

УДК 517.28+536.491+699.86

А. Д. Жуков, Т. В. Смирнова, А. В. Чугунков

ПЕРЕНОС ТЕПЛА В ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

Приведены результаты изучения закономерностей переноса тепла в материалах, имеющих замкнутую пористость и сравнительно высокое сопротивление воздухопроницанию. Рассматривается кондуктивный перенос через минеральную матрицу, перенос за счет фильтрации паровоздушной смеси и ее конвекции в ячейке.

К л ю ч е в ы е с л о в а: теплоперенос, ячеистые бетоны, минеральная матрица, ячейка, теплопроводность.

The authors present the results of study of regularities of heat transfer in materials with closed porosity and high resistance to air permeability. The conductive transfer through the mineral matrix, the transfer by means of filtration of air-vapor mixture and its convection in cells is considered.

К e y w o r d s: heat transfer, cellular concrete, mineral matrix, cell, thermal conductivity.

Закономерности теплопереноса. Значимыми для описания процесса переноса тепла в ячеистых бетонах являются следующие структурные элементы материала.

Во-первых, это минеральная матрица — затвердевший цементный камень или мелкозернистый бетон. Свойства матрицы определяются ее структурой и могут рассматриваться как постоянная величина независимо от условий теплопереноса. В расчетах принимается, что теплопроводность минеральной матрицы и ее фильтрационные характеристики (воздухо- и паропроницаемость) являются постоянными величинами.

Во-вторых, это ячейки, заполненные смесью газов. В ячейках присутствуют: водород (продукт газообразования), воздух (фильтрующийся извне и, как более тяжелая смесь газов, вытесняющая водород) и пары воды (испаряемые из минеральной матрицы и находящиеся в равновесном состоянии с окружающей средой).

Система, с точки зрения теплофизических показателей, крайне нестабильна. При отрицательных температурах пары воды замерзают и кристаллизуются в виде инея на внутренних поверхностях ячеек, изменяя тем самым и теплопроводящее сечение минеральной матрицы, и теплофизические свойства газовой смеси. В интервале температур от 0 до 7 °С возможна конденсация паров воды с теми же последствиями. При температурах более 30...60 °С (в зависимости от диаметров ячеек) в ячейках начинает развиваться *внутренняя конвекция*.

Потоки тепла в материале. Рассмотрим формирование потоков тепла в ячеистой структуре в интервале от 7 до 28 °С. Процесс не осложнен конденсацией, внутренней конвекцией и излучением. В этом случае определяющим является поток вдоль минеральной матрицы.

Кондуктивная составляющая потока тепла q_k определяется теплопроводностью матрицы λ_m и градиентом температур ∇t :

$$q_k = \lambda \nabla t.$$

Процесс протекает во времени и, учитывая высокую теплопроводность минеральной матрицы, реализуется достаточно быстро. Геометрической характеристикой этого потока является толщина межячейковой перегородки в ее наименьшем сечении $d_{п}$. Стандартное двухмерное температурное поле может быть определено путем численного решения нестационарного уравнения теплопроводности. Уравнение решается в конечных разностях по явной схеме:

$$c_m \rho_m \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2},$$

где c_m — удельная теплоемкость, Дж/(кг · °С); ρ_m — плотность, кг/м³; λ_x , λ_y — расчетные коэффициенты теплопроводности по соответствующим направлениям, Вт/мК; t — температура, °С; x , y — координаты, м; τ — время, с.

Рассмотрим элементарную ячейку (рис. 1, а). Для того чтобы началась конвекция, газ (паровоздушная смесь) должен обладать достаточной кинетической энергией. В смеси газов, находящейся в ячейке, присутствуют двухатомные (H_2 , O_2 , N_2) и многоатомные (CO_2 , CO) газы, а также многоатомные пары воды (H_2O). Для многоатомных газов их кинетическая энергия определяется формулой

$$E_k = 3 \frac{m_b}{\mu_b} R(t + 273).$$

В изучаемом интервале температур кинетическая энергия газа незначительна, а конвекция невелика. В этом случае *поток тепла внутрь ячейки* $q_{я}$ пропорционален разности температур и теплоемкости паровоздушной смеси, находящейся в ячейке:

$$q_{я} = m_b c_b (t_2 - t_1).$$

То есть имеет место аккумуляция тепла объемом ячейки, а его перенос начинается с повышением кинетической энергии газа и развитием конвекции.

Перегородки между ячейками имеют развитую микрокапиллярную систему (меньшую у ячеистого бетона, твердевшего в условиях напряженного состояния, и большую у традиционных бетонов). Наличие этих капилляров способствует определенной паро- и воздухопроницаемости ячеистого бетона.

