

УДК 691.322

Назирова Р.А. – доктор технических наук, профессор

E-mail: nazirova@rambler.ru

Волков А.Н. – аспирант

E-mail: volkov-sasha@yandex.ru

Фаткулина-Яськова Л.М. – аспирант

E-mail: lyudmila-fatkulina@yandex.ru

Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета

Адрес организации: 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 82

Моделирование теплопроводности легких бетонов на крупном заполнителе**Аннотация**

Проведен обзор аналитических формул расчета теплопроводности двухкомпонентных систем. Представлены результаты расчета теплопроводности бетона как композиционного материала, состоящего из цементно-песчаной матрицы и крупного заполнителя. Получены уравнения регрессии теплопроводности легкого бетона, состоящего из единичного зерна крупного заполнителя и окружающей его цементно-песчаной матрицы, и модели бетона сложной структуры. Установлена степень влияния теплопроводности матрицы, заполнителя и объемной доли распределенной фазы на коэффициент теплопроводности бетона. Показана возможность расчета теплопроводности легкого бетона сложной структуры на основе геометрической модели элементарной ячейки.

Ключевые слова: легкий бетон на крупном заполнителе, коэффициент теплопроводности, аналитические формулы, метод конечных элементов, элементарная ячейка.

Широко распространенным и эффективным методом теоретического исследования теплопроводности капиллярно-пористых материалов является принцип обобщенной проводимости, основывающийся на аналогии между дифференциальными уравнениями потока тепла и массы, электрического тока, магнитной и электрической индукции. Определение теплопроводности с использованием подобных методов не дает наглядного представления о процессах теплопередачи и теплораспределения в материале и в то же время требует длительного времени для получения достоверных результатов. Наиболее эффективным способом определения теплотехнических характеристик составов и исследования их свойств является способ рассмотрения реальной структуры материала, ее моделирования и расчет в программных комплексах, основывающихся на методе конечных элементов. Ниже представлены способы определения теплопроводности легкого бетона на крупном заполнителе с использованием аналитического метода расчета и метода конечных элементов.

Подробный анализ моделей теплопроводности капиллярнопористых тел и дисперсных представлен в [1]. В качестве простейшей модели для исследования теплопроводности рассматривается система, состоящая из плоскопараллельных слоев материалов, имеющих различные коэффициенты теплопроводности. В случае расположения слоев вдоль потока тепла (рис. 1а) теплопроводность системы будет максимальной и в целом рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{max} = p \cdot \lambda_p + (1 - p) \cdot \lambda_m. \quad (1)$$

Если слои материалов перпендикулярны потоку тепла (рис. 1б), эффективная теплопроводность системы минимальна и определяется выражением:

$$\lambda_{min} = \frac{\lambda_m \cdot \lambda_p}{p \cdot \lambda_m + (1 - p) \cdot \lambda_p}. \quad (2)$$

Очевидно, что соотношения (1) и (2) обозначают диапазон, в котором находятся значения теплопроводности материалов.

В реальных системах элементарные слои материала могут располагаться под углом к направлению теплового потока. Поэтому для наклонных слоев (рис. 1в), при использовании формул (1) и (2), получено выражение расчета эффективной теплопроводности λ_{eff} (ЭТП) [2]:

$$\lambda_{eff} = \sqrt{\lambda_{max}^2 + \lambda_{min}^2}, \quad (3)$$

где $\lambda_{max} = (p \cdot \lambda_p + (1-p) \cdot \lambda_m) \cdot \cos(\theta)$ и $\lambda_{min} = \frac{n_m \cdot \lambda_p}{p \cdot \lambda_p + (1-p) \cdot \lambda_m} \cdot \sin(\theta)$, а θ – угол наклона слоев к направлению теплового потока.

Параметр θ можно рассчитать по формуле:

$$\tan(\theta) = \left[B \cdot \frac{A_{\perp}}{A_{\parallel}} \cdot F \cdot p^2 \cdot \left(\psi \cdot \frac{\lambda_m}{\lambda_p} \right)^{1/2} \right], \quad (4)$$

где B – коэффициент, зависящий от характера упаковки частиц и их состава; A_{\perp} и A_{\parallel} – площади поверхности элементарных слоев, соответственно перпендикулярных и параллельных теплому потоку; ψ – отношение площади правильного шара к фактической площади частицы, отличной от шара; F – коэффициент, зависящий от геометрии прохождения теплового потока в двухфазной системе. Для коэффициента F получены численные значения: $F = 1,15$ для двухфазной гранулированной системы; $1,7$; $0,67$ и $1,05$, соответственно для суспензий, эмульсий и твердых тел.

