

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КАМЕННОЙ ВАТЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОСТАВЛЯЮЩИХ ЕГО КОМПОЗИТОВ ПОСРЕДСТВОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Пашкевич И.А.¹, Ермоленко М.В.²

¹Пашкевич Илья Александрович - магистрант;

²Ермоленко Михаил Вячеславович - кандидат технических наук,
кафедра технической физики, инженерно-технологический факультет,
Государственный университет им. Шакарима,
г. Семей, Республика Казахстан

Аннотация: рассмотрено влияние влажности теплоизоляционного материала на коэффициент теплопроводности на основе экспериментальных исследований и предложена математическая модель расчета теплопроводности материала на основе композитного подхода.

Ключевые слова: теплоизоляционные материалы; влажность; коэффициент теплопроводности; каменная вата, математическое моделирование.

Несмотря на развитие цивилизации, проблема сбережения тепла остается острой, поэтому наиболее актуальными остаются вопросы по разработке и применению новых видов теплоизоляторов, работающих в различных условиях. А после введения новых строительных норм, ужесточивших требования по теплозащите, правильное применение качественной теплоизоляции стало насущной необходимостью [1].

В настоящее время основное внимание уделяется определению тепловых характеристик тепломагистралей, а также математическому моделированию процессов работы трубопроводов. Наиболее свежие экспериментальные данные в этом направлении были получены сотрудниками Томского государственного архитектурно-строительного университета [2].

Однако работ, объединяющих экспериментальные и аналитические исследования в этой области почти нет, что сильно затрудняет ведение разработок в области энергоэффективности теплоизоляционных материалов. Актуальность данного направления исследований обусловлена повышенной потребностью современной строительной промышленности в способах быстрого и точного определения влияния условий рабочей среды на эффективность теплоизоляторов, а также в способах предварительного определения характеристик разрабатываемых материалов.

Целью работы была разработка математической модели влияния влажности на свойства теплоизолятора и проверка полученных результатов на практике.

Для численного моделирования в качестве образца была выбрана каменная вата с разной степенью влажности. Так как каменная вата представляет собой пористую волокнистую систему с хаотической структурой, она сильно впитывает в себя влагу.

В конструкционных материалах волокна исполняют роль силового каркаса, обеспечивающего высокие прочностные свойства и возможность деформаций в требуемом направлении (арматура транспортерных лент, ремней, шин, надувных оболочек, стеклопластиков и т. п.). Диаметр волокон и прядей меняется в широких пределах от долей микрометра до миллиметров [3].

Проанализировав существующие способы моделирования процесса [4, 5, 6], нами была выбрана формула Дульнева для модели двухкомпонентного композита с хаотической структурой преобразованная для трехкомпонентной системы. Учитывая мелкодисперсное строение материала и свойство воды при взаимодействии с твердыми материалами, было принято в качестве каркаса рассчитать двухкомпонентный композит «базальтовое волокно – вода». Затем к полученным расчетам добавлен расчет с содержанием воздуха.

В качестве переменной была принята массовая влажность образца ω , %. Первым этапом расчета было определение объемной концентрации компонентов композита,

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{\rho d}{\rho_1 d_0}, & (1) \\ v_2(\omega) &= \frac{\omega \rho_1 v_1}{(1 - \omega) \rho_2}, & (2) \\ v_3(\omega) &= 1 - (v_1 + v_2(\omega)), & (3) \end{aligned}$$

Где v_1 – объемное содержание материала, %; $v_2(\omega)$ – объемное содержание воды, %; $v_3(\omega)$ – объемное содержание воздуха, %; d – толщина образца, мм; d_0 – толщина образца при эксплуатации, мм; ρ – исходная плотность образца, кг/м³; ρ_1 – плотность материала, кг/м³; ρ_2 – плотность воды, кг/м³.

А также относительной объемной концентрации компонентов каркасной структуры,

$$v_4(\omega) := \frac{v_1}{v_1 + v_2(\omega)}, \quad (4)$$

$$v_5(\omega) := \frac{v_2(\omega)}{v_1 + v_2(\omega)}, \quad (5)$$

где $v_4(\omega)$ – объемное содержание материала в каркасе, %; $v_5(\omega)$ – объемное содержание воды в каркасе, %.