За счет *фильтрации паровоздушной смеси* сквозь перегородки ячеек формируется дополнительный поток тепла $q_{п}$. Наибольшей теплоемкостью среди всех компонентов фильтрующейся газовой смеси обладают пары воды, поэтому именно молярный влагоперенос (за счет градиента влажности ∇W) становится определяющей характеристикой этого потока:

$$q_{п} = \alpha_{ф} \rho_b c_b \nabla W,$$

где $\alpha_{ф}$ — коэффициент фильтрационного переноса вещества.

Процессы влагопереноса более инерционны, чем процессы теплопереноса, поэтому температурное поле в материале можно рассматривать как стационарное, а уравнение одномерного перемещения влаги в конструкции имеет вид

$$\gamma \frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial W}{\partial x} + \mu \frac{\partial(\phi p_s)}{\partial x} \right),$$

где W — влажность материала, кг/кг; p_s — давление насыщенного водяного пара, зависящее от температуры, Па; x — пространственная координата, м; β — коэффициент влагопроводности, кг/(м·ч); γ — плотность ячеистого бетона, кг/м³; ϕ — относительная влажность воздуха в ячейках материала, доли ед.; τ — время, ч; μ — коэффициент паропроницаемости, кг/(м·ч·Па).

Поток влаги через материал всюду непрерывен во времени. При влажности ниже максимальной сорбционной величина относительной влажности воздуха в ячейках ϕ связана с влажностью материала W при помощи изотермы равновесного влагосодержания, т. е. изотермы сорбции и десорбции водяного пара материалом.

В интервале температур от 6 до 30 °С поток тепла за счет излучения незначителен. Этот поток пропорционален коэффициенту лучеиспускания и четвертой степени температуры $(t + 273)^4$. Эта составляющая теплопереноса проявляется только при повышенных температурах, которые не являются рабочими для ячеистых строительных бетонов.

Состояние газа внутри ячейки. Теплоизоляционные материалы характеризуются высокопористой структурой, поэтому состояние газообразной фазы в ячейке самым непосредственным образом влияет на теплопроводность материала.

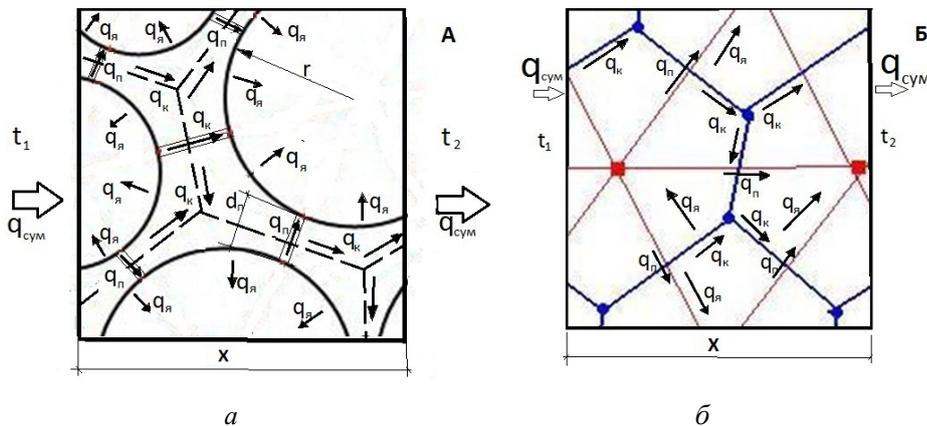


Рис. 1. Структура тепловых потоков: a — геометрический объем; b — модельная структура: $q_{\text{сум}}$ — общий поток тепла; $q_{\text{к}}$ — кондуктивная составляющая потока тепла; $q_{\text{н}}$ — поток тепла за счет фильтрации паровоздушной смеси сквозь перегородки ячеек; $q_{\text{я}}$ — поток тепла внутрь ячейки; t_1 , t_2 — температуры на поверхностях рассматриваемого объема; X — геометрическая характеристика объема

Состояние газа характеризуется двумя характеристиками: энергией и подвижностью. В комнатных условиях (температура 18...20 °С и давление 0,1 МПа (1 атм)) газ в ячейке практически неподвижен и его теплопроводность близка к теплопроводности покоящегося воздуха (0,018 Вт/(м·К)). Единственным способом передачи тепла является кондуктивный перенос через минеральную матрицу. При нагреве газа в ячейке его теплопроводность начинает расти вплоть до «тепловой прозрачности» материала.

Отдельно взятая ячейка (рис. 1, 2) может рассматриваться как автономная система с определенными особенностями взаимодействия с окружением. Эти особенности, как и состояние самой системы, подчиняются законам статистической физики.

Оценка энергетического состояния. Рассмотрим систему A , включающую: выделенную ячейку в структуре газо- или пенобетона, заполненную газом (водородом и паровоздушной смесью), и минеральную матрицу, окружающую эту ячейку. Весь массив ячеистого бетона, окружающий систему A , рассматривается как внешний объем, находящийся с системой в состоянии тепло- и массообмена. Задача — изучение макросвойств системы A и оценка влияния этих макросвойств и на молекулярно-кинетические характеристики, и на теплопроводность газа, находящегося в ячейке.