Позднее, для получения значений угла θ авторы работы [3] преобразуют формулу (3) к виду:

$$A \cdot \sin^2(\theta) + B = 0. \quad (5)$$

По данным этих же авторов средняя ошибка между расчетом по этой модели и экспериментальными данными не превысила 5 %. К достоинствам этой модели они относят и отсутствие необходимости определения параметров, входящих в формулу (4), в том числе и коэффициента, учитывающего форму частиц дисперсной фазы.

Авторы [4] для расчета ЭТП двухфазных композиций предложили эмпирическую формулу Ассада:

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_m} = \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m} \right)^k, \quad (6)$$

где $k = c \cdot p$ и $c \cong 1$. При $c = 1$ эффективная теплопроводность определяется как среднее геометрическое значений λ_m и λ_p .

На оценке среднего геометрического значения базируется расчет ЭТП двухфазных систем моделей Veerendra и Chaudhary, используемая авторами [4]:

$$\lambda_{eff} = \lambda_m^n \cdot \lambda_p^{(1-n)}. \quad (7)$$

В формуле (7) n – доля системы ориентированная параллельно теплому потоку и $(1-n)$ – перпендикулярно. Величина n зависит от пористости и отношения λ_m/λ_p .

Для $\lambda_m > \lambda_p$ авторы [4] рекомендуют расчет ЭТП производить по формуле:

$$\lambda_{eff} = p \cdot \lambda_p \cdot e^{-\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m}-1\right)(1-p)} + (1-p) \cdot \lambda_m \cdot e^{\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m}-1\right)p} \pm p \cdot (1-p) \cdot \sqrt{\lambda_p \cdot e^{-\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m}-1\right)(1-p)} \cdot \lambda_m \cdot e^{\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m}-1\right)p}}. \quad (8)$$

Формула хорошо согласуется с экспериментальными результатами оценки ЭТП дисперсных систем. Для распределенных в твердой фазе частиц предлагается в формулу (8) перед квадратным корнем ввести эмпирический коэффициент f , учитывающий форму этих частиц (φ) их λ_p и теплопроводность матрицы λ_m , $f = \varphi \cdot (\lambda_m/\lambda_p)^{1/3}$ [4].

Модель Pande и Chaudhary используется авторами [4] для двухфазных, дисперсных гранулированных материалов, модифицируется для твердой фазы и распределенных в ней частиц путем введения коэффициента формы частиц F в формулы:

$$\lambda_{eff} = F \cdot 0,6132 \cdot (\lambda_m \cdot \lambda_p)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - 1,545 \cdot \varepsilon_p^{\frac{2}{3}}) \text{ при } \varepsilon_p > 0 \text{ и } \varepsilon_p = p - 0,5, \quad (9)$$

$$\lambda_{eff} = F \cdot 0,6132 \cdot (\lambda_m \cdot \lambda_p)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + 3,844 \cdot \varepsilon_p^{\frac{2}{3}}) \text{ при } \varepsilon_m > 0 \text{ и } \varepsilon_m = 0,5 - p. \quad (10)$$

Для оценки теплопроводности системы, состоящей из изотропной среды, в которую вкраплены частицы сферической формы (рис. 1г), Максвеллом предложено уравнение, которое в [5] представляется в виде:

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_m} = 1 + \frac{3 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m} - 1 \right) \cdot p}{\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m} + 2 \right) - \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m} - 1 \right) \cdot p}. \quad (11)$$

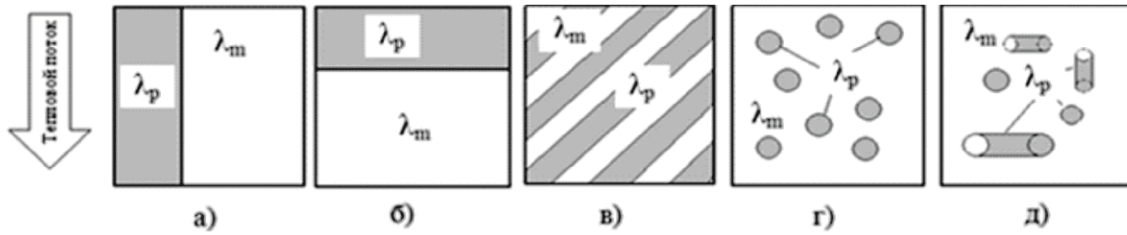


Рис. 1. Системы для исследования теплопроводности материалов

Модель Максвелла получена в предположении случайного распределения сферических частиц малых размеров вдали друг от друга в пределах непрерывной матричной фазы так, чтобы местные искажения теплового потока вокруг каждой из частиц не оказывали взаимного влияния. Эта модель стала основой для разработки моделей, учитывающих искажения изолиний теплового потока вокруг теплоизоляционных частиц, а также их формы.

