

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ
ПЕНОУТЕПЛИТЕЛЯ ДЛЯ ПРЕДОХРАНЕНИЯ ГРУНТА
ОТ ПРОМЕРЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ**

Представлены результаты исследования пеноутеплителей и методика расчета параметров пеноутеплителя применительно к грунтам Восточной Сибири, обеспечивающая предохранение грунтов от сезонного промерзания. Выполнен сравнительный анализ изменения температурных режимов промерзания грунтов в естественных условиях и в условиях утепления карбамидным пенопластом. Доказано, что гранулометрический состав не влияет на распределение температуры по глубине залегания утепленного грунта; температура зависит только от толщины пеноутеплителя.

Ключевые слова: снежный покров, мерзлый грунт, сезонное промерзание, вспененные полимерные материалы, карбамидный пенопласт, толщина слоя пены утеплителя, градусочасы, коэффициент теплопроводности снежного покрова, термическое сопротивление снежного покрова, температура грунта.

Суровые климатические условия Сибири, характеризующиеся продолжительностью зимнего периода и малой высотой снежного покрова в сочетании с жесткостью климата, 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 и более метров). Приблизительно 25 % от общего объема земляных работ приходится на разработку мерзлых грунтов. Работы промышленного, гражданского и дорожного строительства ведутся не только в летнее, но и в зимнее время. Высокая механическая прочность мерзлых грунтов по сравнению с тальми грунтами приводит к значительному снижению производительности землеройных машин, снижению эксплуатационной надежности и увеличению стоимости разработки грунтов.

Одним из направлений повышения эффективности работы землеройно-транспортных машин в зимний период является подготовка грунта к зимним условиям, заключающаяся в предохранении от промерзания при помощи теплоизоляционных материалов.

Способ утепления грунта от сезонного промерзания теплоизоляционными материалами является простым по технологии и относительно дешевым средством подготовки к зимней разработке [2, 3]. Его преимущества заключаются в следующем:

- покрытие грунта теплоизолятором производится до наступления морозов, что позволяет сохранить запасы тепла, накопленного в течение теплого периода года;
- предохраняемый от промерзания грунт в течение значительного периода времени может оставаться тальм;
- 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 тому 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].

Предохранение грунта от промерзания теплоизоляционными материалами позволяет производить разработку в зимних условиях обычными землеройными машинами. При этом физико-механические характеристики утепленного грунта тождественны летним характеристикам, а производительность землеройных машин близка к уровню летних условий разработки. 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.

Выбор данной технологии имеет большое значение и для строительных организаций. Применяемые сейчас землеройные машины не в состоянии разработать грунт зимой без предварительной подготовки, так как толщина слоя мерзлого грунта превышает допустимую глубину разработки, определяемую технической характеристикой землеройно-транспортных машин. Последняя зависит от типа, влажности, плотности и температуры грунта, а также от вида и мощности землеройного оборудования. Например, роторный траншейный экскаватор ЭТР-162 может разработать слой сезонно-мерзлого однородного грунта толщиной до 0,7 м, а экскаваторы ЭТР-204, ЭТР-223, ЭТР-224 эффективны при разработке грунтов глубиной промерзания до 1,0 м [5].

Анализ технических характеристик траншейных экскаваторов позволяет утверждать, что возможная глубина разработки грунта значительно меньше глубины промерзания грунта [6].

* - автор, с которым следует вести переписку.

Следовательно, для условий Сибири более эффективным является предохранение грунта от промерзания вспененными заливочными полимерными материалами, изготавливаемыми непосредственно на месте утепления грунта и содержащими золу-унос и экстракты коры хвойных деревьев, что существенно снижает содержание формальдегида в утепляемом грунте [9]. Это связано с тем, что вспененные полимерные материалы обладают лучшими теплоизоляционными свойствами, чем традиционные. Теплоизоляционные свойства вспененных полимерных материалов в зимний период практически не меняются, а традиционные утеплители в течение зимы значительно уплотняются, уменьшая этим термическое сопротивление теплоизоляционного слоя и снижая эффект утепления грунта.

