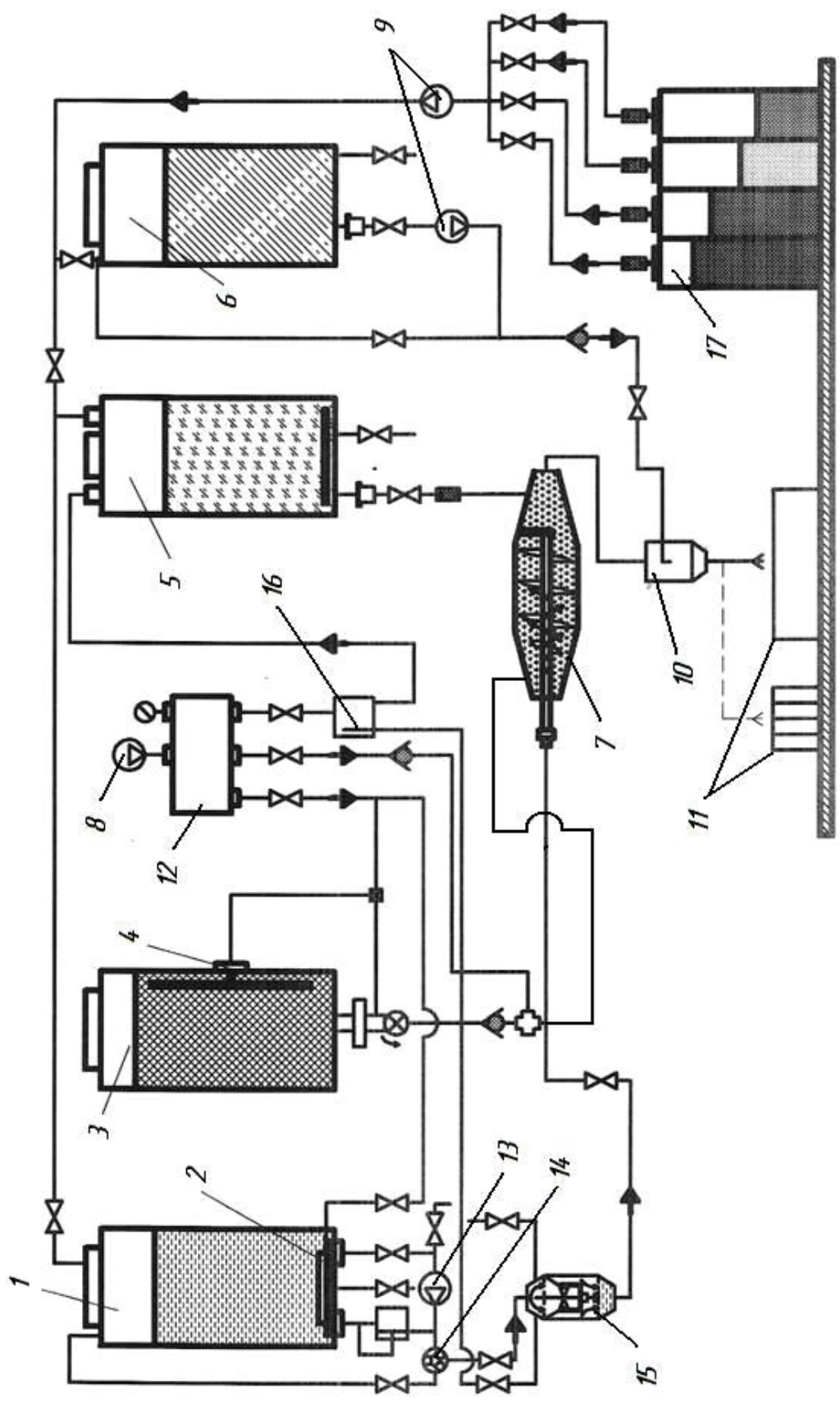


Рис. 44. Пневмогидравлическая схема мобильного технологического комплекса производства заливочных порошковых

В основе технологии таких поропластов использована реакция поликонденсации по двух- и пятикомпонентной схеме. Мобильный технологический комплекс представляет собой самостоятельный передвижной мини-цех с автономной системой обслуживания и состоит из бытового модуля 1, модулей подготовки компонентов 2, 3, модуля производства поропласта 4, 5, модулей регенерации 6 и утилизации использованного поропласта 7. Карбамидные поропласты являются многократно используемым материалом, что позволяет после снятия его перед разработкой утепленного грунта после сортировки и затаривания утилизировать лишь ту часть, которая пришла в негодность.

Независимо от компоновки мобильного комплекса в каждом из них применена стандартная пневмогидравлическая схема получения поропластов (рис. 44).

Схема содержит емкость 1 с эмульсией, получаемой смешиванием компонентов из баков 17, подаваемых насосом 9, емкость 1 в нижней части имеет диспергатор 2, обеспечивающий однородность эмульсионной композиции (смола КФ-МТ 015, сульфанол, вода) в баке и трубопроводах, бункер 3 предназначен для хранения наполнителя, баки 5 и 6 для хранения модификатора и отвердителя. Пневмоимпульсное устройство 4 обеспечивает взвешенное состояние наполнителя в бункере 3. Избыточное давление в ресивере 12 и системе трубопроводов поддерживается компрессором 8. При включении насоса 13 эмульсия из бака 1 через расходомер 14 подается в реактор первой ступени 15, одновременно воздух под давлением через регулятор давления подается через форсунки в зону вспенивания реактора 15, в результате происходит высокократное вспенивание. Впоследствии вспененная масса подается в реактор 7 второй ступени, имеющий в качестве рабочего органа полое шнековое устройство. Реактор второй ступени производит перемешивание вспененной массы с наполнителем, в качестве которого используются древесные опилки, мел, гипс. Полученная смесь, дополняется модифицирующими добавками из бака 5 и поступает в реактор третьей ступени 10, в котором смешивается с отвердителем смеситель 10, в котором пена-полуфабрикат дополнительно смешивается с катализатором отверждения. В результате химической реакции поликонденсации карбамидный поропласт приобретает эксплуатационные свойства товарного поропласта и заливается в кассеты 11 или на утепляемый грунт.



## 11. УТИЛИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАННОГО ПОРОПЛАСТА

Для утилизации карбамидного поропласта, отсортированного в модуле 6 (рис. 45) и не пригодного по степени загрязнения частицами грунта, бытовыми отходами, нефтепродуктами, применим один из методов физико-химической переработки – метод сжигания. Сжигание отходов является одним из наиболее хорошо изученных и известных методов утилизации всех органических соединений.

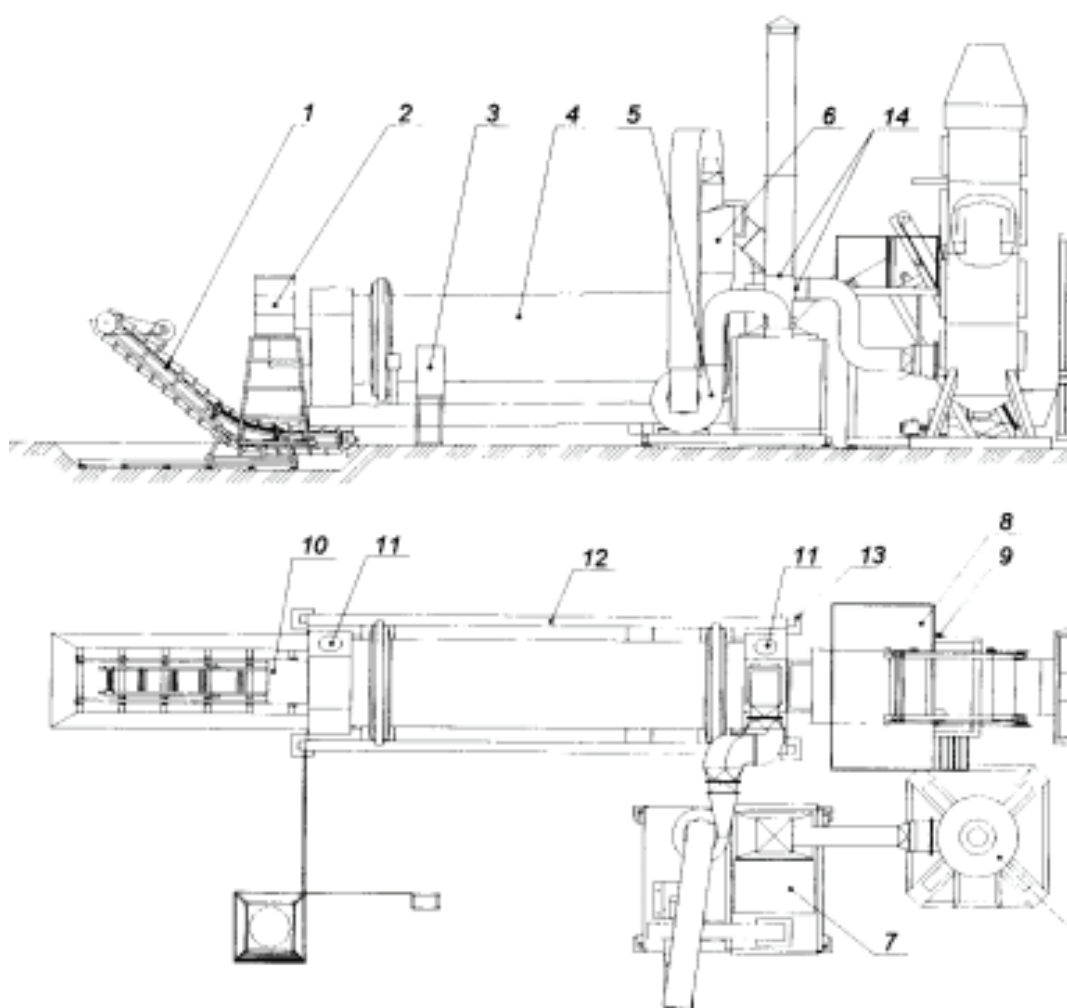


Рис. 45. Общий вид установки УЗГ-1МГ: 1 – элеватор ковшовый; 2 – топливный бак; 3 – пульт управления; 4 – высокотемпературная камера утилизации; 5 – дымосос; 6 – циклон; 7 – отбойник; 8 – ковшовый подъемник; 9 – пульт управления ковшовым подъемником; 10 – эжекторная жидкотопливная горелка; 11 – взрывной клапан; 12 – рама; 13 – регулируемые опоры; 14 – задвижка блока фракционирования; 15 – блок фракционирования; 16 – бункер; 17 – пульт управления вибратором бункера

Данным методом можно обработать широкий ряд органических отходов, включая хлорированные соединения. Применяя сжигание карбамидных поропластов следует иметь в виду, что может потребоваться предварительная обработка для удаления тяжелых металлов, если тяжелые металлы остаются в твердом остатке или в дымовых газах или тяжелые металлы могут реагировать с хлором с образованием соединений, более летучих или токсичных, чем первоначальные загрязнители.

Утилизация, непригодного к дальнейшему использованию поропласта производится на установке УЗГ-1МГ, применяемой ЗАО «Зеленый город» (г. Красноярск) при выполнении восстановительных мероприятий на объектах нефтяной отрасли. Установка имеет три степени очистки и по своим техническим характеристикам (табл. 24) полностью подходит для утилизации поропластов.