В этой связи интересна модель Hamilton-Crosser (рис. 1д) [6]:

$$\lambda_{eff} = \frac{\frac{\lambda_p}{\lambda_m} + (n-1) + (n-1) \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m} - 1\right) \cdot p}{\frac{\lambda_p}{\lambda_m} + (n-1) + (n-1) \cdot p} \quad (12)$$

При $n=3$ (случай для сферических частиц) формула (13) преобразуется в (12). Для частиц в форме цилиндра $n=6$.

В практических расчетах нашла применение модель эффективной средней теплопроводности двухкомпонентных систем (ЕМТ – модель) с полностью случайным распределением компонентов:

$$(1-p) \cdot \frac{\lambda_m - \lambda_{eff}}{\lambda_m + 2 \cdot \lambda_{eff}} + p \cdot \frac{\lambda_p - \lambda_{eff}}{\lambda_p + 2 \cdot \lambda_{eff}} = 0. \quad (13)$$

Формула Максвелла-Эйкена используется для расчета теплопроводности твердой фазы:

$$\lambda_{eff} = \lambda_m \cdot \left[\frac{1 + 2 \cdot p \cdot \frac{1 - \lambda_m/\lambda_p}{2\lambda_m/\lambda_p + 1}}{1 - p \cdot \frac{1 - \lambda_m/\lambda_p}{2\lambda_m/\lambda_p + 1}} \right]. \quad (14)$$

Известна формула В.И. Оделевского, полученная для расчета проводимости матричной двухфазной гетерогенной системы:

$$\lambda_{eff} = \lambda_m \cdot \left(1 - \frac{p}{1 - \lambda_p/\lambda_m} \frac{1-p}{3} \right). \quad (15)$$

Эта формула получена в двухфазной системе, имеющей включения в виде правильных кубов с параллельными ребрами, центры которых образуют кубическую решетку.

Для систем, в которых частицы распределены хаотически, без образования регулярных структур, В.И. Оделевский получил выражение:

$$\lambda_{eff} = \frac{(3 \cdot \vartheta_1 - 1) \cdot \lambda_m + (3 \cdot \vartheta_2 - 1) \cdot \lambda_p}{4} + \sqrt{\left(\frac{(3 \cdot \vartheta_1 - 1) \cdot \lambda_m + (3 \cdot \vartheta_2 - 1) \cdot \lambda_p}{4} \right)^2 + \frac{\lambda_m}{2 \cdot \lambda_p}}. \quad (16)$$

В этих формулах λ_{eff} , C_m и λ_p – соответственно эффективная теплопроводность и теплопроводности матрицы и распределенных в ней частиц, p – пористость системы; ϑ_1 и ϑ_2 – объемы соответствующих фаз.

Хорошее согласие с экспериментальными данными для двухфазных систем имеет расчет по формуле, предложенной Р.И. Гаврилевым [7], [8]:

$$\lambda_{eff} = \lambda_m \cdot \left[1 + \frac{(\lambda_p - \lambda_m) \cdot p}{\lambda_m + K_f \cdot (1-p) \cdot (\lambda_p - \lambda_m)} \right]. \quad (17)$$

В этой формуле K_f – коэффициент формы распределенной фазы и может изменяться от 0 до 1. Для сферической формы $K_f = 0,33$.

Зависимость теплопроводности бетона от теплопроводности его составляющих и содержания заполнителя исследована С.М. Ицковичем [9] теоретически на кубических моделях раствора и заполнителя. Модель представляла собой кубическую ячейку из

цементного раствора, внутри которой находится наполнитель такой же формы. В результате получено следующих два выражения:

$$\lambda_{eff} = \lambda_m \cdot \left[1 + p^{2/3} \left(\frac{1}{1 - p^{2/3} \cdot (1 - \lambda_m / \lambda_p)} - 1 \right) \right]. \quad (18)$$

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_m}{1 - p^{2/3} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + p^{2/3} \cdot (\lambda_p / \lambda_m - 1)} \right)}. \quad (19)$$

Формулы (18) и (19) дают при расчете близкие результаты, охватывающие область возможных значений теплопроводности бетона на конкретном наполнителе. Входящий в эти формулы параметр λ_p , по рекомендациям автора, следует определять испытанием в бетоне при зафиксированных параметрах λ_m и p .