Утепляющий полимерный материал в традиционном исполнении имеет и другие существенные эксплуатационные недостатки – высокую горючесть, воспламеняемость, недостаточную прочность, а также большой индекс токсичности – 140-150 %. При этом равномерная концентрация содержания формальдегида $HCHJ$ в рабочей зоне превышает нормы ПДК, что сдерживает его широкое использование. Для снижения токсичности, уменьшения степени горючести и повышения прочности пенопласта разработана и используется композиция карбамидного пенопласта [6].

В карбамидном пенопласте массовая доля свободного формальдегида не превышает 0,15 %. В качестве пенообразователя использованы альфобензосульфаноислота или сульфанол, а в качестве органоминерального модификатора, повышающего прочность, применяется зола-унос, получаемая от углей и содержащая оксиды железа, алюминия, кальция и магния. Введение на стадии изготовления в эмульсионный раствор экстрактов коры хвойных пород, содержащих таннины и полифенолы, понижает токсичность карбамидного пенопласта за счет химического взаимодействия формальдегида с полифенолами.

На наш взгляд, для предохранения грунта от промерзания наиболее подходящим утеплителем является быстротвердеющая пена [6].

Необходимая толщина пены-утеплителя определяется по формуле [7]

$$h = K_y L_u (K_p K_w R_o - R_c), \quad (1)$$

где K_y – коэффициент усадки пены-утеплителя; L_u – коэффициент теплопроводности утеплителя, ккал/м·час·°C; K_p – коэффициент влияния плотности грунта; K_w – коэффициент влияния влажности грунта; R_o – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания, м²·час·°C/ккал; R_c – термическое сопротивление снега, м²·час·°C/ккал.

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 (таблица 1). Исходя из эксплуатационных характеристик парка землеройных машин и допустимых эксплуатационных затрат на разработку грунта в зимних условиях, зададим допустимую глубину сезонного промерзания грунта, равную 1,0 м. Показатели объемной массы грунта и его влажности взяты из паспорта грунтов Красноярского края. В качестве обязательного условия при расчетах примем, что нанесение пены-утеплителя на предохраняемый грунт производится в осенний период года, в условиях отсутствия снега (условный период с 20 сентября по 7 октября), а плотность снежного покрова является величиной постоянной и равна 0,2 т/м³.

Таблица 1
Среднестатистические данные северной зоны
Красноярского края

Название месяца разработки грунта	Среднемесячная температура, °C	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 месяце, а количество фактических градусо-часов отрицательных температур каждого месяца, воздействующих на грунт, установим с учетом среднемесячных температур северной зоны Красноярского края и градусо-часов, накопленных грунтом за предыдущий месяц.

Ноябрь: $9,5 \cdot 720 + 2232 = 9072$ градусо-часов;

Декабрь: $23,1 \cdot 744 + 9072 = 26258,4$ градусо-часов;

Январь: $27,0 \cdot 744 + 26258,4 = 47346,4$ градусо-часов;

Февраль: $25,0 \cdot 672 = 46346,4 = 63146,4$ градусо-часов;

Март: $10,7 \cdot 744 + 63146,4 = 71107,2$ градусо-часов;

Апрель: $8,5 \cdot 720 + 71107,2 = 77227,2$ градусо-часов.

Значения фактических градусо-часов отрицательных температур каждого месяца позволяют определить величины градусо-суток и по графику (рис. 1) – термическое сопротивление мерзлого грунта.

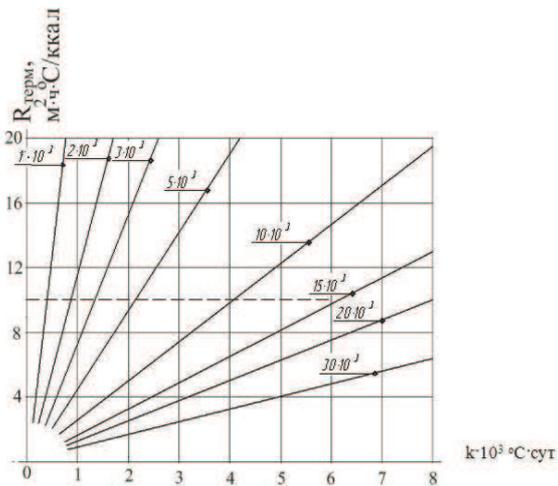


Рис. 1. Зависимость термического сопротивления грунта от индекса промерзания и допустимых тепловых потерь.