Таблица 24

#### Основные технические характеристики установки

Параметр	Значение
Расчетная производительность при загрязнении поропласта до 5 % и естественной влажности, кг/ч	3000
Потребляемая мощность, кВт	18
Расход жидкого топлива, л/час	40
Температура в камере утилизации, °С	800÷900
Температура отходящих газов, °С	до 500
Габаритные размеры (длина, ширина, высота), м:	
высокотемпературная камера утилизации	7,4×1,9×2,3
блок очистки	2,8×2,7×6,0
ковшовый подъемник	3,5×2,3×3,3
элеватор ковшовый	3,9×0,6×2,2
бункер	2,9×2,2×3,0
Масса узлов, кг:	
высокотемпературная камера утилизации поропласта	8705
блок очистки	2100
ковшовый подъемник	740
элеватор ковшовый	390
бункер	800

Установка состоит из камеры утилизации 4 (рис. 45), установленной на опорных катках с приводом от мотор-редуктора. Высокая температура внутри камеры утилизации создается за счет сжигания жидкого топлива в эжекторной горелке и окисления горючих отходов, находящихся в поропласте, подаваемом ковшовым подъемником. Перемещение поропласта в высокотемпературной камере утилизации происходит за счет вращения барабана в наклонном положении вдоль оси в сторону камеры разгрузки. Установка смонтирована на раме, имеющей регулируемые опоры для регулировки угла наклона барабана, что позволяет регулировать и производительность установки. Обработка отходящих газов производится в установке «Циклон», для третьей степени очистки применяется отбойник. Процесс горения и вентиляция обеспечивается работой дымососа.

Подача поропласта производится ковшовым элеватором (рис. 46).

Установка обеспечивает утилизацию сильнозагрязненных поропластов со степенью загрязнения от 2 до 6 % без дополнительных мероприятий, а для поропластов, имеющих степень загрязнений от 6 до 16 %, применяется добавление в загрязненный поропласт древесных опилок. Переработка поропластов, имеющих в составе горючие нефтесодержащие и бытовые отходы, производится при температуре  $800\div 900^{\circ}\text{C}$ .

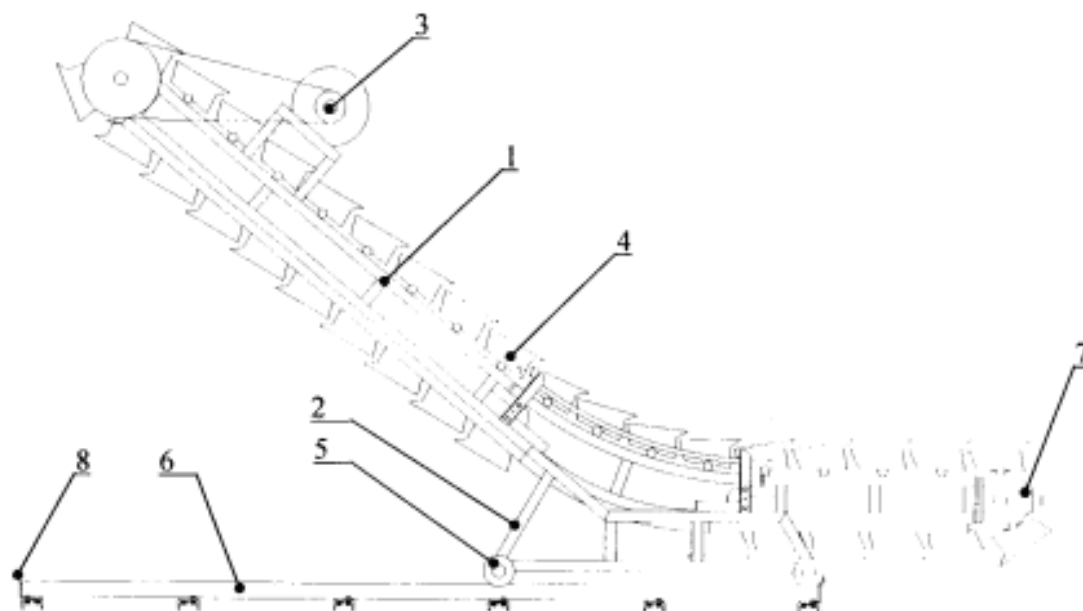


Рис. 46. Элеватор ковшовый: 1 – рама; 2 – тележка; 3 – привод транспортера; 4 – ковши; 5 – катки; 6 – рельсовый путь; 7 – натяжное устройство; 8 – фиксаторы

Использование встроенной системы очистки отходящих газов существенно снижает выбросы вредных веществ в атмосферу при утилизации поропластов.

Одним из преимуществ применения установки УЗГ-1МГ является использование промышленной сети переменного тока, а также возможность ее применения в полевых условиях. Использование третьей степени очистки позволяет существенно снизить содержание оксидов и диоксидов серы, фенола и азота в отходящих газах установки, что весьма актуально при утилизации поропластов, загрязненных сернистой нефтью или нефтепродуктами с повышенным содержанием серы. Основное назначение блока фракционирования заключается в извлечении жидких и легких фракций углеводорода из поропластов с содержанием углеводородов более 6 %. При замазученности поропласта менее 3 % нефтепродуктами и загрязнении бытовыми отходами, грунтом и органическими остатками менее 10 % использование блока фракционирования нецелесообразно. При слабой замазученности поропласта и невысоком загрязнении грунтом и бытовыми отходами, в которых практически отсутствуют легкие фракции углеводородов блок фракционирования выполняет функцию четвертой степени очистки отходящих газов. Три секции блока конденсируют влагу из поропласта, а также удерживают остатки несгоревших углеводородов и сопутствующих веществ в термодесорбере, что приводит к снижению вредных выбросов в атмосферу.

Комплекс работает следующим образом. Загрязненный нефтепродуктами, грунтом и бытовыми отходами поропласт (содержание углеводородов 5÷6 %, содержание грунта до 10 %, бытовых отходов – 20 %) поступает из блока испарителя, горячие газы, вырабатываемые горелкой и сгораемыми остатками, проходят очистку и охлажденные до температуры 370°C, поступают в блок испарителя, где находится загрязненный поропласт, под их действием происходит полное сжигание, а выпариваемая влага и углеводороды непрерывно удаляются дымососом в блок фракционирования, где конденсируются. Конденсат из секций фракционирования периодически сливается через штуцер.

Опыт многолетней эксплуатации установки УЗГ-1МГ на полигоне «Серебристый» ЗАО «Зеленый город» показывает, что наибольший эффект достигается при ее работе в комплексе с блоком термодесорбера, блоком испарителя и блоком фракционирования.

В случаях, когда поропласт загрязнен только бытовыми отходами и грунтом, когда отсутствуют загрязнения нефтепродуктами, то целесообразно производить захоронение в грунт, при этом следует отметить, что эти отходы благоприятно влияют на структуру почвы, насыщая ее азотом [46].

## **12. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ КАРБАМИДНЫХ ПОРОПЛАСТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ УТЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ОТ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ**

С точки зрения решения проблемы внедрения ресурсо-энерго-сберегающих и природоохранных технологий предохранения грунтов от сезонного промерзания наиболее перспективными теплоизоляционными, сорбционными материалами являются карбамидные поропласты. Существенным моментом, повышающим конкурентоспособность карбамидных поропластов по сравнению с другими видами поропластов, является сравнительно низкий показатель его энергетического эквивалента, который был предложен для сравнения энергоемкости производства отдельных поропластов на базе суммарной оценки затрат энергии на изготовление исходных материалов и полупродуктов, входящих в состав композиций конечного продукта. Показатель конечного эквивалента для карбамидного поропласта равняется 480 МДж/кг против 2 950 МДж/кг для пенополиуретана и 1 360 МДж/кг для пенополистирола [20].

Современные карбамидные поропласты на рынке России представлены под торговой маркой «Униполимер-Т», пеноизол, карбопен, к достоинствам которых можно отнести хорошие теплоизоляционные свойства, низкую стоимость и высокую технологичность. Отсутствие способности к развитию стабильного процесса горения и к образованию расплава свидетельствует о пониженной пожарной опасности униполимера-Т по сравнению с распространенными пенополиуретанами и пенополистиролами.

Однако такие утеплители, как карбопен, униполимер-Т, пеноизол, ПКЗ-30 и т. д., все карбамидные поропласты, не находят широкого применения в технологиях утепления грунта из-за низкой механической прочности и значительной усадки, которые обуславливаются особенностью воздушно-механического способа изготовления, характеризующегося применением сильно разбавленных карбамидных смол. Удаление в процессе сушки воды, содержащейся в карбамидной смоле, а также выделяющейся воды в результате реакции поликонденсации, приводит к развитию внутренних напряжений и усадочных деформаций [32, 33, 48, 57].

Уменьшение усадочной деформации путем увеличения объемной доли полимерной основы за счет снижения пористости карбамидного поропласта, т. е. увеличение плотности, приводит к повышению полимероёмкости, что отрицательно сказывается на теплозащитных характеристиках карбамидного поропласта и не всегда экономически целесообразно. Другой способ улучшения прочностных свойств карбамидных поропластов – химическая модификация карбамидных смол на стадии синтеза с целью увеличения прочности отвержденной смолы. Однако применение известных, специально синтезированных для производства униполимера-Т карбамидных смол приводит к незначительному увеличению прочности (до 0,03 МПа).

На наш взгляд, наиболее рациональным путем улучшения механических свойств карбамидных поропластов является применение принципов физической модификации полимерной основы, в частности, за счет введения наполнителя [16].

Определение свободного формальдегида в атмосферном воздухе, утеплителе и грунте было проведено в течение 28 дней, начиная с момента получения быстротвердеющего поропласта и нанесения его на утепляемый грунт. В первые восемь дней определение содержания формальдегида велось ежедневно (с перерывом в один день), затем – на 10, 12, 17, 24, 27-е сутки с момента получения утеплителя.

Одновременно с определением формальдегида находили влажность БТП и грунта (на глубинах 0–20 мм, 90–110мм, 190–210 мм) и объемную массу БТП.

Для определения объемной массы БТП из теплоизоляционного слоя на экспериментальном участке вырезали образцы в виде куба с размером грани 50 мм, высушивали их до воздушно-сухого состояния и взвешивали на лабораторных весах. Объемную массу находили как отношение массы образца к его объему.

Для нахождения влажности БТП ее образцы тех же размеров взвешивали на технических весах, высушивали в сушильном шкафу при температуре не более +40°C в течение 2 ч. и повторно взвешивали (до достижения постоянного веса). Влажность (весовую, %) вычисляли делением градиента веса образца на его вес в воздушно-сухом состоянии.

Объемную массу грунта определяли следующим образом: на грунте вырезали параллелепипед размером 70×80×30мм, взвешивали его на лабораторных весах и делением веса грунта на занимаемый объем находили объемную массу грунта.

Влажность грунта (весовую, %) определяли как отношение разности весов образца грунта до и после высушивания к весу образца после высушивания. Высушивание грунта производилось в сушильном шкафу при температуре +105 °С до достижения постоянного веса образца.

Определение содержания формальдегида в атмосферном воздухе проводили колориметрическим методом с применением хромотроповой кислоты в соответствии с известной методикой [55]. Сущность метода состоит в том, что формальдегид реагирует в сильноокислой среде с хромотроповой кислотой, образуя соединение, окрашенное в фиолетовый цвет, удобное для колориметрического определения.

Чувствительность метода 0,3 мг/м<sup>3</sup>. Исследуемый атмосферный воздух с помощью аспиратора (воздуходувки) протягивался через 2 поглотительных прибора, содержащих по 5 мл дистиллированной воды. При наличии ветра отверстие поглотительного прибора направлялось в сторону, противоположную направлению ветра.

Скорость отбора воздуха аспиратором регулировалась поплавковым ротаметром и составляла 0,33 л/мин, продолжительность одного отбора – 15 мин.