Авторы [10], рассматривая элементарную ячейку бетона в виде сферы (рис. 2), вывели формулу для расчета теплопроводности бетона.

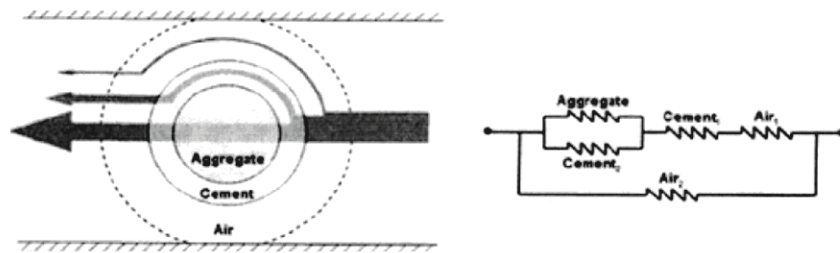


Рис. 2. Структура материала (слева) и аналогичная ей электрическая сетевая модель (справа) теплового потока воздухопроницаемости бетона [10]

$$\lambda_{eff} = (\varphi_a + \varphi_c) \cdot \left[\frac{\lambda_c \cdot \lambda_v}{\varphi_c \cdot \lambda_v + \varphi_v \cdot \lambda_m} + (\varphi_c \cdot \lambda_c + \varphi_a \cdot \lambda_a) \right] \cdot (1 - p_t). \quad (20)$$

В данной формуле $\varphi_a, \varphi_c, \varphi_v$ – объемные части заполнителя, цементного камня и сообщающихся воздушных пор; p_t – микропористость цементного камня, определяемая по формуле:

$$p_t = \frac{\omega/c - 0,17 \cdot H}{0,317 - \omega/c}, \quad (21)$$

где ω/c – водоцементное отношение; H – степень гидратации цемента.

В работе показано, что результаты расчета по формуле значительно ближе к значениям теплопроводности, определенным экспериментальным путем.

Б.И. Кауфман [11] эмпирическим путем вывел формулу зависимости ЭТП от плотности и диаметра пор, которая представляется в следующем виде:

$$\lambda_{eff} = 0,022 \cdot \left[\left(0,81 \cdot \lg \frac{d}{0,14} + 0,215 \cdot (d - 0,14) \right) \cdot \frac{0,35^{2/3}}{\gamma} + 5 \cdot \gamma^{1,1} \cdot 1,68^\gamma + 1 \right]. \quad (22)$$

где d – средний диаметр пор, мм; γ – плотность в сухом состоянии, т/м³; 0,022 – теплопроводность воздуха, (ккал/м ч °С); 0,14 – средний диаметр пор, мм.

Решение материаловедческих задач с использованием принципа обобщенной проводимости оказывается наиболее эффективным, если оно сопровождается рассмотрением структуры материалов. Для легких бетонов это означает необходимость изучения пористости вяжущего и заполнителя, состава и свойств фаз, заполняющих эти поры; свойств и размеров заполнителя, его количества и расположения к направлению теплового потока; оценку влияния кондуктивной, конвективной и радиационной составляющих на эффективную теплопроводность бетона. Учет всех этих факторов, а также значительная их вариабельность обуславливает значительные трудности теоретического анализа и математического описания тепловых потоков в многокомпонентных строительных материалах. Почти все полученные к настоящему времени соотношения основаны на некотором упрощении физической картины переноса тепла и идеализированном представлении о структуре материала.

Наиболее эффективным методом проектирования составов и исследования свойств в строительном материаловедении является метод, основывающийся на рассмотрении реальной структуры материала, моделировании такой системы, ее расчете и экспериментальной проверке полученных результатов. Такой метод позволяет сократить количество трудоемких,

долговременных, сложных и зачастую дорогостоящих экспериментальных исследований. Развитию такого подхода способствует совершенствование вычислительной техники, методов и технологий численного моделирования. Расчеты по определению основных теплотехнических параметров материалов позволяют выполнить такие программные комплексы, как ANSYS. Используя подобные специализированные программные средства, можно с успехом проектировать многокомпонентные составы строительных материалов с заданными строительно-техническими свойствами.

В качестве простейшей модели легкого бетона, состоящего из цементно-песчаного раствора и теплоизоляционного заполнителя, выбрана элементарная ячейка в виде куба единичного объема, наполненного цементно-песчаным раствором, внутри которого находится шарообразный заполнитель из теплоизоляционного материала (рис. 4а).