Тепловые потери с каждого 1м³ грунта под покрытием пены-утеплителя определяются по формуле [7]:

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

где H – допустимая глубина сезонного промерзания грунта, м;
 G – содержание льда в мерзлом грунте, кг/м³;
 L – удельная теплота плавления льда, ккал/кг;
 t_m – температура мерзлого грунта, °С;
 C – объемная теплоемкость мерзлого грунта, ккал/м³·°С.

При разработке грунта в январе значение термического сопротивления пены-утеплителя равно 1,9 м²·°С/Вт, в феврале – 2,7 м²·°С/ккал, в марте – 3,0 м²·°С/ккал. Принимаем характеристики планируемого к разработке грунта – значение плотности грунта 1700 кг/м³, а значение влажности – 20 %.

Графическое отображение зависимостей коэффициента теплопроводности снежного покрова от температуры и плотности приведено на рис. 2.

Коэффициент влияния объемной плотности (K_p) зависит от типа и гранулометрического состава грунта. Для практических расчетов рекомендуется принимать значение $K_p=1,00$ для грунтов плотностью от 1500 до 1700 кг/м³ и $K_p=0,85$ для грунтов плотностью от 1700 кг/м³ 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 % значение коэффициента равняется 0,71 [7]. Учитывая территориально-климатические особенности северной зоны Красноярского края, принимаем плотность снежного покрова 110кг/м³.

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 °С до -10 °С :

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

для диапазона температур от -10 °С до -20 °С :

$$\alpha_c = 1,9629831 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 4,1298844 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0351067; \quad (3)$$

для диапазона температур от -20 °С до -30 °С :

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

для диапазона температур от -30 °С до -40 °С :

$$\alpha_c = 1,7676153 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 3,8117726 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 0,0337707; \quad (5)$$

для диапазона температур от -40 °С до -50 °С :

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

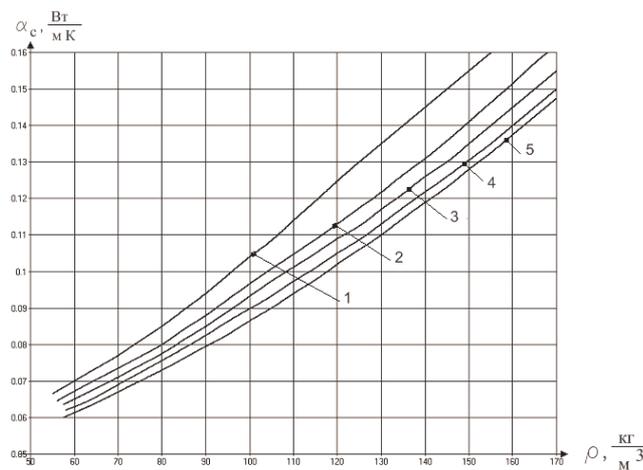


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности снега от плотности при различных отрицательных температурах, 1: от 0 до -10 °С; 2: от -10 до -20 °С; 3: от -20 до -30 °С; 4: от -30 до -40 °С; 5: от -40 до -50 °С.

С учетом значений коэффициентов теплопроводности снежного покрова, полученных по формулам (2-6), усредненное значение термического сопротивления снежного покрова составит:

в январе

$$R_c = \frac{0,18 + 0,22 + 0,32}{3 \cdot 0,105} = 2,286 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}};$$

в феврале

$$R_c = \frac{0,18 + 0,22 + 0,32 + 0,24}{4 \cdot 0,092} = 2,609 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}};$$

в марте

$$R_c = \frac{0,18 + 0,22 + 0,32 + 0,24 + 0,20}{5 \cdot 0,115} = 1,982 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}.$$

С учетом весовой влажности (400 %) пеноутеплителя принимаем значение коэффициента теплопроводности, имеющей кратность 30 объемных единиц, $\alpha_c = 0,097 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. Теплопроводность комбинированного утеплителя грунта, состоящего из слоев пеноутеплителя и снежного покрова, целесообразно определить как их усредненное значение с учетом температур слоя снега (рис. 1) или по уравнениям (2-6).