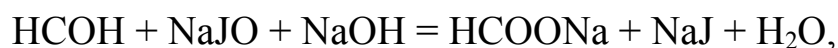
Отбор проб воздуха производили 1 раз в сутки над серединой каждого из трех экспериментальных участков. Высота, с которой осуществлялся отбор проб воздуха, составляла 1,5 м от поверхности утеплителя. Одновременно производился контрольный отбор атмосферного воздуха в месте, значительно удаленном от экспериментальных участков.

Во время отбора проб атмосферного воздуха фиксировали атмосферное давление и температуру окружающего воздуха.

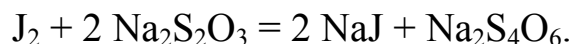
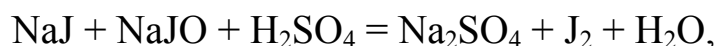
Содержание формальдегида определяли визуальным сравнением окраски исследуемого раствора со стандартной шкалой.

Определение содержания свободного формальдегида в БТП проводили йодометрическим методом. Для сравнения использовали колориметрический метод с применением хромотроповой кислоты. Оба метода показали хорошую сходимость результатов.

Йодометрический метод основан на количественном окислении формальдегида в муравьиную кислоту йодом в щелочной среде с последующим титрованием избытка йода серноватистокислым натрием. Реакции протекают по следующим уравнениям:







При проведении анализов по содержанию формальдегида йодометрическим методом применяли следующие реактивы и посуду: вода дистиллированная; 0,1 н. раствор йода; 0,1 н. раствор тиосульфата натрия; 0,1 н. раствор серной кислоты; 0,1 н. раствор едкого натрия; 0,5 % раствор крахмала; стакан химический емкостью 300 мл; палочка стеклянная; воронка стеклянная для фильтрования; мерные колбы емкостью 1 л; бюретки емкостью 25 и 50 мл; пипетки емкостью 100 мл; колбы конические для титрования емкостью 500 мл; колбы плоскодонные емкостью 1,5 л.

Водную вытяжку формальдегида из БТП готовили следующим образом: предварительно отмеряли в мерной колбе 1 л дистиллированной воды. Образец БТП размером 50×50×50 мм сразу же после взятия с экспериментального участка помещали в стакан емкостью 300 мл, тщательно растирали при помощи стеклянной палочки в небольшом объеме дистиллированной воды (части от объема 1 л) до однородной кашицы. Переносили размельченную БТП в плоскодонную колбу емкостью 1,5 л, добавляли оставшуюся в мерной колбе дистиллированную воду, плотно закрывали колбу пробкой и для полной экстракции формальдегида водой интенсивно встряхивали колбу с содержимым в течение 10 мин. После этого водную вытяжку из БТП отфильтровали через бумажный складчатый фильтр «черная лента». Аликвотную часть фильтрата (100 мл) с помощью пипетки переносили в коническую колбу для титрования, добавляли 40 мл 1 % раствора едкого натрия, 25 мл 0,1 % раствора йода, тщательно перемешивали и оставляли стоять в темном месте на 20 мин. Затем добавляли 55 мл 1 н. раствора серной кислоты и через 20 мин оттитровывали избыток йода в присутствии крахмала 0,1 н. раствором тиосульфата натрия до обесцвечивания титруемого раствора. Параллельно проводили контрольный (холостой) опыт. Все определения осуществлялись при комнатной температуре.

Содержание свободного формальдегида анализировали по четырем образцам.

Содержание свободного формальдегида в БТП (г/дм<sup>3</sup>) определяли по формуле

$$G = \frac{(a - b) \cdot 0,0015 \cdot 1000 \cdot 1000}{V_T \cdot V_{II}}, \quad (45)$$

где  $a$ ,  $b$  – количества т 0,1 % раствора тиосульфата натрия, затраченные на титрование контрольной и анализируемой проб, мл; 0,0015 – количество формальдегида, соответствующее 1 мл точно 0,1 н. раствора тиосульфата натрия;  $V_T$  – аликвотная часть фильтрата, взятая для титрования, мл;  $V_n$  – объем образца пены, см<sup>3</sup>.

Определение содержания свободного формальдегида в грунте, утепленном БТП, проводили по 3 образцам, отобраным на различных глубинах: 0–2 мм, 90–110 мм и 190–210 мм. Приготовление водной вытяжки с использованием 60 г утепленного грунта, отвешенного на технических весах, помещали в плоскодонную колбу емкостью 500 мл и заливали 250 мл дистиллированной воды (отношение воздушно-сухой почвы и воды 1:5). Колбу закрывали пробкой и содержимое ее взбалтывали в течение 3 мин. Водную вытяжку фильтровали через складчатый фильтр «синяя лента».

Далее определение свободного формальдегида в водной вытяжке грунта проводили йодометрическим методом.

Содержание формальдегида в утепленном грунте (мг/см<sup>3</sup>) определяли по формуле:

$$G = \frac{(a - b) \cdot 0,0015 \cdot 1000 \cdot 250 \cdot 1,54}{V_T \cdot N}, \quad (46)$$

где  $a$ ,  $b$  – количества 0,1 % раствора тиосульфата натрия, затраченные на титрование контрольной и анализируемой проб, мл; 0,0015 – количество формальдегида, соответствующее 1 мл 0,1 % раствора тиосульфата натрия, г;  $V_T$  – объем фильтрата, взятый для титрования, мл;  $N$  – навеска грунта, г; 1,54 – объемный вес грунта, г/см<sup>3</sup>.

Исследования по определению свободного формальдегида в утепленном грунте после и нанесения карбамидного поропласта проводились в два периода на опытных участках одинаковой площади, на грунтах одинакового гранулометрического состава.

Предварительно проводились замеры содержания формальдегида в грунте выделенных участков до нанесения быстротвердеющего поропласта. С учетом требуемой точности измерений на стадии планирования эксперимента было определено количество опытных участков, достоверность экспериментальных данных обеспечена исследованием пяти участков в каждый из периодов исследования. Для исключения взаимного влияния фоновой содержащей пробные площадки отведены поперек векторов «розы ветров».

Исследования содержания формальдегида в атмосферном воздухе и грунте проводились на пяти участках покрытых БТП каждый площадью  $10\text{ м}^2$ . Отбор проб атмосферного воздуха осуществлялся с высоты 1,5 м над поверхностью БТП, примерно с середины участков, т. е. в рабочей зоне. Отбор проб грунта с целью определения содержания формальдегида проводился с каждого из участков в пяти точках методом конверта [54, 55]. На предварительной стадии был определен гранулометрический состав на опытных участках, так как грунт имеет глинистую основу, то необходимое количество в каждой пробе ненарушенной структуры принято  $500\text{ см}^3$ .

Карбамидный поропласт для утепления грунта вносился в первый период исследования на пяти участках с 3 по 13 сентября 2005 г. (среднесуточная температура воздуха в этот период составил  $+14^\circ\text{C}$ ), во втором периоде с 10 по 30 октября 2005 г. – на полигоне «Буровая СФУ» п. Кубеково. Среднесуточная температура во втором периоде составила  $-3^\circ\text{C}$ , в ночное время наблюдалось выпадение снега, но как в первом, так и во втором периодах устойчивый покров снега отсутствовал. Объемная масса быстротвердеющего поропласта (БТП) на первом участке была равна в среднем  $27\text{ кг/м}^3$ , на втором –  $8,5\text{--}9\text{ кг/м}^3$ . Влажность БТП на первом участке колебалась в пределах  $160\text{--}550\%$  вес., на втором  $100\text{--}350\%$  вес. Содержание свободного формальдегида в БТП на участках сразу после изготовления БТП резко различались. На первом участке оно было равно  $2,9\text{ г/дм}^3$ , на втором –  $0,71\text{ г/дм}^3$ . На участках первого и второго периода исследования со временем происходило значительное уменьшение содержания формальдегида в БТП. Наиболее интенсивное уменьшение содержания формальдегида в БТП происходило в первые дни после нанесения ее на грунт. Так, например, через сутки содержание свободного формальдегида на первом участке уменьшилось до  $1,72\text{ г/дм}^3$ , т. е. на  $41\%$ , на втором – до  $0,44\text{ г/дм}^3$ , т. е. на  $38\%$ . Через двое суток оно уменьшилось соответственно до  $1,5$  и  $0,38\text{ г/дм}^3$  ( $48$  и  $46\%$ ). На пятые сутки – до  $1,27$  и  $0,33\text{ г/дм}^3$  ( $56\%$  и  $53\%$ ) и т. д.

В конце наблюдений на первом участке (через 10 сут.) содержание формальдегида уменьшилось до  $0,45\text{ г/дм}^3$ , а на втором (через 20 сут) – до  $0,06\text{ г/дм}^3$ .

Как видно из приведенных данных, уменьшение содержания свободного формальдегида в БТП на первом участке (начальное содержание формальдегида –  $2,9\text{ г/дм}^3$ ) происходило более интенсивно, чем на втором (начальное содержание формальдегида в БТП –

0,71 г/дм<sup>3</sup>). Очевидно, чем больше концентрация свободного формальдегида в БТП, тем более интенсивно происходит его выделение из БТП.

Различие между первым и вторым участками состояло в том, что БТП, как было сказано выше, имела неодинаковую объемную массу. При изготовлении БТП различной объемной массы в ней меняется содержание свободного формальдегида. Так, при объемной массе БТП, равной 27 кг/м<sup>3</sup>, содержание формальдегида в БТП (на 10-е сутки после приготовления) составляло 0,7–1,13 г/дм<sup>3</sup> при объемной массе 8,5 кг – 0,12–0,17 г/дм<sup>3</sup>, и при объемной массе, равной 4,4–4,6 кг/м<sup>3</sup>, содержание свободного формальдегида составляло 0,072–0,096 г/дм<sup>3</sup>.

Таким образом, нами была выявлена качественная зависимость содержания свободного формальдегида в БТП от ее объемной массы – чем меньше объемная масса БТП, тем ниже концентрация в ней свободного формальдегида.

Установлено, что концентрация свободного формальдегида в БТП с течением времени уменьшается вследствие миграции его в атмосферу и утепленный грунт.

Температура окружающего воздуха во время отбора проб колебалась в пределах от +16 до –7,5°С. Атмосферное давление равнялось 700–750 мм рт. ст. Среднесуточная влажность воздуха (абсолютная) составляла величину 2–7 г/м<sup>3</sup>.

Динамика выделения формальдегида, относящегося к летучим химическим веществам, в атмосферный воздух из БТП на участке размером 10×10 м определялась точечными пробами почвы пробоотборником (рис. 47).

После отбора грунт рассыпают на бумаге или кальке и разминают пестиком крупные комки. Затем выбирают включения – корни растений, насекомые, камни, стекло, уголь, кости животных а также новообразования – друзы гипса, известковые журавчики и др, после чего почва помещалась во флаконы или стеклянные банки с притертыми пробками, заполняя их полностью до пробки (рис. 48).

Концентрация формальдегида в атмосферном воздухе над участком сразу после нанесения БТП на грунт составляла 0,9 мг/м<sup>3</sup>. Со временем происходило резкое уменьшение содержания формальдегида. Наиболее значительное уменьшение концентрации формальдегида в атмосферном воздухе происходило в первые дни после нанесения БТП на грунт. Так, через сутки концентрация формальдегида в воздухе снизилась до 0,5 мг/м<sup>3</sup>, т. е. на 44 %, на вторые сутки –

до  $0,35 \text{ мг/м}^3$  (61 %), на пятые – до  $0,16 \text{ мг/м}^3$  (82 %). К концу срока наблюдений (через 24 дня) содержание формальдегида в атмосферном воздухе уменьшилось практически до 0.