На противоположных сторонах элементарной ячейки задавались граничные условия третьего рода, характеризующие закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой при постоянном потоке тепла. В этом случае количество тепла, передаваемое (или получаемое) телом в единицу времени с единицы площади поверхности в окружающую среду (из окружающей среды) с температурой прямо пропорционально разности температур между поверхностью тела и окружающей средой ΔT , т.е.:

$$q = \alpha \Delta T, \quad (23)$$

где α – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплообмена, $вт/(м^2 \times ^\circ C)$. Зная α , q и средние температуры на «горячей» T_h и «холодной» T_c поверхности, коэффициент теплопроводности элементарной ячейки можно рассчитать по формуле:

$$\lambda = \frac{q\delta}{T_h - T_c}. \quad (24)$$

Для теоретического эксперимента реализован метод математического планирования. Наименование варьируемых факторов и уровни варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование варьируемых факторов и уровни варьирования

Наименование фактора	Обозначение	Уровни варьирования		
		-1	0	+1
Теплопроводность непрерывной фазы (растворная часть)	λ_m	0,4	0,8	1,2
Теплопроводность диспергированной фазы (заполнитель)	λ_p	0,07	0,14	0,21
Отношение диаметра заполнителя к длине стороны элементарной ячейки (отношение объемов)	R (V)	0,65 (0,144)	0,80 (0,268)	0,95 (0,449)

В результате расчета 15 комбинаций варьируемых в трех уровнях факторов по плану Вох-Бехнке (Таблица 2) получены следующие адекватные уравнения регрессии:

$$\lambda = 0,550 + 0,254\lambda_m + 0,033\lambda_p - 0,104R - 0,067\lambda_m R + 0,015\lambda_p R \quad (25)$$

и

$$\lambda = -0,027 + 1,543\lambda_m - 0,666\lambda_p - 0,01R - 0,047\lambda_m\lambda_p - 1,109\lambda_m R + 1,461\lambda_m R, \quad (26)$$

$$\lambda = 0,964\lambda_m - 0,512p + 0,841p^2 - 1,076\lambda_m p + 1,429\lambda_p p + 0,029 \quad (27)$$

В уравнении (25) величины варьируемых факторов представляются в кодированных единицах, т.е. от -1 до +1, а в уравнениях (26) и (27) в натуральных (теплопроводность в Вт/(м·К), геометрические параметры R и p в относительных единицах).

Как и следовало ожидать, теплопроводность элементарной ячейки увеличивается с увеличением теплопроводности матрицы и заполнителя и уменьшается с увеличением относительной объемной доли заполнителя, имеющего низкую теплопроводность. По степени влияния на выходной параметр значимые коэффициенты уравнения (25) можно расположить в следующем порядке:

$$\lambda_m > R > \lambda_m R > \lambda_p > \lambda_p R. \quad (28)$$

Это хорошо иллюстрируется на рис. 3 по наклону и форме изолиний.

В таблице 2 представлен расчет коэффициента теплопроводности элементарной ячейки по уравнениям (25), (26), (27) и численное решение методом конечных элементов (МКЭ). Нетрудно заметить, что расчеты дают хорошо сопоставимые результаты.

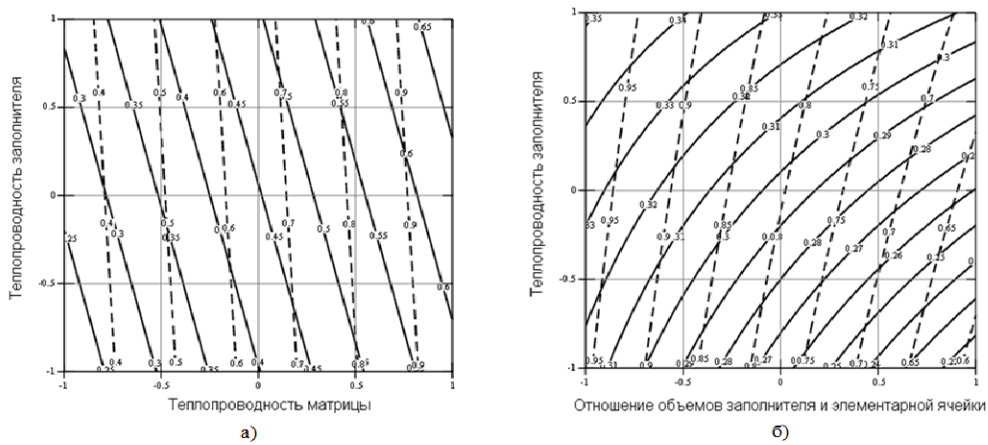


Рис. 3. Изолинии теплопроводности элементарной ячейки:
 а) — минимальный объем заполнителя, $R = -1$;
 — — максимальный объем заполнителя, $R = +1$.
 б) — минимальная теплопроводность матрицы;
 — — максимальная теплопроводность матрицы

