

Ю. А. Горин, А. Н. Чемоданов, С. Я. Алибеков,
А. В. Маряшев, Р. С. Сальманов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННО-БАЛЛАСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

Ключевые слова: композитный теплоизоляционно-балластный материал, физико-механические свойства, подводный теплопровод.

Прогнозирование физико-механических свойств композитных теплоизоляционно-балластных материалов на основе древесных отходов для подводной прокладки теплопроводов.

Keywords: heat-insulation ballast composite, physical and mechanical properties, submarine heat pipelines.

The weather physical and mechanical properties of the heat-insulation ballast composite for submarine heat pipeline.

Введение

Древесина получает все большее распространение в составе различных современных композитных материалов. Применяемые в настоящее время композитные материалы на основе древесины и ее отходов имеют разнообразное назначение: для теплоизоляции [1], для звукоизоляции [2], для строительства [3], для отделочных работ [4], для защиты от рентгеновских излучений [5] и т.д. Среди всего разнообразия древесно-композитных материалов с различными требуемыми свойствами не рассмотрен материал, имеющий теплоизоляционно-балластные свойства. Такой материал необходим для тепловой изоляции и балластировки подводных теплопроводов. К подводной трубопроводной конструкции предъявляется ряд требований. Она должна обладать отрицательной плавучестью, необходимой прочностью и иметь тепловую изоляцию для минимизации потерь транспортируемой тепловой энергии. Цель исследования заключается в комплексном решении этих задач путем получения композитного материала, оптимально удовлетворяющего указанным требованиям. В большинстве композитов (за исключением слоистых) компоненты делятся на матрицу (или связующее) и включенные в неё армирующие элементы (или наполнители). Для изготовления материала, который соответствовал бы указанным требованиям, были использованы портландцемент марки М400, баритовая руда с размером частиц от 0,01 до 160 мкм, древесная стружка с размером частиц от 0,5 до 20 мм и вода. В получаемом материале портландцемент выполняет роль связующего между наполнителями №1 и №2. Баритовая руда имеет высокую плотность $\rho = 4700$ кг/м³, поэтому применена для повышения удельного веса получаемого материала. Древесная стружка, имея коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,09$ Вт/(м*К), придает получаемому материалу высокие теплоизоляционные свойства. Примененные компоненты, следовательно, и весь композитный материал являются экологически чистыми материалами, как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации и утилизации.

Определение плотности композитного материала

В общем случае плотность композитного материала рассчитывается по формуле [6]:

$$\rho_{\text{комп}} = \sum_i \rho_i \frac{v_i}{100} \quad (1)$$

где $\rho_{\text{комп}}$ - плотность композитного материала;

ρ_i - плотность элемента композита;

v_i - объемная доля i-го элемента композита;

Для трехкомпонентного материала (связующее, наполнитель №1 и наполнитель №2) формула (1) имеет вид:

$$\rho_{\text{комп}} = \rho_1 \frac{v_1}{100} + \rho_2 \frac{v_2}{100} + \rho_3 \frac{v_3}{100} \quad (2)$$

где $\rho_{1,2,3}$ - плотность соответственно 1,2,3 компонента;

$v_{1,2,3}$ - объемная доля соответственно 1,2,3 компонента.

При равных долях первого и второго компонентов уравнение (2) относительно объемной доли 3-го компонента имеет вид:

$$v_3 = \frac{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_{\text{комп}}}{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_3} \quad (3)$$

Определение теплопроводности композитного материала

К классическим решениям теории обобщенной проводимости относится уравнение Максвелла, рассчитавшего поле системы, состоящей из изотропной среды, в которую вкраплены посторонние частицы. В полученном композите непрерывная фаза включает в себя вещества порошкообразной фракции: связующее – портландцемент М-400 и наполнитель №1 – концентрат баритовый гравитационный (сульфат бария BaSO₄) с размером частиц от 0,01 до 160 мкм. Древесная стружка с размером частиц от 0,5 до 20 мм является наполнителем №2, образует

диспергированную фазу. С учетом этого расчетная формула имеет вид:

$$\lambda = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2 + 2\lambda_1 - 2v(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 + 2\lambda_1 + 2v(\lambda_1 - \lambda_2)} \right) \quad (4)$$

где λ - коэффициент теплопроводности гетерогенной системы;

λ_1 - коэффициент теплопроводности непрерывной фазы (портландцемент, барит);

λ_2 - коэффициент теплопроводности диспергированной фазы (древесина);

v - объемная концентрация диспергированной фазы (древесины).