Толщина слоя пены-утеплителя, способная предотвратить от сезонного промерзания грунт, планируемый к разработке:

– в январе:

$$h = 1,1 \cdot 0,099(0,95 \cdot 0,87 \cdot 0,85 \cdot 5,4 - 2,286) = 0,164 \text{ м};$$

– в феврале:

$$h = 1,1 \cdot 0,104(0,95 \cdot 0,87 \cdot 0,85 \cdot 6,2 - 2,609) = 0,191 \text{ м};$$

– в марте:

$$h = 1,1 \cdot 0,101(0,95 \cdot 0,87 \cdot 0,85 \cdot 6,7 - 1,752) = 0,328 \text{ м}.$$

График функции температуры утепленного грунта по глубине залегания для зимних месяцев года позволяет оценить коэффициент его прочности, по значению которого и определяется эффективность применения траншейного экскаватора при разработке сезонно-мерзлых грунтов [8]. Натурные исследования процесса сезонного промерзания грунтов выявили одинаковый характер зависимости глубины промерзания и температуры всего разнообразия грунтов в средней части утепленной полосы под слоем карбамидного пенопласта и отличие от глубины залегания разрабатываемого утепленного слоя (рис. 3).

Особенностью изменения температуры грунта на глубине от 1,0 м до граничного слоя «пеноутеплитель – грунт» под слоем утепляющего карбамидного пенопласта является понижение температуры в начальный период с последующим повышением температуры за счет теплового потенциала нижних слоев грунта.

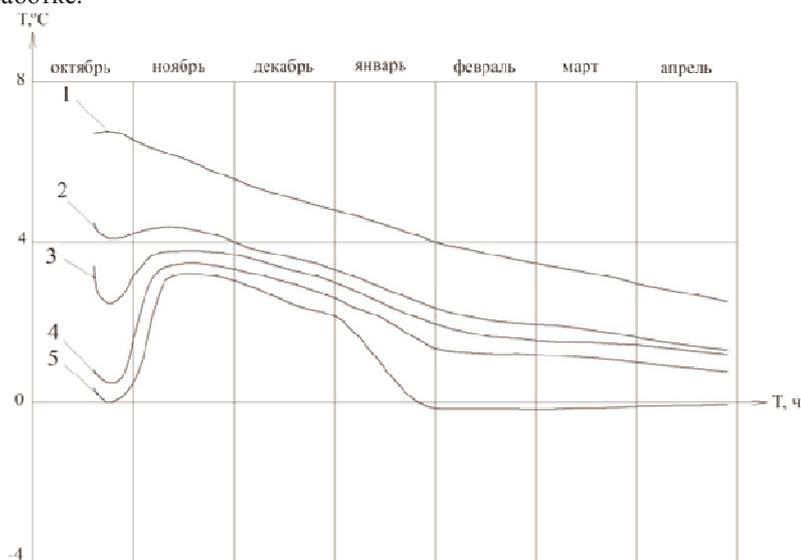


Рис. 3. Изменение температуры грунта от времени промерзания в середине утепленной полосы на различных глубинах: 1 – 2 м; 2 – 1 м; 3 – 0,5 м; 4 – 0,2 м; 5 – температура граничного слоя «пеноутеплитель – грунт».