На втором этапе была определена теплопроводность увлажненного каркаса согласно уравнения Дульнева для двухкомпонентного материала с хаотической структурой волокон:

$$\lambda_{12}(\omega) := \lambda_1 \cdot \left[C_{12}(\omega)^2 + v_{12} \cdot (1 - C_{12}(\omega))^2 + \frac{2 \cdot v_{12} \cdot C_{12}(\omega) \cdot (1 - C_{12}(\omega))}{v_{12} \cdot C_{12}(\omega) + (1 - C_{12}(\omega))} \right], \quad (6)$$

$$C_{12}(\omega) := - \frac{[V(\omega) - 1] \cdot [V(\omega) - 1 + i\sqrt{3} + 2i\sqrt{3} \cdot V(\omega)]}{4(2 \cdot v_5(\omega) + 2 \cdot \sqrt{v_5(\omega)^2 - v_5(\omega)} - 1)^{\frac{1}{3}}}, \quad (7)$$

$$V(\omega) := 2 \cdot \left(\frac{v_5(\omega)}{4} + \sqrt{\frac{v_5(\omega)^2}{16} - \frac{v_5(\omega)}{16} - \frac{1}{8}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (8)$$

где $\lambda_{12}(\omega)$ – коэффициент теплопроводности каркаса, Вт/м·К; $v_{12} := \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ – относительный коэффициент теплопроводности каркаса; λ_1 – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К; λ_2 – коэффициент теплопроводности воды, Вт/м·К; $C_{12}(\omega)$ – относительный размер волокна материала; $V(\omega)$ – промежуточное расчетное значение для каркаса.

На заключительном этапе была смоделирована система «увлажненный каркас – воздух», что позволило при расчете получить:

$$\lambda(\omega) := \lambda_{12}(\omega) \cdot \left[C(\omega)^2 + v \cdot (1 - C(\omega))^2 + \frac{2 \cdot v \cdot C(\omega) \cdot (1 - C(\omega))}{v \cdot C(\omega) + (1 - C(\omega))} \right], \quad (9)$$

$$C(\omega) := - \frac{[V_2(\omega) - 1] \cdot [V_2(\omega) - 1 + i\sqrt{3} + 2i\sqrt{3} \cdot V_2(\omega)]}{4(2 \cdot v_3(\omega) + 2 \cdot \sqrt{v_3(\omega)^2 - v_3(\omega)} - 1)^{\frac{1}{3}}}, \quad (10)$$

$$V_2(\omega) := 2 \cdot \left(\frac{v_3(\omega)}{4} + \sqrt{\frac{v_3(\omega)^2}{16} - \frac{v_3(\omega)}{16} - \frac{1}{8}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (11)$$

Где $\lambda(\omega)$ – коэффициент теплопроводности увлажненного образца, Вт/м·К; $v := \frac{\lambda_3}{\lambda_{12}}$ – относительный коэффициент теплопроводности увлажненного образца; λ_3 – Теплопроводность воздуха, Вт/м·К; $C(\omega)$ – относительный размер увлажненного волокна; $V_2(\omega)$ – промежуточное расчетное значение для увлажненного образца.

На основании математической модели была определена зависимость коэффициента теплопроводности теплоизолятора от содержания воды (рис. 1).

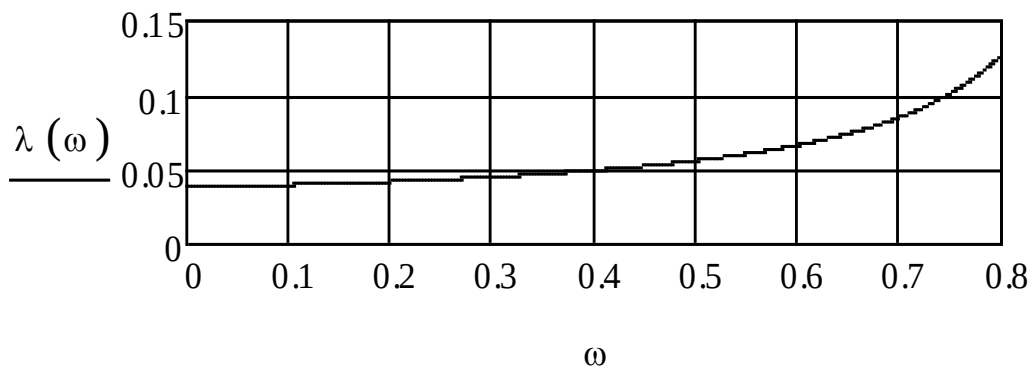


Рис. 1. Расчетная зависимость коэффициента теплопроводности каменной ваты от его массовой влажности