Из уравнения (4) можно вывести зависимость теплопроводности композитного материала от плотности компонентов и объемной доли наполнителя:

$$\lambda_{\text{комп}} = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2 + 2\lambda_1 - 2(\lambda_1 - \lambda_2) \left(\frac{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_{\text{комп}}}{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_3} \right)}{\lambda_2 + 2\lambda_1 + 2(\lambda_1 - \lambda_2) \left(\frac{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_{\text{комп}}}{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_{\text{комп}}} \right)} \right) \quad (5)$$

Введем обозначения параметров:

$$A = 1 + \frac{2(\rho_3 - \rho_{\text{комп}})}{\rho_1 + \rho_3} \quad \text{и} \quad B = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2 + 2\lambda_1} \approx \frac{1}{2} \quad (6)$$

С учетом (6) формула (5) будет иметь вид:

$$\lambda_{\text{комп}} \approx \lambda_1 e^{-2A} \quad (7)$$

Физико-механические характеристики компонентов приняты согласно [6,7,8] и сведены в табл.1.

Таблица 1 - Физико-механические характеристики компонентов

№ п/п	Компонент	Плотность насыпная, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К)
1	Связующее – портландцемент 400	1300	0,7
2	Наполнитель №1 – барит	4700	0,7
3	Наполнитель №2 – древесная стружка	200	0,09

С помощью программы Microsoft Office Excel, используя формулу (3) и данные табл.1 получим зависимость плотности композиционного материала от объемной доли наполнителя №2 – древесной стружки, используя формулу (5) и данные табл.1 получим зависимость коэффициента теплопроводности композиционного материала от объемной доли наполнителя №2 – древесных частиц. Результаты расчетов представим в графическом виде рис.1.

Используя формулу (7) и данные табл.1 выведем зависимость коэффициента

теплопроводности от плотности композитного материала (рис.2).

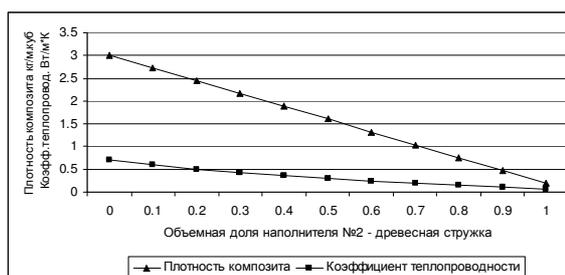


Рис. 1 - Результаты расчетов зависимости плотности и теплопроводности композитного материала от объемной доли наполнителя №2 – древесной стружки

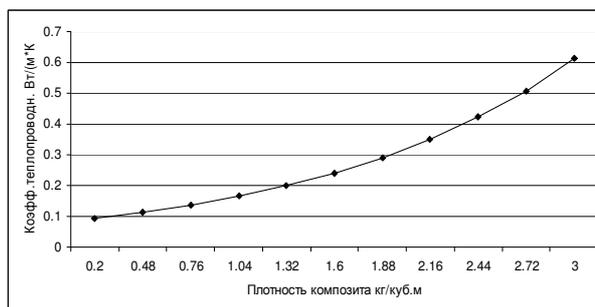


Рис. 2 - Зависимость коэффициента теплопроводности от плотности композитного материала

Из анализа полученных зависимостей в контексте вышеуказанных требований теплопроводности и балластировки следует, что величина оптимальной объемной концентрации наполнителя №2 – древесной стружки в исследуемом композитном теплоизоляционно-балластном материале равна 0,714. При этом расчетный коэффициент теплопроводности композитного материала равен 0,161 Вт/(м*К), а его плотность 1000 кг/м³.

Используя полученные расчетные данные плотности и теплопроводности композитного материала, выполним расчет передачи теплоты и проверку на устойчивость трубопроводной конструкции, состоящей из стальной рабочей трубы, помещенной в защитную полиэтиленовую оболочку с межтрубным пространством, заполненным разработанным композитным материалом.