Таблица 2

Коэффициенты теплопроводности элементарной ячейки по уравнениям (25), (26), (27) и численное решение методом конечных элементов (МКЭ)

Матрица	Заполнитель	Геометрический параметр		Объем	Температура, °C		Средняя величина теплового потока, Вт/м ²	Результаты расчета коэффициента теплопроводности, Вт/(м ⁰ C)					
		Матрица	Заполнитель		на теплой стороне	на холодной стороне		МКЭ	по уравнению (25)	по уравнению (26)	по уравнению (27)		
0	0	0	0,80	0,14	0,80	0,268	17,4	-38,7	30,9	0,551	0,530	0,555	0,569
0	-1	1	0,80	0,07	0,95	0,449	18,3	-39,1	22,8	0,397	0,378	0,403	0,408
0	1	-1	0,80	0,21	0,65	0,144	16,7	-38,4	37,1	0,673	0,652	0,676	0,687
-1	-1	-1	0,40	0,07	0,65	0,144	18,9	-39,2	18,3	0,315	0,296	0,314	0,317
-1	0	1	0,40	0,14	0,95	0,449	19,2	-39,4	15,1	0,258	0,240	0,258	0,269
1	0	-1	1,20	0,14	0,65	0,144	15,1	-37,8	51,4	0,972	0,954	0,985	0,995
1	1	1	1,20	0,21	0,95	0,449	16,6	-38,4	37,3	0,678	0,663	0,691	0,707
-1	1	0	0,40	0,21	0,80	0,268	18,8	-39,2	19,0	0,328	0,310	0,329	0,327
1	-1	0	1,20	0,07	0,80	0,268	16,1	-38,2	42,0	0,773	0,751	0,783	0,803
1	0	1	1,20	0,14	0,95	0,449	16,9	-38,5	35,1	0,634	0,614	0,644	0,660
-1	-1	0	0,40	0,07	0,80	0,268	19,2	-39,4	15,2	0,259	0,243	0,261	0,258
0	1	1	0,80	0,21	0,95	0,449	17,7	-38,8	28,2	0,499	0,475	0,499	0,511
-1	0	-1	0,40	0,14	0,65	0,144	18,7	-39,2	19,2	0,332	0,314	0,332	0,344
1	1	0	1,20	0,21	0,80	0,268	15,7	-38,1	44,9	0,835	0,817	0,846	0,872
0	-1	-1	0,80	0,07	0,65	0,144	16,9	-38,5	35,1	0,634	0,616	0,641	0,642

При минимальном отношении объема заполнителя к объему элементарной ячейки, равном 0,144, теплопроводность первого практически не оказывает влияния на теплопроводность системы в целом (рис. 3а). Наибольший темп снижения

теплопроводности элементарной ячейки наблюдается при снижении λ_r при низкой теплопроводности матрицы (рис. 3б).

Экстремумов рассматриваемой зависимости не наблюдается. Наименьшее расчетное значение теплопроводности при заданных уровнях варьирования, равное $\lambda = 0,211$ Вт/(м К), можно получить при $\lambda_m = -1$ (0,4Вт/(м К)), $\lambda_r = -1$ (0,07Вт/(м К)) и $R=1$.

С целью сопоставимости расчета теплопроводности по модели элементарной ячейки (рис. 4а) с моделью образца бетона с гексагональной в плане укладкой частиц, нами получено уравнение регрессии (28) для модели, представленной на рисунке 4б (4в):

$$\lambda = 0,593 + 0,267\lambda_m + 0,0265\lambda_p - 0,139R - 0,0826\lambda_m R + 0,016\lambda_p R. \quad (29)$$

$$\lambda = 0,032 + 0,917\lambda_m - 0,062\lambda_p - 0,029p + 0,017\lambda_m\lambda_p - 1,08\lambda_m p + 1,208\lambda_p p. \quad (30)$$