Рис. 47. Отбор почвы на экспериментальных участках грунтоотборником в первый период исследования



Рис. 48. Отбор включений от пробы грунта перед фасовкой

Исходя из проведенных исследований содержания формальдегида в атмосферном воздухе рабочей зоны при утеплении грунта БТП (размер участка 10×10 м), можно сказать, что уже на вторые сутки после изготовления БТП концентрация формальдегида в воздухе становится ниже ПДК для рабочей зоны, равной 0,5 мг/м<sup>3</sup> [52, 56].

Попытки определить зависимость концентрации формальдегида в воздухе от площади покрытых БТП участков успеха не принесли. Экспериментальные участки равных размеров были расположены близко друг к другу, очевидно, произошло наложение результатов, в связи с чем фактор масштабности выяснить не представилось возможным.

Свободный формальдегид, содержащийся в БТП, при ее нанесении в небольшом количестве попадает на утепленный грунт. Проведенные исследования по определению концентрации свободного формальдегида в утепляемом грунте дают основание говорить, что при утеплении БТП (объемная масса 8,5–9 кг/м<sup>3</sup>) суглинистых грунтов формальдегид содержится лишь в верхних слоях грунта и вглубь утепляемой поверхности не проникают. На глубинах 100 и 200 мм формальдегид в утепляемом грунте обнаружен не был.

Содержание свободного формальдегида на поверхности утепляемого грунта в течение всего срока наблюдений находилось примерно на одном и том же уровне и колебалось в пределах 0,12–0,60 мг/см<sup>3</sup> грунта.

Необходимо заметить, что с уменьшением объемной массы БТП и снижением концентрации свободного формальдегида в ней происходит уменьшение количества формальдегида, попадающего из БТП в грунт.

Так на участке, где объемная масса БТП составляла 27 мг/м<sup>3</sup>, содержание свободного формальдегида в поверхностном слое утепленного грунта равнялось 2–9 мг/см<sup>3</sup>, на участке с объемной массой БТП, равной 8,5–9 кг/м<sup>3</sup>, – 0,12–0,60 мг/см<sup>3</sup>.

Поступающий в водную среду формальдегид, выделяемый из полимерного сорбента, включается в круговорот веществ и подвергается биодegradации. Формальдегид вступает во все реакции, характерные для алифатических альдегидов, в водных растворах формальдегид находится в гидратированной форме. В аэробных условиях при +20°C разложение продолжается около 30 ч, в анаэробных – примерно 48 ч. Биодegradация в водной среде обусловлена окислением и действием бактерий рода *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Mycobacterium*, *Zanthomonas*.

Формальдегид и продукты его распада в воде оказывают на гидробионты прямое токсическое и косвенное воздействие. Также фор-



мальдегид обладает аллергенным, мутагенным, сенсibiliзирующим, и канцерогенным действием любых для живых организмов.

Косвенное действие формальдегида выражается в ухудшении физических свойства воды, газового и солевого режимов водоемов. Формальдегид в водной среде подвергается окислению, соответственно вызывает дефицит кислорода, что приводит к гипоксии рыбы и изменяет химический состав воды.

При концентрации  $0,24 \text{ мг/дм}^3$  формальдегида в воде ткани рыб приобретают неприятный запах [58]. Пороговая концентрация, не влияющая на санитарный режим водоемов и сапрофитную микрофлору, составляет  $5 \text{ мг/дм}^3$ ; максимальная концентрация, не вызывающая при постоянном воздействии в течение сколь угодно длительного времени нарушение биохимических процессов, составляет  $5 \text{ мг/дм}^3$ . ПДК<sub>в</sub> –  $0,05 \text{ мг/дм}^3$  (лимитирующий показатель вредности – санитарно-токсикологический), ПДК<sub>вр</sub> –  $0,25 \text{ мг/дм}^3$  (лимитирующий показатель вредности – токсикологический) [58, 59].

При  $10 \text{ мг/дм}^3$  формальдегид оказывает токсическое действие на рыб наиболее чувствительных видов, к ним относят лососевых, радужную и ручьевую форель (гибель при концентрации  $30 \text{ мг/л}$ ), судака, окуня. Карповые виды рыб относят к слабочувствительным видам, летальные концентрации формальдегида для карпа при экспозиции 24–48 ч составляют  $50\text{--}80 \text{ мг/л}$ . Остальные рыбы занимают промежуточное между ними положение [59].

Процесс интоксикации рыб начинается с патогенного действия формальдегида в местах проникновения в организм – дистрофические и некробиотические изменения тканей в местах контакта, (жабры, кожа и слизистые оболочки). После проникновения наблюдается рефлекторная реакция со стороны нервной системы.

В дальнейшем после попадания в кровь формальдегид, соединяясь с белками, нарушает физико-химические процессы в плазме и клеточных элементах. В результате у рыб нарушается газообмен, накапливается избыток двуокиси углерода (гиперкапния), возникает гипоксия и наступает гибель от удушья.

Формальдегид относят к резорбтивным нервно-паралитическим ядам, он вызывает изменения функции нервной системы, проявляющиеся угнетением или возбуждением рыбы, судорогами и параличами, расстройством координации плавания, потерей равновесия.

При отравлении формальдегидом в ходе патологоанатомического исследования отмечают потемнение кожного покрова, на поверх-

ности которого наблюдается коагуляция слизи, отечные, набухшие жабры. В ходе микроскопического исследования регистрируются дистрофия и распад респираторного эпителия. При хроническом отравлении преобладают дегенеративно-некробиотические изменения в эпителии мочевых канальцев почек, печеночных клетках и нейронах головного мозга [59].

Детоксикация формальдегида в организме рыб наиболее эффективно проходит в печени и ретикулоэндотелиальной системе. Однако у рыб в связи с адсорбцией химических веществ жабрами и кожей они вначале минуют печеночный барьер. Этим объясняется более высокая чувствительность рыб к формальдегиду и любым другим токсикантам по сравнению с наземными животными.

Из организма рыб формальдегид и его метаболиты выделяются через жабры, почки, кожу, кишечник и печень. Если количество выделенного или обезвреженного формальдегида меньше поступившего за тот же промежуток времени, создаются условия для его кумуляции.

Поскольку загрязненные природные воды имеют сложный, иногда многокомпонентный химический состав, то необходимо учитывать их комбинированное действие на гидробионтов, которое проявляется в виде синергизма (усиления токсичности смеси компонентов), антагонизма (снижения токсичности смеси компонентов) и суммированного (аддитивного) действия.

По данным ряда авторов [56, 59, 60], большинство токсических веществ оказывают на рыб суммированное действие. Для характеристики совместного эффекта смесей токсикантов ими был предложен коэффициент аддитивности. Установлено, что степень комбинированного действия зависит от вида токсиканта, его доли в смеси, длительности воздействия, показателей состава воды. На токсичность существенно влияют: температура, газовый состав, жесткость, рН, а также скорость течения воды, играющая важную роль в разбавлении и сносе формальдегида и активность солнечной инсоляции, ускоряющей детоксикацию рыб.

Неблагоприятные условия среды, голод, скученность рыб, поражение паразитами и другие факторы снижают их устойчивость к токсикантам. Кроме того, даже незначительное загрязнение водоемов снижает резистентность рыб к возбудителям инфекционных и инвазионных болезней и является одной из косвенных причин, вызывающих гибель рыб.

Формальдегид из грунта вымывается в результате движения грунтовых и поверхностных природных вод. С природными водами



формальдегид достигнет поверхностных водоемов (рек, озер, водохранилищ), при значительной концентрации в почве и достаточной скорости движения к водоему, он будет загрязнять последний.

Следует иметь в виду, что содержащийся в грунте формальдегид вымывается фильтрующейся водой не весь сразу, а постепенно. Об этом свидетельствуют исследования по определению формальдегида в грунте после снятия утепляющего слоя поропласта.

В лабораторных условиях формальдегид из навески грунта 46–70 г вымывается в течение 6 и более суток. При этом содержание формальдегида в отфильтрованной воде составляло 0,0113 г/л. Для расчетов можно принять эту величину за концентрацию формальдегида в фильтрующейся через грунт воде.

По наблюдениям гидрометслужбы за 1985–2010 гг. максимальное количество осадков, выпадающих летом за сутки, составляет 96 мм. Эта величина, принимается для расчета, так как является наихудшим вариантом, способствующим максимальному внесению формальдегида в почву участков, расположенных на границе с разрабатываемым.

Экспериментально установлено, что в течение первых суток после выпадения осадков первая порция инфильтрационных вод составляет 20–30 % объема осадков. Принятое нами предположение о том, что эта первая порция полностью достигнет уровня грунтовых вод и загрязнит их, является также наихудшим условием. Количество инфильтровавшейся воды составит:

$$Q = 96 \cdot 0,3 = 28,8 \text{ мм.}$$

В горизонтальном сечении площадью 1 м<sup>2</sup> объем инфильтровавшейся воды равен:

$$Q_1 = 0,288 \text{ дм} \cdot 100 \text{ дм}^2 = 28,8 \text{ л,}$$

а концентрация формальдегида в ней, как сказано выше, равна 11,3 мг/л. Общее количество формальдегида в отфильтровавшейся воде

$$G = 28,8 \cdot 11,3 = 325,5 \text{ мг.}$$

В дальнейших расчетах исходим из предпосылок, характерных для условий Восточной Сибири:

- мощность водоносного горизонта 3,5 и 10,0 м;

- коэффициент фильтрации пород водоносного горизонта 1,5 и 10,0 м в сутки.
- просочившиеся осадки повышают уровень грунтовых вод. Повышение уровня грунтовых вод определяется по формуле

$$\Delta H = \frac{W \Delta t}{\mu},$$

где  $\Delta H$  – повышение уровня грунтовых вод, м;  $W$  – инфильтрация, м;  $\Delta t$  – период инфильтрации, сут;  $\mu$  – недостаток насыщения.

Из вышесказанного следует, что период инфильтрации составляет одни сутки, а инфильтрация ( $Q$ ) составляет 0,0288 м. Значение недостатка насыщения приняты для супесчаных и песчаных грунтов, когда наблюдается усиленная инфильтрация, являющаяся также наилучшим случаем для проводимых расчетов, при этом значения недостатка насыщения  $\mu = 0,1$  и  $\mu = 0,25$ . В результате расчета выявилось, что повышение уровня грунтовых вод составит соответственно 0,25 и 0,1 м. Тогда мощность водоносных горизонтов после инфильтрации равна соответственно 3,25; 5,25; 10,25 и 3,1; 5,1; 10,1 м.

Как сказано выше, на столб площадью 1 м<sup>2</sup> (в горизонтальном сечении) попадает 28,8 л загрязненной воды (или 325,4 мг формальдегида) в первые сутки. В упрощенном случае попавшая на этот столб загрязненная инфильтровавшаяся вода будет двигаться к водоему со скоростью, равной скорости движения грунтовой воды в упомянутом столбе. При этом будет происходить перемешивание загрязненной инфильтровавшейся воды с грунтовой водой в силу собственного ей турбулентного характера движения. Расстояние от отвала утепленного грунта до водоема, равное не менее 100 м, загрязненный фронт пройдет за 10–100 сут (при коэффициенте фильтрации 1,10 м/сут). За это время число перемешиваний составит не менее 10. Вследствие этого загрязненная инфильтрационная вода сравнительно равномерно распределится в грунтовой воде, попадающей в водоем. Отсюда концентрация формальдегида в грунтовой воде при мощности водоносного горизонта в 3 м и превышении уровня грунтовых вод в 0,1 м составит:

$$K_{ст} = \frac{325,4}{3 \cdot 100} = 0,105 \text{ мг/л};$$

при превышении уровня грунтовых вод в 0,25 м:

$$K_{\text{ст}} = \frac{325,4}{3 \cdot 250} = 0,1 \text{ мг/л.}$$

С увеличением мощности водоносного горизонта уменьшается концентрация формальдегида в грунтовой воде, изливающейся в водоем. Так, при мощности водоносного горизонта в 5 м она составляет 0,06 мг/л, а при 10 м – 0,03 мг/л.