Передача теплоты при прокладке теплопровода в подводной траншее

Исследуемая трубопроводная конструкция представляет собой стальную трубу, помещенную в полиэтиленовую оболочку. Межтрубное пространство заполнено разработанным теплоизоляционно-балластным материалом [10]. Таким образом, данную конструкцию можно рассматривать как цилиндрическую многослойную трубу. Особенность теплопроводности через цилиндрическую стенку, как и через другие криволинейные ограждения, заключается в том, что

при прохождении через нее тепла поверхности входа и выхода теплового потока не равны. При распространении тепла изнутри трубы, поверхность входа теплового потока меньше, чем поверхность его выхода [6,7,8]. Расчеты передачи тепла выполним используя схему рис.3.

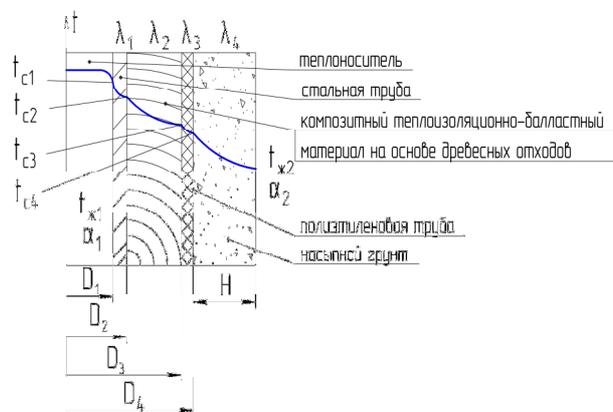


Рис. 3 - Схема передачи тепла через многослойную цилиндрическую стенку и массив грунта

При условии установившегося (стационарного) теплового состояния плотность теплового потока через конструкцию равна [6,7,9]:

$$q = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{D_4}{D_3} + \frac{1}{\alpha_2 D_4}} \quad (8)$$

Согласно уравнению (8) внутри каждого слоя трубопроводной конструкции температура изменяется по логарифмическому закону. Для многослойной стенки температурная кривая представляет собой ломаную кривую.

Определение коэффициента теплоотдачи со стороны теплоносителя к стенке трубы α_1 и коэффициента теплоотдачи со стороны грунтовой засыпки траншеи α_2 является задачей, решение которой возможно только экспериментальным способом. Распространять результаты экспериментов можно только на подобные между собой явления. Теория подобия устанавливает, при каких условиях явления подобны, на какие явления можно распространять выводы данного опыта и пр. Теория подобия положена в основу метода моделирования, позволяющего производить исследование работы каких-либо устройств и аппаратов не на их самих, а на подобных им моделях. Закон теплового подобия определяет условия, при которых геометрически и гидромеханически подобные системы подобны и в тепловом отношении. Тепловое подобие определяется критериями: Рейнольдса, Пекле, Нуссельта, Прандтля [7].

Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке трубы α_1 определяется по формуле:

$$\alpha_1 = 0,023 \frac{\lambda}{D_1} \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \quad (9)$$

Для расчета внешнего коэффициента теплоотдачи α_2 подводного трубопровода применяем формулу Форхгеймера-Власова при $H/D_4 > 1$ [6,7]:

$$\alpha_2 \approx \frac{2\lambda_4}{D_4 \ln \frac{4H}{D_4}} \quad (10)$$

Авторами [8] опытным путем при оценочных расчетах установлено, что $\alpha_1 \gg \alpha_2$, и α_2 для влажной глины можно принять – 1,5; для мокрого песка – 3,5.

Термическое сопротивление массива грунта при совместной прокладке подающего и обратного трубопроводов с учетом их взаимовлияния определяется по формуле:

$$R_{\text{влиян}} = \frac{\ln \sqrt{1 + \left(\frac{2H}{s}\right)^2}}{2\pi\lambda_4} \quad (11)$$

Среднегодовые часовые удельные тепловые потери подающего и обратного трубопроводов определяются по формулам:

$$q_{\text{под}} = \frac{(t_{\text{под}}^{\text{ср.год}} - t_{\text{гр}}^{\text{ср.год}}) \cdot (R_{\text{изол}} + R_{\text{гр}}) - (t_{\text{обр}}^{\text{ср.год}} - t_{\text{гр}}^{\text{ср.год}}) R_{\text{влиян}}}{(R_{\text{изол}} + R_{\text{гр}}) \cdot (R_{\text{изол}} + R_{\text{гр}}) - R_{\text{влиян}}^2}$$

$$q_{\text{обр}} = \frac{(t_{\text{обр}}^{\text{ср.год}} - t_{\text{гр}}^{\text{ср.год}}) \cdot (R_{\text{изол}} + R_{\text{гр}}) - (t_{\text{под}}^{\text{ср.год}} - t_{\text{гр}}^{\text{ср.год}}) R_{\text{влиян}}}{(R_{\text{изол}} + R_{\text{гр}}) \cdot (R_{\text{изол}} + R_{\text{гр}}) - R_{\text{влиян}}^2}$$