Начальное состояние характеризуется температурой материала 10...12 °С. Газовая фаза в ячейке в этом случае находится в состоянии равновесия. Ее макросвойства практически равны своим средним значениям. Энергия постоянна, и количество молекул газа также неизменно ($E=\text{const}$, $N=\text{const}$) во времени. Система A обменивается и энергией, и числом частиц с соседними системами, для нее характерно состояние $dE \neq 0$ и $dN \neq 0$.

Физические (и химические тоже) свойства рассматриваемой системы не могут зависеть ни от чего иного, кроме как от внешних условий, в которых находится эта система, и свойств частиц, из которых она состоит. Только использование правильных моделей, адекватно отражающих свойства системы в данных физических условиях, позволяет получать на основе статистического метода такие результаты, которые хорошо соответствуют опыту.

Ячейка с газом не является замкнутой системой (строго говоря, таковых в природе вообще нет). Изучаемую систему можно рассматривать как макроскопическую в окружении среды с постоянными характеристиками, с которой возможен обмен частицами и энергией.

Энергия изучаемой системы E зависит от количества частиц (в данном случае молекул газа) n , включенных в систему на данный отрезок времени. Во-вторых, энергия системы является функцией температуры.

Часть изменения полной энергии, направленной на нагрев системы, принято называть теплотой dQ . А закон сохранения (превращения) энергии может быть представлен зависимостью, получившей название первого закона термодинамики или принципа энергии:

$$dE = dW + dQ.$$

Только энергия является свойством системы, тогда как работа и теплота — характеристики процесса изменения энергии, и поэтому для их определения надо знать не только начальное и конечное состояние системы, но и все промежуточные состояния процесса. Тепловой эффект процесса определяется изменением энергии (или энтальпии), что составляет суть известного в термодинамике закона Гесса.

Всякая равновесная система, помимо энергии и энтальпии (теплосодержания), характеризуется еще одной функцией состояния — энтропией, равной $dS = \frac{dQ}{T}$. Полное изменение энергии макроскопической системы можно

представить в виде соотношения, лежащего в основе второго закона термодинамики или принципа энтропии

$$dE = -Ada + TdS.$$

Полное изменение внутренней энергии макроскопической системы определяется изменением внешнего параметра a и изменением энтропии S . Размерности энтропии: кал/(г·град); энергетические единицы (э. е.) или Дж/(моль·К).

При повышении температуры в ячейке и увеличении энергетического потенциала газа в рассматриваемой системе начинают протекать процессы, обусловленные конвекцией газа в ячейке [1].

Конвекция газа в ячейке. Причиной начала движения (циркуляции) воздуха внутри ячейки являются три фактора. Во-первых, фильтрационный поток через межячейковую перегородку (эффект лопастей мельницы — проходящий поток газа «раскручивает» газ в ячейке). Во-вторых, разница температур (давлений, плотностей) газовых смесей между центром и периферией в условиях гравитационного поля. В-третьих, энергия (и энтропия), которой должен обладать газ (паровоздушная смесь), величина которой пропорциональна его температуре.

В общем виде можно записать, что ротор потоков газа в ячейке $\text{rot}L$ пропорционален приходящему потоку газа $\text{div}q_m$ и перепаду температур между центром ячейки и периферией (t/r):

$$\text{rot}L \sim \text{div}q_m + cr \frac{\partial t}{\partial r},$$

где r — радиус (геометрическая характеристика) ячейки, м; c — теплоемкость, Дж/(кг·°С).

По мере нагрева материала за счет кондуктивного теплопереноса q_k матрица прогревается до температуры t_1 , тогда как в центре ячейки еще сохраняется температура t_2 . Возникает перепад температур, градиент которого может быть выражен зависимостью $(t_1 - t_2)/r$. Очевидно, что при невысоких температурах и низкой теплопроводности газа чем больше размер ячейки (больше r), тем значительнее перепад температур $(t_1 - t_2)$ и тем значительнее должны быть конвективные потоки.

Соответственно, по периметру ячейки газ (паровоздушная смесь) прогреет сильнее, его плотность меньше и начинают формироваться конвективные потоки: более тяжелый газ из центральных областей опускается по направлению действия сил гравитации и выдавливает более легкий газ в центральные области. Постоянное повышение температуры t_2 способствует стабилизации вихрей. Это приводит к увеличению коэффициента теплообмена между стенкой ячейки и газом (паровоздушной смесью), который возрастает пропорционально корню квадратному от скорости потока газа [2]. Увеличение коэффициента теплообмена снижает термическое сопротивление газа, находящегося в ячейке, что приводит к увеличению потока тепла сквозь ячейку $q'_я$.