При принятых нами предпосылках максимальная концентрация формальдегида в грунтовой воде, изливающейся в водоем, составляет 0,105 мг/л, что почти в 2 раза превышает ПДК для водоемов (0,05 мг/л). Однако следует отметить, что эта максимальная концентрация в грунтовой воде до разгрузки ее в водоеме может снизиться до ПДК и ниже, так как на снижение уровня загрязнения помимо разбавления влияют:

- сорбционная и поглощающая способность грунтов зоны аэрации и водоносного горизонта;
- поглочительные и удерживающие свойства пластовых экранов в местах разгрузки потоков грунтовых вод.

В наихудшем случае можно игнорировать 2 последние предпосылки, тогда необходимо определить максимальное расстояние в водоеме, где концентрация формальдегида снизится до ПДК. Это расстояние рассчитывали, используя формулу С.Н. Черкинского [60] по определению содержания вредных примесей в загрязненной воде, исходя из условия смешения ее в водоеме.

Допустимое содержание формальдегида в грунтовой воде рассчитывается по формуле [60]:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta Q}{q} \cdot (K_{\text{пд}} - K_{\text{п}}) + K_{\text{пд}}, \text{ мг/л,} \quad (47)$$

где  $K_{\text{ст}}$  – допустимая в сточных (в нашем случае грунтовых) водах концентрация вещества, угрожающего ухудшением санитарно-токсикологических свойств воды водоема;  $K_{\text{пд}}$  – предельно-допустимая концентрация вещества, мг/л;  $K_{\text{п}}$  – возможная концентрация аналогичного вещества в воде водоема в месте предполагаемого выпуска сточных вод, мг/л;  $\frac{\Delta Q}{q}$  – степень возможного разбавления

сточных вод до ближайшего пункта водопользования с учетом местных условий;  $Q, q$  – соответственно расходы воды в водоеме и сточных вод, поступающих в водоем,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $a$  – коэффициент смещения, определяющий долю расчетного расхода водоема, которая участвует в разбавлении сточных вод, определяется по методу В. А. Фролова–И. Д. Родзиллера [60]:

$$a = \frac{1 - \beta}{1 + \frac{Q}{q}\beta}, \quad (48)$$

$$\beta = \frac{1}{2,72\alpha^3\sqrt{L_\phi}}, \quad (49)$$

где  $L_\phi$  – расстояние от места выпуска сточных вод до места водопользования по форватеру реки, м. В нашем случае это расстояние, где происходит снижение концентрации формальдегида в водоеме ПДК;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий гидравлические факторы смешения,

$$\alpha = \xi\varphi^3\sqrt{\frac{E}{q}}, \quad (50)$$

где  $\xi$  – коэффициент, зависящий от места выпуска стока в реку, при выпуске у берега реки он равен 1;  $\varphi$  – коэффициент извилистости реки,

$$\varphi = \frac{L_\phi}{L_{\text{пр}}}. \quad (51)$$

Здесь  $L_{\text{пр}}$  – расстояние от места выпуска сточных вод до места водопользования по прямой, м. На небольшом участке реки  $L_\phi = L_{\text{пр}}$ , отсюда  $\varphi = 1$ ;  $E$  – коэффициент турбулентной диффузии, для равнинных рек определяется по формуле В. М. Маккавеева [60]:

$$E = \frac{gH_{\text{ср}}\vartheta_{\text{ср}}}{2mc}, \quad (52)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $H_{\text{ср}}$  – средняя глубина реки, м;  $v_{\text{ср}}$  – средняя скорость течения на участке смешения, м/с;  $m$  – коэффициент Буссинского, для воды  $m = 22,3$ ;  $c$  – коэффициент Шези,

$$c = \frac{1}{n} \sqrt[n]{H_{\text{cp}}}, \quad (53)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости по М. Ф. Срибному.

После подстановки уравнений (47), (48), (50), (51) и (52) в уравнение (49) и ряда преобразований получаем

$$L_{\phi} = \frac{q \sqrt[n]{H_{\text{cp}}}}{0,22 H_{\text{cp}} \vartheta_{\text{cp}}} \left( \ln \frac{K_{\text{ст}}}{K_{\text{пд}} \left( 1 + \frac{q}{Q} \right) - \frac{q}{Q} K_{\text{ст}}} \right)^3, \text{ м.}$$

При расчете определяли расход загрязненной грунтовой воды. Расход грунтовой воды определяли по известной формуле:

$$q = K_{\phi} H i B, \text{ м}^3 / \text{сут},$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации, м/сут;  $H$  – мощность водоносного горизонта, м;  $i$  – уклон;  $B$  – ширина потока, м.

Для расчета был принят максимальный расход грунтовой воды при максимальном загрязнении, которое наблюдается при  $H + \Delta H = 3,1$  м. Такой расход будет в том случае если  $K_{\phi} = 10$  м/сут и  $i = 0,1$  (по принятым нами предпосылкам). Для определения ширины потока нами был принят отвал площадью 1 га, тогда  $B = 100$  м,

$$q = 10 \cdot 3,1 \cdot 0,1 \cdot 100 = 310 \text{ м}^3 / \text{сут}$$

или

$$q = 0,0036 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Остальные параметры определяются по принятому водоему. При расчете в качестве водоема нужно было принять малую реку, так как при малом расходе воды в водоеме будут также наихудшие условия и малые реки наиболее представительны для северной части Восточной Сибири. Зададимся среднестатистическими данными малых северных рек, приняв в качестве аналога реки Эвенкийского муниципального района – Котокор и Бугарикта. По гидрологическому ежегоднику поток этих рек составляет  $Q = 6,14 \text{ м}^3 / \text{с}$ , скорость потока  $v_{\text{cp}} = 0,6 \text{ м/с}$ ,

усредненное значение глубины русла  $H_{cp} = 0,43$  м. По характеристике ее русла  $n = 0,04$ . Отсюда

$$L_{\Phi} = \frac{0,0036\sqrt[6]{0,43}}{0,22 \cdot 0,43 \cdot 0,6 \cdot 0,04} \left( \ln \frac{0,105}{0,05 \left( 1 + \frac{0,0036}{6,14} \right) - \frac{0,0036}{6,14} 0,105} \right)^3 = 1,02 \text{ м,}$$

т. е. практически концентрация формальдегида в речном водоеме снизится до ПДК на расстоянии 1 м от места попадания сточных вод с формальдегидом, присутствующим в утепляющем поропласте.

Следовательно, водоемы не будут загрязняться формальдегидом из утепляющего поропласта после его нанесения, так как максимальные осадки, выпадающие на территории Восточной Сибири, не превышают водоудерживающую способность быстротвердеющих поропластов. Возможно загрязнение водоема формальдегидом после вымывания его атмосферными осадками, фильтрующимися через грунт, и попадания вместе с грунтовыми водами в водоем.

Проведенные нами расчеты показали, что при нанесении быстротвердеющего поропласта на грунт с целью его утепления не ближе 100 м от водоема концентрация формальдегида в грунтовой воде в месте спуска ее в водоем равняется 0,1 мг/л. Далее в реке концентрация формальдегида успевает снизиться до предельно допустимой концентрации (0,05 мг/л) на расстоянии всего 1 м от места выпуска грунтовых вод, т. е. практически сразу же после попадания их в водоем.

Следовательно, применение быстротвердеющего поропласта для предохранения грунтов от сезонного промерзания не будет загрязнять окружающую среду и оказывать на нее вредное влияние. Завершая рассмотрение жизненного цикла карбамидных поропластов после использования их для предохранения грунта от промерзания, следует отметить возможность его использования в качестве теплоизолятора в строительных конструкциях.

Наиболее приемлемая область для вторичного применения поропласта – сельское хозяйство. Это объясняется тем, что карбамидный поропласт обладает рядом ценных специфических свойств, делающих ее незаменимым материалом для улучшения структуры почвы. Капиллярное строение открытоячейистой структуры карбамидного поропласта способствует направленному всасыванию воды. Эти свойства

предопределяют возможность использования карбамидных поропластов для повышения влагоудержания и укрепления песчаных и супесчаных почв, структурирования и дренажа болотистых почв [46].

Имеющаяся в карбамидном поропласте вода полностью доступна растениям, в капиллярах поропласта много воздуха, это позволяет регулировать не только водный, но и газовый режимы почвы. Поропласт защищает влагу от внешнего нагрева и сильного испарения, он не задерживает рост корней [46, 63].

Карбамидный поропласт при разложении благоприятно действует на почву, обогащая ее азотом. Карбамидный поропласт имеет паспорт пожарной безопасности и сертификат соответствия, что подтверждает безопасность его применения для утепления грунтов различного гранулометрического состава от сезонного промерзания

### 13. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КАРБАМИДНЫХ ПОРОПЛАСТОВ ДЛЯ УТЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ

Экономический эффект от применения новой технологии подготовки грунта состоит в снижении потребности в финансовых ресурсах, сокращении длительности производственного цикла стадии землеустроительных работ, освоении нефтегазовых месторождений и рекультивации нарушенных земель с возможностью прогнозирования времени сохранения грунта в талом состоянии для каждого из расчетных зимних месяцев разработки. Эффект от снижения потребности в оборотных средствах рассматривается как дополнительная прибыль от размещения свободных денежных средств на депозитах. Кроме того, предприятие может использовать высвободившиеся денежные средства для своего дальнейшего развития, участия в различных инвестиционных проектах. При расчете эксплуатационных затрат учтены затраты на материалы, используемые в технологическом процессе, затраты на энергоносители, затраты на смазочные материалы, затраты на гидравлическую жидкость, затраты на материалы для технического обслуживания и текущего ремонта, затраты на замену быстроизнашивающихся частей, затраты на перебазировку, затраты на капитальный ремонт, амортизационные отчисления.

Расчет затрат от использования карбамидной пены-утеплителя для подготовительных работ по экскавации грунта был выполнен применительно к экскаваторам на гусеничном ходу 4-й и 5-й размерных групп – экскаваторы типа ЭО 4121, ЭО 5122 произведен с учетом переменных и постоянных издержек, связанных с эксплуатацией экскаватора [12, 67]:

$$C_{\text{экс}} = C_{\text{пер}} + C_{\text{пост}}, \quad (54)$$

где  $C_{\text{пер}}$  – переменные расходы, м<sup>3</sup>/руб,  $C_{\text{пост}}$  – постоянные расходы, м<sup>3</sup>/руб.

Затраты определяются исходя из расчета на 1 м<sup>3</sup> выемки грунта. Годовая программа для предприятия условно принимается 15 000 м<sup>3</sup>.