Расчет выполним для разных типоразмеров стальной трубы при следующих исходных данных:

- Физические свойства воды при максимальной температуре теплоносителя в подающем трубопроводе 150°C составляют $\lambda = 68,4 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\nu = 2,03 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сек}$, $a = 6,22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$ [11].
- Среднегодовая температура в подающем трубопроводе – 90°C , в обратном трубопроводе – 50°C [13];
- Температура грунта – $t_{ж2} = 3^\circ\text{C}$ [14];
- Глубина заложения до верха трубопроводов – $H=1,0 \text{ м}$ [8].
- Расстояние между теплоизоляциями подающего и обратного трубопроводов – $s=0,5 \text{ м}$ [8].
- Коэффициент теплопроводности композитного теплоизоляционно-балластного материала согласно $\lambda_{\text{изол}}=0,161 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.
- Коэффициент теплопроводности грунта $\lambda_{\text{гр}}=1,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, коэффициент теплопроводности стали $\lambda_{\text{ст}}=54,52 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, коэффициент теплопроводности полиэтилена $\lambda_{\text{полэт}}=0,35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [12].

Результаты расчетов сведем в табл.2.

Таблица 2 - Среднегодовые часовые удельные тепловые потери тепловой энергии

Условный диаметр трубопровода D_y , мм	Среднегодовые часовые удельные потери тепловой энергии $Q_{под} + Q_{обр}$, Вт/м	Нормы плотности теплового потока Вт/м [13]
50	68,99	41
70	80,83	49
80	89,24	52
100	95,14	58
125	111,44	66
150	90,75	73
200	92,73	93
250	102,25	106
300	117,74	121
400	139,11	148
500	159,45	176
600	175,88	205
700	184,56	229
800	193,38	257
900	179,94	284
1000	187,79	312
1200	197,46	368
1400	214,61	425

Таким образом, проведенный расчет показывает, что теплоизоляционные характеристики разработанного композитного теплоизоляционно-балластного материала на основе древесных отходов соответствуют предъявляемым требованиям по теплозащите трубопроводов с условным диаметром $D_y 200$ включительно и более. Применение данной теплоизоляции трубопроводов для трубопроводов диаметром менее $D_y 200$ возможно путем увеличения толщины изоляции.

Определение критического диаметра тепловой изоляции трубопровода

Из анализа формулы (8) следует, что при постоянных значениях $\alpha_1, D_1, D_2, D_3, \alpha_2$ полное термическое сопротивление теплопередачи многослойной цилиндрической стенки будет зависеть от внешнего диаметра D_4 , количество передаваемого тепла Q при увеличении внешнего диаметра тепловой изоляции D_3 сначала будет возрастать и при $D_3 = D_{кр}$ будет иметь максимум. При дальнейшем увеличении внешнего диаметра изоляции Q будет снижаться.

После выбора теплоизоляционного материала трубопровода рассчитывают критический диаметр для известных λ_2, α_2 . Если в результате вычислений $D_{кр.из} > D_3$, то применение данного материала в качестве тепловой изоляции

нецелесообразно. В области $D_2 < D_3 < D_{кр.из}$ при увеличении толщины изоляции будет наблюдаться увеличение тепловых потерь. Только при $D_3 = D_{3эф}$ тепловые потери вновь станут такими же, как для первоначального неизолированного трубопровода. Следовательно, некоторый слой тепловой изоляции не будет оправдывать своего назначения.

Толщина теплоизоляционного слоя $(D_4 - D_3)$ определяет размер трубопроводной конструкции и принимается из условия максимального значения термического сопротивления.