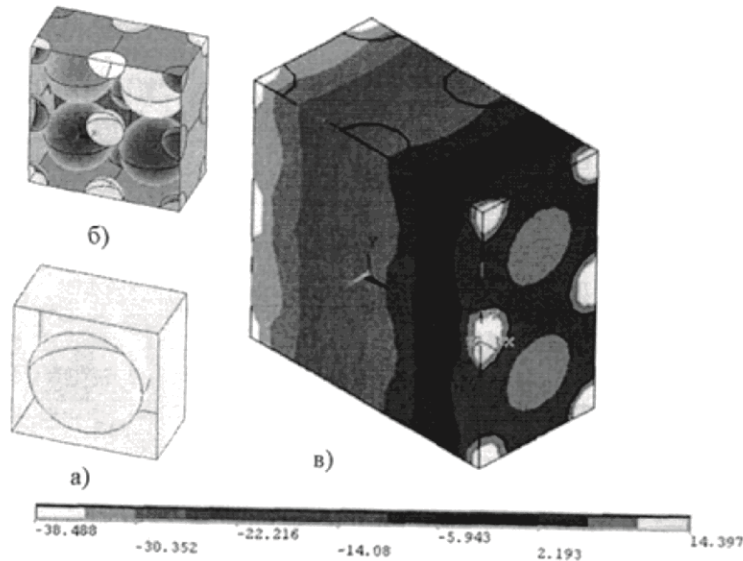


Рис. 4. Модель элементарной ячейки легкого бетона (а), модель легкого бетона (б) с гексагональной укладкой заполнителя и распределение температур в теле и на поверхности образца (в)

Сравнивая постоянные коэффициенты уравнений (25) и (29), нетрудно убедиться, что они одного порядка и имеют одинаковые знаки перед соответствующими переменными. Близость расчетных по уравнениям (25) и (29) значений теплопроводности хорошо иллюстрируется на рис. 5.

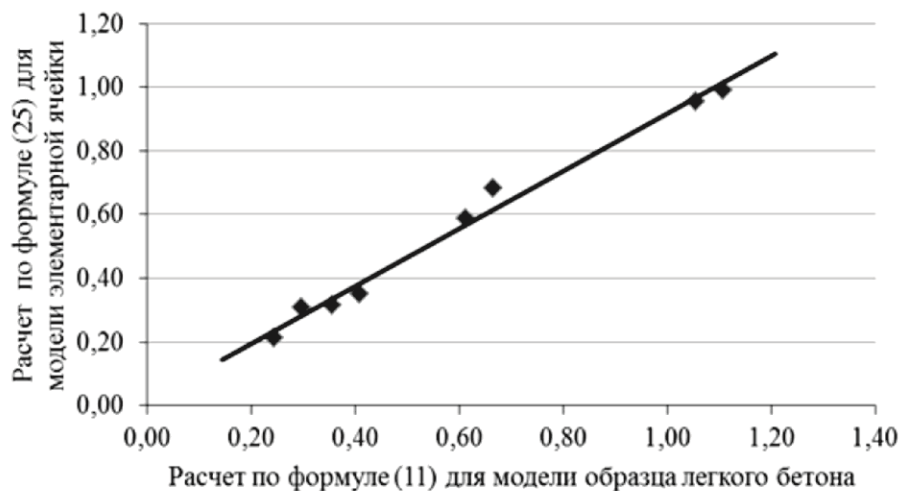


Рис. 5. Сравнение результатов расчета теплопроводности (Вт/м К) по формулам (25) и (29)

Таким образом, при теоретическом расчете теплопроводности сложной структуры легкого бетона можно использовать простейшую модель элементарной ячейки. Расчет теплопроводности легкого бетона по аналитическим формулам дает очень близкие результаты с расчетами методом конечных элементов. Следует отметить, что теплопроводность теплоизоляционного заполнителя в бетоне может изменяться и, что более вероятно, в большую сторону. Последнее обстоятельство может быть обусловлено проникновением теплопроводного цементного теста в поры заполнителя. Для получения надежных расчетных значений теплопроводности следует оценивать теплопроводность пористого заполнителя в бетоне. Для испытания на теплопроводность из растворной части одного замеса изготавливаются одновременно образцы раствора и бетона путем перемешивания растворной части с легким заполнителем. Значения коэффициентов теплопроводности заполнителя в бетоне можно получить расчетным путем по приведенным выше формулам.