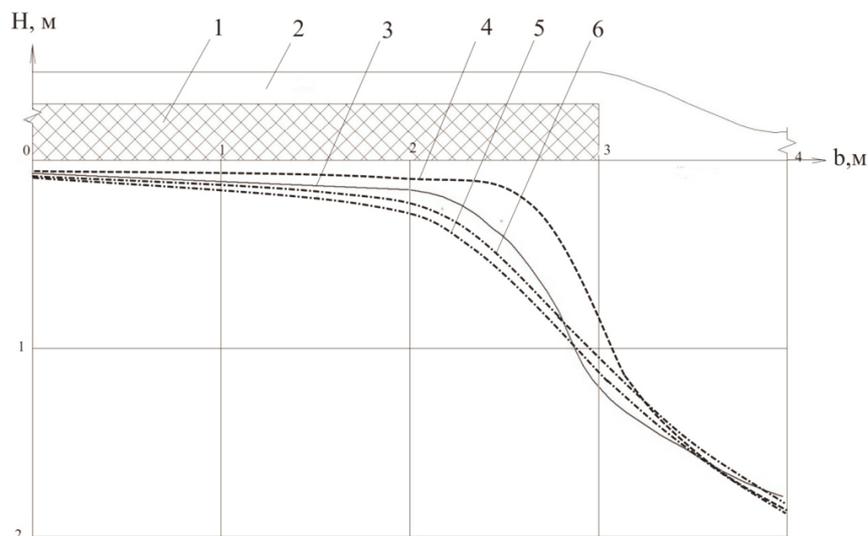


Рис. 4. Изменение глубины сезонного промерзания грунта под теплоизоляционным слоем карбамидного пенопласта с учетом бокового эффекта:

3 – суглинка; 4 – глины; 5 – песка; 6 – супеси.

Градиент повышения температуры составляет $3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, в дальнейшем происходит понижение температуры утепленного слоя под действием температуры окружающего воздуха, значение которой по среднестатистическим данным в ноябре составляет $-9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, в декабре $-23,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в январе достигает $-27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате температура утепленного грунта составляет $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, что идентично состоянию талого грунта. Отмеченная особенность изменения температуры по понятным причинам не свойственна слоям грунта, залегающим на глубине более $1,0\text{ м}$, где функция температуры от времени промерзания является монотонно убывающей, за исключением участка, соответствующего начальному периоду утепления.

Как выявили исследования температурных полей участков грунта [8], утепленных слоем карбамидного пенопласта 1 и снежного покрова 2 (рис. 4), существенное влияние на температуру утепленного грунта оказывает боковой эффект промерзания от влияния фронта отрицательных температур со стороны не утепленных участков.

Вид графической зависимости распределения температуры под утепленным участком грунта при наличии бокового промерзания аппроксимируется экспонентой и позволяет определить величину фронта (b):

– суглинка под слоем утеплителя

$$b=0,1741 \cdot e^{0,580x}, \quad (7)$$

– глины под слоем утеплителя

$$b=0,1645 \cdot e^{0,514x}; \quad (8)$$

– песок под слоем утеплителя

$$b=0,1895 \cdot e^{0,563x}; \quad (9)$$

супесь под слоем утеплителя

$$b=0,1695 \cdot e^{0,570x}. \quad (10)$$

Величина фронта влияния в меньшей мере зависит от гранулометрического состава грунта и от количества гравийно-галечниковых включений

и существенно зависит от естественной влажности грунта и месторасположения утепляемого грунта. Наибольшее влияние выявлено для участков, расположенных на возвышенностях. Применительно к грунту, расположенному на горизонтальных участках, величина проникновения фронта (b) отрицательных температур под утепляемый слой составляет:

для глины влажностью от 18 % до 24,5 % – $0,43\text{ м}$;

для суглинка влажностью от 13 % до 20 % – $0,65\text{ м}$;

для супеси тяжелой мелкой влажностью 13 % – $0,8\text{ м}$;

для песка мелкого влажностью 8 % – $0,93\text{ м}$.

Результаты экспериментальных исследований позволяют задать величину перекрытия утепляемого грунта и определить дополнительную утепляемую площадь покрытия и необходимый объем карбамидного пенопласта, что неизбежно приводит к увеличению стоимости подготовки грунта к разработке.

Нанесение карбамидного пенопласта толщиной $0,328\text{ м}$ в октябре на участок, расположенный в северной зоне Красноярского края и планируемый к разработке в марте, надежно предохраняет от сезонного промерзания на глубину не более $1,0\text{ м}$, что позволяет использовать при разработке мерзлого грунта траншейные экскаваторы.

Выводы.

1. Предложен метод расчета толщины пеноутеплителя для предохранения грунта от промерзания, позволяющий определить не только толщину слоя пеноутеплителя, но и необходимую величину перекрытия утепляемой поверхности.

2. Пороговым значением температуры окружающего воздуха, изменяющим коэффициент

теплопроводности снежного покрова, является температура -10°C , а зависимости коэффициента теплопроводности снежного покрова от плотности надежно описываются уравнениями 2-го порядка.