Анализ полученной зависимости показал, что при влажности вплоть до 60% коэффициент теплопроводности растет слабо, а затем резко увеличивается. Максимально возможное остаточное увлажнение составляет примерно 80%, а максимально возможное содержание воды в материале составляет примерно 91%

Для проверки адекватности полученных результатов было проведено экспериментальное определение теплопроводности каменной ваты при разных степенях влажности при помощи прибора КИМО ТМ – 200. Полученные результаты приведены на рис. 2.

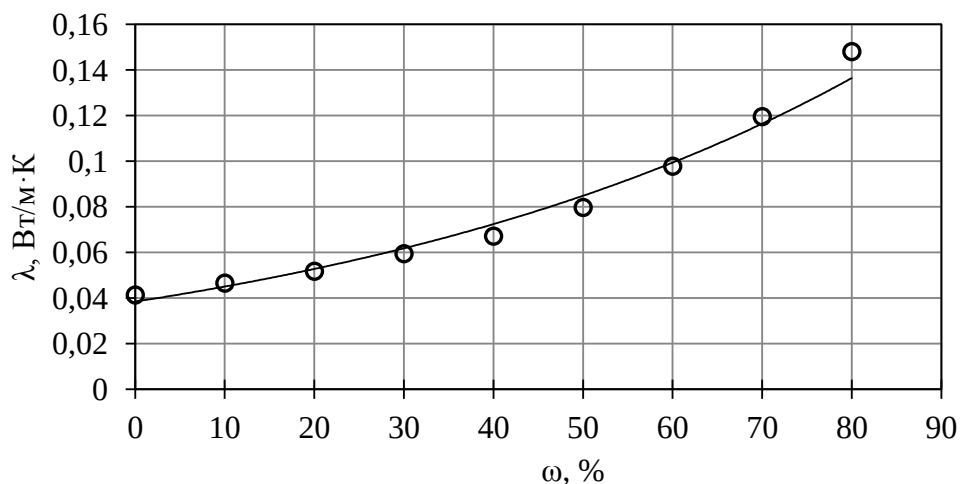


Рис. 2. Экспериментальная зависимость коэффициента теплопроводности каменной ваты от его массовой влажности

В результате анализа экспериментальных данных была получена аналитическая зависимость коэффициента теплопроводности материала от его массовой влажности:

$$\lambda = 0,0384e^{0,0158\omega} \quad (12)$$

Анализ полученных данных подтвердил, что произведенные по предложенной модели расчёты показывают хорошее совпадение с практическими данными, что демонстрирует возможность ее применения на практике. Процент расхождения теоретических результатов с экспериментальными составляет не более 5%.

Кроме того если в качестве наполнителя (второй этап расчетов) выбрать вместо воды какой-либо другой материал, то данный расчет позволит рассмотреть свойства нового теплоизоляционного материала, а значит полученную модель можно использовать для разработки новых теплоизоляционных материалов.

Список литературы

1. ГОСТ 7076-99 Межгосударственный стандарт. Материалы и изделия строительные Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. Принят МНТКС 20.05.1999 г.
2. Немова Т.Н., Лежнева Ю.А., Цветков Н.А., Алексеева Е.Г. Влияние изменения теплопроводности теплоизоляционных материалов на тепловые потери магистральных трубопроводов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2016. № 5 (58). С. 151-160.
3. Селиванов Ю.В., Шильцина А.Д., Селиванов В.М., Логинова Е.В., Королькова Н.Н. Составы и свойства керамических теплоизоляционных строительных материалов из масс низкотемпературного вспенивания на основе глинистого сырья // Инженерно-строительный журнал, 2012. № 3. С. 35–40.
4. Av. E. Van Nieuwenhuysse. Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam (PUR/PIR), // Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations, 2006. P. 33.
5. Douak M., Aouachria Z. Magnetic effects on the velocity and thermal fields in the 2D incompressible flow around a cylindrical body // Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi, 2008. P. 135-144
6. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композитных материалов. Ленинградское отделение: ЭНЕРГИЯ. 1974. 264 с.