Список литературы

1. Лыков А.В. Тепломассообмен (Справочник). – М.: Энергия, 1971. – 550 с.
2. Verma L.S., Shrotriya A.K., Singh R., Chaudhary D.R. Prediction and measurement of effective thermal conductivity of three-phase systems // J. Phys. D: Appl. Phys. 24, 1991. – P. 1515-1526.
3. Jagiwanram, Singh R. Effective thermal conductivity of highly porous two-phase systems // Applied Thermal Engineering 24, 2004. – P. 2727-2735.
4. Goual M.S., Bali A., Queneudec M. Effective thermal conductivity of clayey aerated concrete in the dry state: experimental results and modeling // J. Phys. D: Appl. Phys. 32, 1999. – P. 3041-3046.
5. Wang M., Pan N. Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials // Materials Science and Engineering R 63, 2008. – P. 1-30.
6. Hamilton R.L., Crosser O.K. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 1, 1962. – P. 187-191.
7. Гаврильев Р.И. Особенности изучения теплофизических свойств грунтов с крупнообломочными включениями // Инж. геология, 1986, № 5. – С. 60-71.
8. Гаврильев Р.И. Теоретические оценки теплопроводности сегрегационного льда // Научный журнал Криосфера Земли, т. XII, № 2, 2008. – С. 40-46.
9. Ицкович С.М., Чумаков Л.Д., Баженов Ю.М. Технология заполнителей бетона // Учеб. Пособие для строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 272 с.
10. Wong J.M., Glasser F.P., Imbabi M.S. Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction // Cement & Concrete Composites 29, 2007. – P. 647-655.
11. Кауфман Б.И. Теплопроводность строительных материалов. – М.: Государственное изд-во по строительству и архитектуре, 1955. – 157 с.

Nazirov R.A. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: nazirovr@rambler.ru

Volkov A.N. – post-graduate student

E-mail: volkov-sasha@yandex.ru

Fatkulina-Yaskova L.M. – post-graduate student

E-mail: lyudmila-fatkulina@yandex.ru

Civil Engineering Institute of the Siberian Federal University

The organization address: 660041, Russia, Krasnoyarsk, Svobodny st., 82

Modelling of the thermal conductivity of the lightweight concrete on the coarse aggregate**Resume**

The article presents a detailed analysis of the mathematical models for the determination of the thermal conductivity of two-phase systems. Such systems include lightweight concrete, in which large filler is considered as the dispersed phase in the sand cement matrix. The complexity of the calculation of thermal conductivity of such systems consists in the chaotic distribution of heat-insulating materials (large filler) in the volume of concrete. The calculation results have allowed to receive the regression equation of thermal conductivity of lightweight concrete and to quantify the impact of cement-sand mortar, large filler on the effective thermal conductivity of lightweight concrete. Examined some calculation models determining the thermodynamic characteristics of the material as the complex structure, and on the basis of the model of an «elementary cell». According to the results of theoretical calculations it was found that the determination of the material thermal conductivity of the complex structure is enough to reduce complex configuration of the material to «elementary cell». Such calculation method significantly allows to simplify the solution to a problem of definition of thermal conductivity of light concrete with chaotically distributed large filler of the various form.

Keywords: lightweight concrete on the coarse aggregate, thermal conductivity, analytical formulas, finite element method, unit cell.

References

1. Lykov A.V. Heat and Mass transfer (Handbook). – M., «Energy», 1971. – 550 p.
2. Verma L.S., Shrotriya A.K., Singh R., Chaudhary D.R. Prediction and measurement of effective thermal conductivity of three-phase systems // J. Phys. D: Appl. Phys. 24, 1991. – P. 1515-1526.
3. Jagiwanram, Singh R. Effective thermal conductivity of highly porous two-phase systems // Applied Thermal Engineering 24, 2004. – P. 2727-2735.
4. Goual M.S., Bali A., Queneudec M. Effective thermal conductivity of clayey aerated concrete in the dry state: experimental results and modeling // J. Phys. D: Appl. Phys. 32, 1999. – P. 3041-3046.
5. Wang M., Pan N. Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials // Materials Science and Engineering R 63, 2008. – P. 1-30.
6. Hamilton R.L., Crosser O.K. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 1, 1962. – P. 187-191.
7. Gavriliev R.I. Especially in studies of thermal properties of soils with coarse inclusions.// Engineering geology, № 5, 1986. – P. 60-71.
8. Gavriliev R.I. Theoretical estimates of the thermal conductivity of segregated ice // Scientific journal Earth Cryosphere, t. XII, № 2, 2008. – P. 40-46.
9. Itskovich S.M., Chumakov L.D., Bazhenov Y.M. Technology aggregates for concrete // Schoolbook for building university. – M.: High. school, 1991. – 272 p.
10. Wong J.M., Glasser F.P., Imbabi M.S. Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction // Cement & Concrete Composites 29, 2007. – P. 647-655.
11. Kaufman B.I. Thermal conductivity of building materials. – M.: State Publishing House for Construction and Architecture, 1955. – 157 p.