3. Экспоненциальная зависимость величины проникновения фронта отрицательных температур под утепляемый слой несущественно зависит от гранулометрического состава грунта; основным параметром является влажность грунта.

Литература

1. Гордиенко А.А., Бердюк Г.П. Из опыта сооружения земляного полотна в зимних условиях // Транспортное строительство. 1969. № 10. С. 5-7
2. Дружинин С.А., Чешков В.М. Предохранение грунтов от промерзания при помощи воздушно-водяной пеноизоляции // Колыма. 1969. №1. С. 13-14.
3. Тяжелов Б.П., Шпинко Е.В. Земляные работы в зимних условиях. М.: Госстройиздат, 1956. 165 с.

4. Камышев Л.А., Нетреба Н.Н. Мелиоративные работы в зимнее время. М.: Россельхозиздат, 1974. 120 с.

5. Родин И.И., Соколов Л.К. Основы проектирования многоковшовых экскаваторов непрерывного действия. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1987. 224 с

6. Технические условия. Поропласты композиционные: ТУ 2254-001-02067876-2009 / В.М. Мелкозеров, С.И. Васильев, А.Я. Вельп. (введ. 28.12.2009).

7. Эффективный способ защиты от промерзания глин в карьерах / А.В. Киселев [и др.] // Цемент. 1881. № 8. 1881. С. 4-5.

8. Разработка сезонномерзлых грунтов Восточной Сибири траншейными экскаваторами: монография / С. И. Васильев [и др.]; Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2010. 139 с.

9. Композиция для карбамидного пенопласта: пат. 2411267 Рос. Федерация. № 2009127199; заявл. 14.07.09; опубл. 10.02.11, Бюл. 2011. № 4. 4 с. :ил.

УДК 630*532.5

С.М. Базаров, С.В. Белокобыльский, О.А. Куницкая

К УПЛОТНЕНИЮ МАТЕРИАЛА ДРЕВЕСИНЫ ПУТЕМ ЕГО ПРЕССОВАНИЯ

Построена аналитическая модель уплотнения материала древесины как упругого тела с капиллярно-пористой структурой, заполненной жидкостью; уплотнение определяется вытеканием жидкости, которое носит вязкий и фильтрационный характер.

Ключевые слова: упругость, вязкость, время, напряжение, скорость.

Введение. Перспективным направлением получения материалов с новыми физико-механическими свойствами является пропитка древесины растворами и сплавами полимеров с последующим прессованием, фиксацией формы и сушкой. Проницаемое пространство материала древесины представляет собой сложную капиллярно-пористую структуру, образованную различного рода клетками [1]. Поэтому феноменологическую модель движения жидкости в этой структуре и ее истечение из материала можно представить, как суперпозицию структурированного (капиллярного) и деструктурированного (пористого) течений. При движении жидкости в материале древесины под действием силовых полей силы трения превосходят силы инерции и происходят при малых числах Рейнольдса.

На основании статистической функции распределения капилляров по размерам в древесине $f(r)$ можно определить осредненную структуру

$$r_c^2 N = \int r^2 f(r) dr, \quad N = \int f(r) dr$$

и представить ползущее истечение жидкости из древесины в процессе уплотнения.

Результаты исследования. Основное допущение, принятое при построении математической модели уплотнения материала древесины, пропитанного жидкостью, сводится к тому, что напряжения вызывают упругую деформацию скелета пространственной структуры, а процесс уплотнения обусловлен истечением жидкости в результате ее отжатия, происходящим по закону вязкого течения Ньютона для капилляров и закону фильтрации Дарси для пор.

Упругой составляющей структуры древесины соответствует закон деформации

$$\varepsilon = a \sigma, \quad (1)$$

здесь ε – относительная деформация, параметр $a = E^{-1}$, E – модуль упругости, σ – напряжение.

Течение жидкости в капиллярно-пористой структуре опишем представлением

$$V = -(r_c^2 \delta^{-1} \mu^{-1} n_k + k \gamma^{-1} n_m) (dp/dx), \quad (2)$$

здесь μ – вязкость, k – коэффициент фильтрации, n_k – удельная проницаемость капиллярной струк-