Эксплуатационные затраты на экскаватор 4-й размерной группы определяются по отдельным статьям калькуляции с учетом амортизационных отчислений и капитального ремонта по формуле:



$$\sum C_{\text{пер}} = C_{\text{оп}} + C_{\text{зр}} + C_{\text{зт}} + C_{\text{м}} + C_{\text{э}} + C_{\text{см}} + C_{\text{гж}} + C_{\text{мп}} + C_{\text{ич}} + C_{\text{пб}} + C_{\text{кр}} + C_{\text{ам}}, \quad (55)$$

где  $C_{\text{оп}}$ ,  $C_{\text{зр}}$ ,  $C_{\text{зт}}$  – заработная плата операторов техники; рабочих, выполняющих операции технологического процесса вручную; ремонтных рабочих, выполняющих техническое обслуживание и текущий ремонт машины, руб.;  $C_{\text{м}}$  – затраты на материалы, используемые в технологическом процессе, руб.;  $C_{\text{э}}$  – затраты на энергоносители, руб.;  $C_{\text{см}}$  – затраты на смазочные материалы, руб.;  $C_{\text{гж}}$  – затраты на гидравлическую жидкость, руб.;  $C_{\text{мп}}$  – затраты на материалы для технического обслуживания и текущего ремонта, руб.;  $C_{\text{ич}}$  – затраты на замену быстроизнашивающихся частей, руб.;  $C_{\text{пб}}$  – затраты на перебазирования, руб.;  $C_{\text{кр}}$  – затраты на капитальный ремонт, руб.;  $C_{\text{ам}}$  – амортизационные отчисления, руб.

Заработная плата машинистов экскаватора рассчитывается по формуле

$$C_{\text{оп}} = K_{\text{р}} \cdot T_{\text{г}} \sum_{i=1}^n C_{\text{Т}_i}, \quad (56)$$

где  $K_{\text{р}}$  – коэффициент, учитывающий все виды доплат к заработной плате и начисления (в том числе районные коэффициенты, доплаты за работу во 2-ю и 3-ю смены);  $T_{\text{г}}$  – количество машино-часов работы машины в году, маш-ч;  $C_{\text{Т}_i}$  – часовая тарифная ставка рабочего  $i$ -го разряда, соответствующая действующим ставкам, например, на основе отраслевого тарифного соглашения, руб.

Заработная плата рабочих, выполняющих технологические операции вручную, определяются методами технического нормирования с учетом действующих тарифных ставок и рассчитывается по формуле

$$C_{\text{зр}} = Z_{\text{р}} \cdot K_{\text{р}} \cdot B, \quad (57)$$

где  $Z_{\text{р}}$  – расценка за выполнение ручных операций, руб.;  $B$  – годовой объем ручных работ, ед. прод.

Затраты на заработную плату ремонтных рабочих рассчитываются следующим образом:

$$C_{\text{зр}} = C_{\text{ср}} \cdot K_{\text{р}} \cdot T_{\text{р}} \cdot \tau_{\text{уд}}, \quad (58)$$

где  $C_{cp}$  – средняя тарифная ставка работ по ремонту машин, руб.;  $\tau_{уд}$  – удельная трудоемкость технического обслуживания и текущего ремонта, чел-ч/ м<sup>3</sup> (значения  $\tau_{уд}$  могут быть приняты по данным табл. 25 [66]).

Таблица 25

### Нормативные и расчетные коэффициенты

Машина	Индекс	$\tau_{уд}$
Экскаватор 4-й размерной группы	Э4	0,302
Экскаватор 5-й размерной группы	Э5	0,364

Затраты на материалы, используемые в технологическом процессе, определяются по формуле

$$C_M = B \cdot \sum P_{mj} \cdot w_{mj}, \quad (59)$$

где  $P_{mj}$  – цена 1 кг.  $j$ -го материала, руб.;  $w_{mj}$  – удельный расход материала, кг/ м<sup>3</sup>.

Затраты на энергоносители для двигателей внутреннего сгорания рассчитываются по формуле

$$C_э = P_T \cdot w_T \cdot T_T, \quad (60)$$

где  $P_T$  – цена 1 кг. топлива, руб.;  $w_T$  – часовой расход топлива, кг.

При этом часовой расход топлива определяется формулой:

$$w_T = 1,03 \cdot 10^{-3} N_{ен} \cdot g_{ен} \cdot K_N \cdot K_{дв} \cdot K_{дм}, \quad (61)$$

где  $N_{ен}$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  $g_{ен}$  – удельный расход топлива при номинальной мощности, г/(кВт · ч);  $K_N$  – коэффициент, учитывающий изменение расхода топлива в зависимости от степени использования двигателя по мощности;  $K_{дв}$  – коэффициент использования двигателя по времени;  $K_{дм}$  – коэффициент использования двигателя по мощности.

Значения  $K_N$  могут быть приняты с использованием табл. 26.

Значения коэффициентов  $K_{дв}$  и  $K_{дм}$  для экскаваторов 5 и 4 размерной группы приняты соответственно 0,9 и 0,5 с использованием данных [66].

## Значения поправочных коэффициентов

$N_{ен}$	$g_{ен}$	Значение $K_N$ при соответствующих значениях $K_{дм}$								
		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,66	0,7	0,8	0,9
Тракторные дизели										
40	185	1,19	1,14	1,09	1,06	1,025	1,0	0,97	0,94	0,93
80	185	1,28	1,215	1,16	1,12	1,09	1,07	1,05	1,015	0,99
100	175	1,26	1,20	1,14	1,11	1,08	1,07	1,05	1,03	1,02
180	175	–	–	–	–	1,06	1,01	0,97	0,92	0,85
250	160	1,21	1,17	1,12	1,11	1,09	1,07	1,06	1,04	1,03
330	170	1,39	1,24	1,21	1,16	1,09	1,07	1,0	0,97	0,96
370	165	1,25	1,22	1,16	1,13	1,12	1,07	1,06	1,02	1,01

Затраты на смазочные материалы для техники с приводом от двигателей внутреннего сгорания рассчитываются по формуле:

$$C_{см} = K_{сг} \cdot C_{э}, \quad (62)$$

где  $K_{сг}$  – коэффициент перехода от годовых затрат на топливо к затратам на смазочные материалы ( $K_{сг} = 0,19–0,22$ ).

Затраты на гидравлическую жидкость рассчитываются по формуле

$$C_{гж} = V_{г} \cdot q_{м} \cdot P_{гж} \cdot k_{д} \left( \frac{T_{г}}{T_{м}} \right), \quad (63)$$

где  $V_{г}$  – емкость гидросистемы, дм<sup>3</sup>;  $q_{м}$  – объемная масса гидравлической жидкости, кг/дм<sup>3</sup>;  $P_{гж}$  – цена 1 кг. гидравлической жидкости, руб.;  $k_{д}$  – коэффициент доливок ( $k_{д} = 1,5$ );  $T_{м}$  – периодичность замены гидравлической жидкости, маш-ч.

Затраты на материалы для технического обслуживания и текущего ремонта определяются по нормативам пропорционально первоначальной стоимости (цене) машины, отнесенные к 1 м<sup>3</sup> разрабатываемого грунта:

$$C_{м} = P_0 \cdot \left( \frac{H_p}{100} \right), \quad (64)$$

где  $P_0$  – первоначальная цена машины, руб.;  $H_p$  – норма годовых затрат на все виды технического обслуживания и ремонта, %.

Затраты на замену быстроизнашивающихся узлов и деталей рассчитываются по отношению к  $1 \text{ м}^3$  разрабатываемого грунта по формуле

$$C_{\text{ич}} = \left( \frac{T_{\Gamma}}{T_{\text{сл}j}} \right) \sum_{i=1}^m P_j \cdot n_j, \quad (65)$$

где  $T$  – количество видов быстроизнашивающихся узлов и деталей;  $P_j$  – цена 1 шт. быстроизнашивающейся  $j$ -й части, руб.;  $n_j$  – количество одновременно заменяемых быстроизнашивающихся  $j$ -х частей, шт;  $T_{\text{сл}j}$  – нормативный срок службы быстроизнашивающихся  $j$ -х частей, маш-ч.

Затраты на перебазировки экскаватора определяются различными методами в зависимости от способа перемещения с объекта на объект и рассчитываются по отношению к  $1 \text{ м}^3$  разрабатываемого грунта по формуле

$$C_{\text{пб}} = P_{\text{пб}} \cdot n_{\text{пб}}, \quad (66)$$

где  $P_{\text{пб}}$  – затраты (цена) на одну перебазировку, руб.;  $n_{\text{пб}}$  – число перебазировок в течение года;

а) при перемещении экскаватора своим ходом затраты на одну перебазировку рассчитываются следующим образом:

$$P_{\text{пб}} = (C_{\text{оп}} + C_{\text{э}} + C_{\text{см}}) \cdot \left( \frac{T_{\text{пб}}}{T_{\Gamma}} \right), \quad (67)$$

где  $T_{\text{пб}}$  – продолжительность одной перебазировки, маш-ч;

б) при перемещении техники без разборки (или с частичной разборкой) на трейлере затраты на перебазировки можно рассчитать так:

$$P_{\text{пб}} = \left( C_{\text{тр}} + \left( \frac{C_{\text{оп}}}{T_{\Gamma}} \right) + C_{\text{тж}} T_{\text{пр}} \right) \cdot T_{\text{пр}}, \quad (68)$$

где  $C_{\text{тр}}$  – часовой тариф использования трейлера, руб.;  $C_{\text{тж}}$  – ставка заработной платы такелажников, руб.;  $T_{\text{пр}}$  – время погрузки-разгрузки машины, ч.

Затраты на капитальный ремонт в расчете на  $1 \text{ м}^3$  (год) могут быть определены по формулам

$$\text{а) } C_{\text{кр}} = \left( P_{\text{кр}} \cdot \left( T_{\text{г}} \cdot \frac{k_{\text{ч}}}{T_{\text{мп}}} \right) \right); \quad (69)$$

$$\text{б) } C_{\text{кр}} = \left( K_{\text{р}} \cdot C_{\text{зт}} \cdot \tau_{\text{кр}} + C_{\text{зчк}} \right) \cdot \left( T_{\text{г}} \cdot \frac{k_{\text{ч}}}{T_{\text{р}}} \right), \quad (70)$$

где  $P_{\text{кр}}$  – затраты на капитальный ремонт, руб.;  $k_{\text{ч}}$  – коэффициент перехода от мото-часов к машино-часам;  $T_{\text{мп}}$  – ресурс до капитального ремонта, мото-час;  $\tau_{\text{кр}}$  – трудоемкость капитального ремонта, чел-ч;  $C_{\text{зчк}}$  – расход запасных частей на один капитальный ремонт, руб.

Расход запасных частей на один капитальный ремонт, отнесенный к 1 м<sup>3</sup> разрабатываемого грунта, можно приближенно рассчитать по формуле

$$C_{\text{зчк}} = H_{\text{зчк}} \cdot P_0, \quad (71)$$

где  $H_{\text{зчк}}$  – доля затрат на запасные части от первоначальной цены машины.

Значения  $\tau_{\text{кр}}$  и  $H_{\text{зчк}}$  для экскаваторов представлены в табл. 27 [65].

Таблица 27

#### Трудоемкость капитального ремонта и доля затрат на запасные части

Показатель	Индекс машины	
	Э4	Э5
$\tau_{\text{кр}}$ , чел-ч	1300	2000
$H_{\text{зчк}}$	0,344	0,362

Кроме указанных выше затрат, связанных непосредственно с производством услуг при эксплуатации экскаватора на 1 м<sup>3</sup>, в смету затрат входят прочие затраты общехозяйственного характера, например затраты, связанные с хранением, транспортировкой карбамидного пенопласта.

В фактические издержки предприятия при составлении отчетной калькуляции, кроме перечисленных, включаются также потери от брака, потери от простоев по внутрипроизводственным причинам, выплаты работникам, увольняемым с предприятия в связи с его реорганизацией, сокращением численности работников [66].