Значения толщин стальной трубы и защитной полиэтиленовой оболочки стандартизированы, следовательно, D_2, D_3, D_4 являются постоянными для трубопровода, имеющего внутренний диаметр стальной трубы D_1 . Исследуя на максимум термическое сопротивление R как функцию D_4 , для чего возьмем производную и приравняем ее к нулю:

$$\frac{d(R)}{d(D_4)} = \frac{1}{2\lambda D_4} - \frac{1}{\alpha_2 D_4^2} = 0 \quad (12)$$

Отсюда:
$$\frac{1}{2\lambda} = \frac{1}{\alpha_2 D_4} \quad (13)$$

Таким образом, критический диаметр тепловой изоляции равен:

$$D_{кр.из} = \frac{2\lambda_2}{\alpha_2} \quad (14)$$

Следовательно, для эффективной работы тепловой изоляции необходимо, чтобы $D_4 \geq D_{кр.из}$.

Подставив соответствующие значения в формулу (14) имеем:

$$D_{кр.из} = \frac{2 \cdot 0,161}{3,5} = 0,092 м \quad (15)$$

Из сравнения полученного значения критического диаметра изоляции трубопровода с величиной наружного диаметра тепловой изоляции следует, что условие эффективной работы тепловой изоляции с применением композитного теплоизоляционно-балластного материала на основе древесных отходов соблюдается для всего ряда типоразмеров труб.

Вывод

Выполненные расчеты показали, что физико-механические свойства композитного теплоизоляционно-балластного материала на основе древесных отходов удовлетворяют заданным условиям (плотность более 1000 кг/м^3 и коэффициент теплопроводности не более $0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$) его использования для подводных конструкций трубопроводов централизованного теплоснабжения.

Литература

1. Вторичные материальные ресурсы лесной и деревообрабатывающей промышленности (образование и использование): Справочник. – М.: Экономика, 1983. – 224 с.
2. *Батаев А.А.* Композиционные материалы: строение, получение, применение, изд. Логос, 2006. – 398 с.
3. *Худяков В.А.* Современные композиционные строительные материалы, изд. Феникс, 2007. 224 с.
4. *Кортаев Э.И., Симонов В.И.* Производство строительных материалов из древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1972. – 144 с.
5. *Ветошкин Ю. И., Яцун И. В., Мялицин А.В.* О возможности применения композиционных материалов «фанотрен» и «плитотрен» на основе древесины в качестве защитных для медицинских рентгенкабинетов. Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник, ISSN 1727-3749, 2008. № 3 (60). С. 145- 147.
6. *Коротких А.Г.* Теплопроводность материалов: учебное пособие /А.Г.Коротких; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.
7. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. - 344 с.
8. *Бородавкин П.П., Березин В.Л., Шадрин О.Б.* Подводные трубопроводы. М., Недра, 1979. 415 с.
9. И.Т.Швец и др. Общая теплотехника. – М., Машгиз, 1961. – 463 с.
10. Патент на ПМ 122746 (2012)
11. Справочная книжка энергетика/Сост. А.Д.Смирнов. – М.:Энергия, 1978. – 3-е изд.перераб. и доп. – 336 с., ил.
12. Основания, фундаменты и подземные сооружения /М.И.Горбунов-Посадов, В.А.Ильичев, В.И.Крутов и др.; Под общ.ред Е.А.Сорчана и Ю.Г.Трофименкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 480с.: ил. – (Справочник проектировщика).
13. СНиП 41-03-2003 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М. 2004 – 28 с.
14. СНиП II-3-79* Строительная теплотехника Минстрой России М.1995 – 50 с.
15. *Мухаметзянов Ш.Р., Хасанишин Р.Р., Кайнов П.А.* Сушка и термовлажностная обработка крупномерной древесины Вестник КГТУ №22 2013г. с.72-73.
16. *Хасанишин Р.Р., Зиятдинов Р.Р.* Повышение эксплуатационных характеристик клееных материалов, созданных на основе термообработанного шпона. Вестник КГТУ. №13 2013г. с. 87-89.

© **Ю. А. Горинов** - асп. каф. ДОП ПГТУ г. Йошкар-Ола; **А. Н. Чемоданов** - к.т.н., проф., зав. каф. ДОП ПГТУ; **С. Я. Алибеков** - д.т.н., проф., зав. каф. МиМ ПГТУ **А. В. Маряшев** - к.т.н., доц. каф. энергообеспечение предприятий ПГТУ **Р. С. Сальманов** - к.т.н., доц. каф. физики КНИТУ, romanova_rg@mail.ru.