Все эти прочие расходы носят внепроизводственный общекорпоративный характер, поэтому должны относиться на себестоимость единицы продукции, работ или на затраты на эксплуатацию единицы техники косвенным путем.

Кроме указанных ранее затрат  $C_{пер}$ , приведенных в табл. 28, дополнительно учитываются и постоянные затраты, например, косвенные затраты на заработную плату административно-управленческого, вспомогательного и обслуживающего персонала, косвенные материальные издержки (общепроизводственного и непроизводственного характера), а также прочие косвенные расходы (на маркетинговые исследования, на подготовку производства новых видов услуг, на рекламу и т. п.), суммарные производственно-хозяйственные расходы, относимые на эксплуатационные затраты экскаватора и др. Принимаем постоянные затраты в размере 248,6 руб/м<sup>3</sup> (усредненное значение для северных территорий).

Таблица 28

#### Затраты на эксплуатацию машины

Показатели, руб/м <sup>3</sup>	Показатели, руб./м <sup>3</sup>						
	$C_{оп}$	$C_{зт}$	$C_э$	$C_{см}$	$C_{гж}$	$C_{мр}$	$C_{пб}$
	116,28	215,62	666,64	146,62	139,72	100,52	98,30
Итого $C_{пер}$	1483,70						

Суммарные эксплуатационные затраты в расчете на 1 м<sup>3</sup> выемки грунта экскаватором рассчитываются по формуле (55):

$$C_{эксп} = C_{пер} + C_{пост}, \quad (72)$$

$$\sum C_m^3 = 1\,483,7 + 248,6 = 1\,732,3 \text{ руб/м}^3.$$

Расчетный тариф на экскавацию 1 м<sup>3</sup> грунта составляет:

$$T = C_{эксп} R = 1\,732,3 \cdot 1,2 = 2\,078,76 \text{ руб/м}^3,$$

где  $R$  – уровень рентабельности.

Ниже приведены два способа укрупненного расчета дополнительных затрат на экскавацию (базовый и проектный варианты).

*Первый способ.* Использование традиционного способа круглосуточного разогрева с применением угля (базовый вариант).

Исходные данные расчета: годовой объем производства работ – 15 тыс. м<sup>3</sup>, условия работы – северные территории Западной и Восточной Сибири с сезонно-мерзлым грунтом. За расчетную единицу применяется площадь разогрева грунта площадью 10 м<sup>2</sup> глубиной 2 м, время на транспортировку угля – 2 ч; тариф на груженный и порожний пробег транспортного средства принимается в одинаковом размере и составляет 280 руб.; цена 1 т бурого угля – 760 руб.; расход угля для разогрева грунта площадью на 10 м<sup>2</sup> – 1,8 т.

Расчет затрат на разогрев мерзлого грунта:

- транспортировка угля:

$$C_{\text{тр}} = 280 \cdot 2 = 560 \text{ руб.};$$

- стоимость уголь, используемого для разогрева поверхностного слоя грунта:

$$C_{\text{уг}} = 760 \cdot 1,8 = 1368 \text{ руб.};$$

- стоимость производства работ: разбрасывание угля на площади 10 м<sup>2</sup>, дежурство рабочего в течение шести суток (в период разогрева), т. е. 144 ч, часовая тарифная ставка – 17 руб. (по укрупненным данным предприятия).

- прочие затраты принимаем в размере 20 % от общих затрат.

$$C_{\text{раз}} = 17 \cdot 144 \cdot 1,2 = 2937,6 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты на разогрев грунта для экскавации с применением угля

$$C_1 = 560 + 1368 + 2937,6 = 4865,6 \text{ руб.}$$

*Второй способ.* Подготовка почвы для экскавации методом утепление карбамидным пенопластом

Исходные данные:

- цена карбамидной пены 1 м<sup>3</sup> – 330 руб. (по данным предприятия-изготовителя),
- расходы пены на утепление площади 5 м<sup>2</sup> – 1 м<sup>3</sup> карбамидного поропласта;
- расходы на транспортировку пены определяются аналогично первому способу, но с учетом расходов на нанесение (укладку) пены принимаются 670 руб.

Расчет затрат на утепление сезонно-мерзлого грунта включает расчет затрат на карбамидный поропласт для утепления грунта площадью  $10 \text{ м}^2$ :

$$C_{\text{пены}} = 330 \cdot 2 = 660 \text{ руб.};$$

Расчет расходов в условиях производства с подготовительными работами по утеплению грунта с использованием карбамидного пенопласта:

$$C_2 = 670 + 660 = 1330 \text{ руб.}$$

Затраты на экскавацию грунта в базовом и проектном вариантах одинаковые и составляют  $1\,732,3$  руб., так как эксплуатационные затраты на экскавацию грунта с использованием экскаваторов 4-й или 5-й размерной группы, одинаковые, то они в расчетах не учитываются.

Дополнительные затраты на разогрев грунта по базовому и проектному вариантам составляют:

базовый вариант  $C_1 = 6944,36$  руб.;

проектный вариант  $C_2 = 3408,76$  руб.

Экономия от использования проектного варианта производства работ составляет:

$$\mathcal{E}_{10\text{м}^2} = 6944,36 - 3408,76 = 3535,6 \text{ руб.}$$

Учитывая, что объем экскавации мерзлого грунта на площади  $10 \text{ м}^2$  составляет  $20 \text{ м}^3$ , экономия на  $1 \text{ м}^3$  составляет:

$$\mathcal{E}_{1\text{м}^3} = 3535,6/20 = 176,78 \text{ руб.}$$

Принятый годовой объем производства работ (по данным ОАО «Мехдорстрой» г. Якутск)  $15$  тыс.  $\text{м}^3$ . Экономия от снижения затрат в проектном варианте в пересчете на годовой объем производства работ составит:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 176,78 \cdot 15000 = 2\,651\,000 \text{ руб.}$$

Таким образом, использование метода подготовки грунта к экскавации с применением карбамидного пенопласта дает возможность предприятию получить годовой эффект при производстве работ по экскавации мерзлого грунта в размере  $2\,651\,000$  (два миллиона шестисот пятьдесят одну тысячу) руб.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Более 80 % территории нашей страны занимают сезонно-мерзлые и вечномерзлые грунты. Большой объем разработки мерзлых грунтов осуществляется механическим методом как непосредственно при прокладке траншей, так и рыхлении путем нарезания щелей с последующей выемкой блоков одноковшовыми экскаваторами.

Для разработки мерзлых грунтов применяются машины, реализующие различные методы разрушения. При этом мерзлый грунт продолжает оставаться средой, до конца не раскрывшей свои свойства, меняющей их в зависимости от множества условий.

Характеристики мерзлого грунта различны по глубине залегания слоев и существенно изменяют прочностные характеристики в зависимости от его типа, влажности, размеров включений. Обобщение экспериментально полученных данных позволило получить уравнения аппроксимации расчетного распределения температуры грунта.

Выполнение земляных работ в районах Сибири и Севера с продолжительностью зимнего периода семь и более месяцев осложняется не только высокой прочностью мерзлых грунтов и их абразивностью, но и наличием большого количества гравийно-галечниковых включений. Наличие гравийно-галечниковых включений в среде вмещающего мерзлого грунта вызывает дополнительные затраты мощности, требует специальных способов ведения работ, совершенствования и создания новых машин и рабочих органов, способных эффективно разрабатывать высокопрочный мерзлый грунт, как однородный, так и содержащий гравийно-галечниковые включения.

Повышение эффективности разработки сезонно-мерзлых грунтов может идти путем повышения энергоемкости землеройных машин – экстенсивный метод – и путем понижения прочности грунтов методом предварительной подготовки. В монографии рассмотрен второй метод.

Для подготовки грунта к зимним условиям разработки применяются множество методов, в монографии уделено внимание использованию карбамидного поропласта, приведены его эксплуатационные характеристики и результаты исследования поропласта модифицированного вакуумно-термическим методом и добавками органического происхождения.

Также в монографии особое внимание отводилось экологическому аспекту применения поропласта с примером расчета концентрации формальдегида в утепленном грунте и сточных водах, влиянию его на гидробионты.

Дальнейшее совершенствование методов разработки мерзлых грунтов на северных территориях страны может быть связано и с совместной разработкой новых технологий применения композиционных поропластов, и с развитием теории построения рабочих органов, приводов землеройно-транспортных машин для разработки утепленных грунтов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Родин, И. И. Основы проектирования многоковшовых экскаваторов непрерывного действия / И. И. Родин, Л. К. Соколов. – Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 1987. – 224 с.

2. Васильев, С. И. Повышение эффективности разработки сезонно-мерзлых грунтов / С. И. Васильев // Вестн. Том. гос. архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 1. – С. 194–200.

3. Филиппов, Г. С. Комбинированный способ подготовки сырьевых материалов к зимней разработке/ Г. С. Филиппов, В. М. Мелкозеров, А. И. Заика // Цемент. – 1985. – № 7 – С. 9–10.

4. Показатели эффективности разработки мерзлых грунтов рабочими органами землеройных машин / С. И. Васильев, С. П. Ереско, Б. В. Осипенко, В. Л. Шустов // Горные машины и автоматика. – 2003. – № 10. – С. 22–26.

5. Малышев, А. А. Земляное полотно автомобильных дорог в условиях Севера / А. А. Малышев. – М. : Транспорт, 1974. – 285 с.

6. СНиП 2.05.02-85 Автомобильные дороги. Нормы проектирования. Главтехнормирование Госстроя СССР. – М., 1985. – 45 с.

7. Зеленин, А. Н. Машины для земляных работ : учеб. пособие для вузов / А. Н. Зеленин, В. И. Баловнев, И. П. Керов. – М. : Машиностроение, 1975. – 424 с.

8. Васильев, С. И. Обоснование критерия оценки эффективности разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами / С. И. Васильев, В. Г. Жубрин; ЦНИИТЭСтроймаш. – М., 1986. – Деп. 4. 07. 1986, № 12СД.

9. Емелин, В. И. Использование землеройных машин по времени в условиях Севера / В. И. Емелин // Комплексная механизация и автоматизация производственных процессов в строительстве инженерных сооружений : сб. науч. тр. – Л., 1976. – С. 59–65.

10. Зеленин, А. Н. Лабораторный практикум по резанию грунтов / А. Н. Зеленин, Л. В. Красильников. – М. : Высш. шк., 1969. – 310 с.

11. Чеченков, М. С. Разработка прочных грунтов / М. С. Чеченков. – Л. : Стройиздат, 1987. – 230 с.

12. Васильев, С. И. Экономическое обоснование подготовки сезонно-мерзлых грунтов с применением порошковых // Проблемы социально-экономического развития Сибири / Л. Н. Родикова, Е. В. Франк, А. С. Ортман, С. И. Васильев. – Братск, 2012. – № 2(8) С. 18–23.

13. Гордиенко, А. А. Из опыта сооружения земляного полотна в зимних условиях / А. А. Гордиенко, Г. П. Бредин. – Транспортное строительство. – 1969. – № 10. – С. 5–7.

14. Временные технические условия на производство земляных работ на Кольском полуострове / Краснояр. Промстройниипроект. – Красноярск, 1973. – 54 с.

15. Прогрессивные методы разработки мерзлых грунтов. М. : Транспорт. – 1969, 52 с. с илл.

16. Васильев, С. И. Свойства карбамидных поропластов с древесными наполнителями для утепления сезонно-мерзлых грунтов / С. И. Васильев, В. М. Мелкозеров / С. И. Васильев, А. Я. Вельп // Науч. журнал СФУ. Сер. Техника и технологии. – 2011. – № 4 (4). – С. 380–388.

17. Мелкозеров, В. М. Исследование эксплуатационных характеристик модифицированных многоцелевых карбамидных поропластов / В. М. Мелкозеров, С. И. Васильев, А. Я. Вельп // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 8. – С. 34–39.

18. Эффективный способ защиты от промерзания глин в карьерах / А. В. Киселев, А. И. Заика, В. М. Мелкозеров, А. Б. Гентош // Цемент. – № 8. – С. 4–5.

19. Васильев, С. И. Экспериментальные и теоретические исследования свойств пеноутеплителя для предохранения грунта от промерзания в условиях Сибири / С. И. Васильев, В. М. Мелкозеров., А. С. Орман // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 3 (6). – С. 154–161.

20. Гинзбург, П. Г. Быстротвердеющие пены в гидротехническом строительстве / П. Г. Гинзбург, А. И. Пехович, С. М. Алейников // Гидротехническое строительство. – 1965. – № 4. – С. 27–30.

21. Морозов, Г. А. Из опыта применения на строительстве Красноярской ГЭС быстротвердеющей пены как утеплителя / Г. А. Морозов: сб. науч. работ / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, Сиб. филиал. – М.–Л. : Энергия. – 1966. – С. 79–92 с илл.

22. Морозов, Г. А. Натурные исследования эффективности работы теплоизоляционного покрытия из быстротвердеющей пены при утеплении грунтов / Г. А. Морозов // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 71. Температурно-влажностный режим плотин из местных материалов в суровых климатических условиях. – Л., 1972, С. 57–60.

23. Ведяев, Ю. М. Прогноз сезонного промерзания пород при искусственной теплоизоляции / Ю. М. Ведяев, В. Г. Пятаков, Н. В. Петрович // Колыма, Магадан. – 1969. – № 1. – С. 15–16.

24. Ткачевский, И. Д. Покрытие из быстротвердеющего пенопласта при предохранении грунта от промерзания / И. Д. Ткачевский, Г. С. Филиппов, В. М. Рябов // Транспортное строительство. – 1973. – № 9. – С. 5–7.

25. Пеноизоляция – материал для защиты грунтов и бетонов от промерзания / С. А. Дружинин, В. Н. Лебедев, В. А. Малков, В. М. Чешков // Строительство на вечномёрзлых грунтах: материалы VI совещания-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях. Т. II, вып. 2. – Красноярск, 1970. – С. 50–53.

26. Защита грунтов от промерзания пеноизоляцией / Л. М. Людалун, Б. М. Шатханов, Б. Л. Коркин, С. А. Дружинин, В. Н. Лебедев, А. П. Петрикова, В. Н. Феклистов // Промышленное строительство. – 1972. – № 11. – С. 5–6.

27. Дружинин, С. А. Пена защищает от морозов / С. А. Дружинин, К. Б. Канн, В. Н. Феклистов // Наука и жизнь. – 1973. – № 7 – С. 21–23.

28. Глушкова, Н. И. Термический режим буртов при наличии и отсутствии теплоизоляционного покрытия / Н. И. Глушкова, Г. А. Морозов // Труды координационного совещания по гидротехнике. Вып. 71. Температурно-влажностный режим плотин и местных материалов в суровых климатических условиях. – Л., 1972. – С. 67–70.

29. Филиппов, Г. С. Зимнее утепление грунта / Г. С. Филиппов // На стройках России, 1974. – № 9. – С. 56–57.

30. Воробьев, В. А. Полимерные теплоизоляционные материалы / В. А. Воробьев, Р. А. Андрианов. – М.: Стройиздат, 1972. – 320 с.

31. Николаев, А. Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе / А. Ф. Николаев. – М.–Л.: Химия, 1966. – 768 с.

32. Андреев, Г. К. Строительные свойства заливочного пенопласта ФРП / Г. К. Андреев, Ю. Д. Дудина, В. А. Назаров // Строительные материалы. – 1968. – № 7. – С. 29–30.

33. Заливочный теплоизоляционный материал на основе гранул пенополистирола / Г. С. Коган, Д. М. Цуранов, В. Н. Кудинова, Л. Н. Провинтеева // Строительные материалы. – 1969. – № 1.

34. Ноздрин, С. И. Применение заливочных и напыляемых масс в качестве изоляции в мясной и молочной промышленности / С. И. Ноздрин, А. М. Тертычный. – М., 1972. – 16 с.

35. Волгин, В. Д. Непрерывный процесс производства заливочной мочевино-формальдегидной пены, ее свойства и применение / С. В. Василенко // Пластические массы. – 1968. – № 9. – С. 30–32.

36. Солодихин, И. И. Оборудование для производства пенопластов на месте применения / И. И. Солодихин, А. П. Руфель // Химия и технология вспененных пластмасс. – Владимир, 1970.
37. Косырева, З. С. Зарубежный опыт производства и применения пенопластов в строительстве (обзор) / З. С. Косырева, Н. Е. Яхонтова, В. Л. Векслер. – М., 1967. – 85 с. с илл.
38. Рекомендации по устройству теплоизоляции пенопластами бесчердачных покрытий и чердачных покрытий жилых и общественных зданий. – Л., 1974. – 89 с.
39. Экономическая эффективность утепления сезонно-мерзлых грунтов карбамидными поропластами для разработки рабочими органами строительно-дорожных машин / С. И. Васильев, Л. Н. Родикова // Интерстроймех-2011: материалы междунар. науч.-техн. конференции. – Могилев, 2011. – С. 322–328.
40. Поропласты композиционные ТУ 2254-001-02067876-2009 / С. И. Васильев, В. М. Мелкозеров, А. Я. Вельп (введ. с 28.12.2009); СФУ. – Красноярск, 2009.
41. Лукьянов, В. С. Расчет глубины промерзания грунтов / В. С. Лукьянов, М. Д. Головки // Труды ЦНИИС. Вып. 23. – М. : Трансжелдориздат, 1957.
42. Иванов, Н. С. Элементы теории теплопроводности геофизических систем / Н. С. Иванов, П. И. Филиппов. – Якутск : ЯГУ, 1983, 115 с. ил. 20
43. Иванов, Н. С. Тепло и массоперенос в мерзлых горных породах / Н. С. Иванов. – М. : Наука, 1969. – 240 с.
44. Лыков, А. В. Теория тепло и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1969. – 535 с.
45. Филиппов, Г. С. Предохранение грунта от промерзания / Г. С. Филиппов. – Красноярск : Стройиздат, 1991. – 112 с.
46. Бауман, Х. Пластопоника. Пенопласты в сельском хозяйстве / Х. Бауман. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 67 с. с илл.
47. Пат. 2411267 Российская Федерация РФ, МКИ Композиция для карбамидного пенопласта / С. И. Васильев, В. М. Мелкозеров. – Бюл. № 4. 2011.
48. Керстен, М. С. Тепловые свойства грунта / М. С. Керстен // Мерзлотные явления в грунте. – М., 1955. – С. 200–207.
49. Влияние условий термokatалитической активации древесины осины на состав водорастворимых продуктов / А. А. Ефремов [и др.] // Химия природных соединений. – 1995. – № 6. – С. 20–25

50. Гравитис, Я. А. Теоретические и прикладные аспекты метода взрывного автогидролиза растительной биомассы / Я. А. Гравитис // Химия древесины. – 1987. – № 5. – С. 18–23.

51. Оболенская, А. В. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы / А. В. Оболенская, З. П. Ельницкая, А. А. Леонович. – М. : Экология, 1991. – 319 с.

52. Мелкозеров, В. М. Охрана окружающей среды и рациональное недропользование при разработке, эксплуатации нефтяных месторождений, транспортировке нефти и нефтепродуктов / В. М. Мелкозеров, С. И. Васильев // Lambert academic publishing. – Germany, 2011. – 256 с.

53. Васильев, С. И. Мобильный промышленный комплекс по производству в полевых условиях полимерного теплоизоляционного материала и сорбентов / С. И. Васильев, В. М. Мелкозеров; ЦНТИ, Красноярск, 2008. – 4 с. – (Информ. листок № ИЛ029-077).

54. Васильев, С. И. Способ предохранения грунтов Восточно-Сибирского региона от промерзания с использованием инновационных материалов / С. И. Васильев, В. М. Мелкозеров; ЦНТИ, Красноярск, 2008. – 5 с. – (Информ. листок № ИЛ 029-078).029-077).

55. Сборник санитарно-гигиенических нормативов и методов контроля вредных веществ в объектах окружающей среды. – М., 1991.

56. Васильев, С. И. Побочное влияние карбамидных поропластов на аквабионты при утеплении грунтов Сибири / С. И. Васильев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – № 9 – 2012. – С. 42–47.

57. Берлин, А. А. Упрочненные газонаполненные пластмассы / А. А. Берлин, Ф. А. Шутов. – М. : Химия, 1980. – 22 с.

58. Алабастер, Д. Критерии качества воды для пресноводных рыб / Д. Алабастер, Р. Ллойд. – М. : Легк. и пищ. пром-сть, 1984. – 344 с. (Alabaster J.S., Lloyd R. Water Quality Criteria for Freshwater Fish. FAO and Butterworths. London, 1980).

59. Грищенко, Л. И. Болезни рыб и основы рыбоводства / Л. И. Грищенко, М. Ш. Акбаев, Г. В. Васильков. – М. : Колос, 1999. – 456 с.

60. Черкинский, С. Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы / С. Н. Черкинский. – М. : Изд-во Минкоммунхоза РСФСР, 1962. – 237 с.

61. Тараканов, О. Г. Наполненные пенопласты / О. Г. Тараканов, И. В. Шамов, В. Д. Альперн. – М. : Химия, 1988. – 216 с.

62. Жуков, А. И. Методы очистки производственных сточных вод / А. И. Жуков, И. Л. Монгайт, И. Д. Родзиллер. – М. : Стройиздат 1977. – С. 204.

63. Охрана окружающей среды и рациональное природопользование: справочник / авт.-сост.: М. Г. Мелкозеров, С. И. Васильев и др.; ред. В. М. Мелкозеров. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т; Политех. ин-т, 2007. – 198 с.

64. Тяжелов, Б. П. Земляные работы в зимних условиях / Б. П. Тяжелов, Е. В. Шпинко. – М. : Госстройиздат, 1956. – 165 с.

65. Методические рекомендации по определению сравнительной экономической эффективности новой техники // ред. Г. А. Краюхин и К. М. Великанов. – М. : Знание РСФСР, 1989. – 36 с.

66. Методические указания по комплексной оценке эффективности мероприятий, направленных на ускорение научно-технического процесса. №60/52 / Президиум Академии наук СССР. – М., 1988. – 10 с.

67. Тихонов, А. И. Уравнения математической физики / А. И. Тихонов. – 5-е изд. – М. : Наука. – 740 с.



Научное издание

**Васильев Сергей Иванович  
Анферов Валерий Николаевич  
Мелкозеров Владимир Максимович**

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ГРУНТОВ К РАЗРАБОТКЕ  
В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ПРИ ОСВОЕНИИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ  
ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА**

Монография

Редактор *И. Н. Байкина*  
Компьютерная верстка *О. А. Кравченко*

Подписано в печать 06.09.2012. Печать плоская. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 8,84. Тираж 100 экз. Заказ № 7214

Редакционно-издательский отдел  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
Тел/факс (391)206-21-49, e-mail: rio@lan.krasu.ru

Отпечатано полиграфическим центром  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел/факс (391)206-26-58, 206-26-49  
E-mail: print\_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>