В результате процесс теплопередачи становится производной трех потоков тепла (рис. 2): кондуктивная составляющая остается определяющей, фор-

мируется конвективная составляющая (за счет циркуляции воздуха в ячейке) и сохраняется фильтрационный поток тепла, направление которого совпадает с направлением переноса тепла конвекцией.

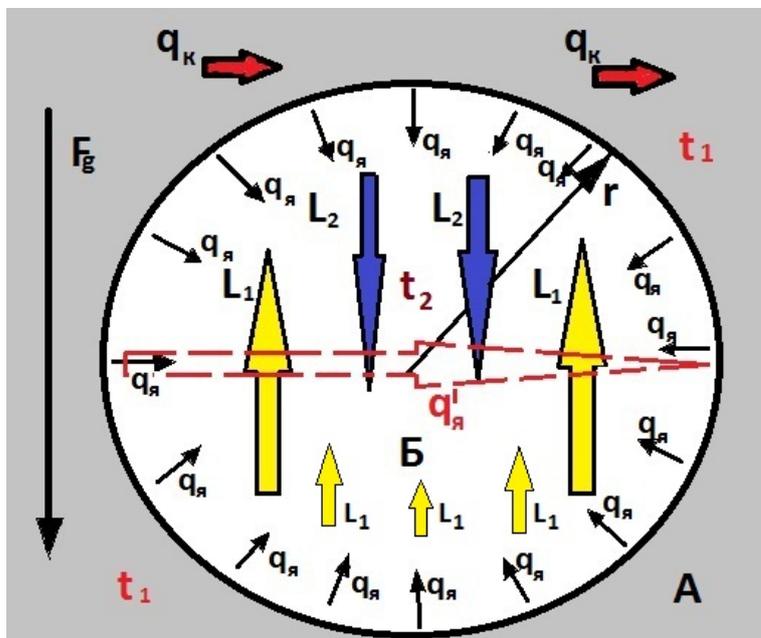


Рис. 2. Схема формирования конвективных потоков внутри ячейки (фильтрационный поток тепла совпадает по направлению с потоком $q'_я$): А — стенка ячейки; Б — ячейка; r — радиус ячейки; q_k — кондуктивная составляющая потока тепла; $q_я$ — поток тепла внутрь ячейки; $q'_я$ — поток тепла «сквозь» ячейку; L_1 — направление потоков «теплого» воздуха; L_2 — направление потоков «холодного» воздуха; t_1 — температура минеральной матрицы; t_2 — температура в центре ячейки ($t_2 < t_1$); F_g — направление действия гравитационной силы

Резюмируя проведенный анализ, можно сказать, что теплопроводность газа, находящегося в ячейке, зависит от следующих макросвойств.

Во-первых, это свойства самого газа, находящегося в ячейке. Эти свойства непостоянны и зависят от состава газа. В начале процесса в ячейке содержится водород, который имеет низкую молекулярную массу и в процессе диффузии замещается более тяжелым воздухом. Содержание паров воды в ячейке определяется состоянием равновесия (сорбции-десорбции); оно изменяется по мере нагрева материала за счет испарения воды из минеральной матрицы и за счет диффузии пара через перегородки ячейки.

Во-вторых, это температура. С одной стороны, температура повышает энергию газа, что увеличивает и скорости частиц, и число соударений, что снижает теплопроводность. С другой стороны, в ячейках формируются градиенты температур, направленные от периферии к центру, что способствует формированию конвективных потоков. Здесь становится важным размер ячеек.

Чтобы оценить влияние макросвойств на теплопроводность газа, находящегося в ячейке, учтем, что $\lambda \sim \sqrt{t-t_0}$ (следует из молекулярно-кинетических свойств), что $\lambda \sim r \sqrt{v}$, а $v \sim (t-t_0)$ (следует из анализа конвекции).

Общее выражение для теплопроводности газа имеет вид

$$\lambda_{gr} = \lambda_{0r} (\beta_t + \beta_L r) \sqrt{(t - t_0)},$$

где $\beta_t, \beta_L r$ — коэффициенты, определяющие зависимость теплопроводности от температуры (с учетом изменения молекулярного состава газа) и от внутренней конвекции в ячейке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жуков А. Д., Чугунков А. В., Рудницкая В. А. Решение технологических задач методами математического моделирования. М. : МГСУ, 2011. 134 с.

2. Степухович А. Д., Улицкий В. А. Лекции по статистической физике. М. : Высш. шк., 1978. 150 с.

1. Zhukov A. D., Chugunkov A. V., Rudnitskaya V. A. Reshenie tekhnologicheskikh zadach metodami matematicheskogo modelirovaniya. M. : MGSU, 2011. 134 s.

2. Stepukhovich A. D., Ulitskiy V. A. Lektsii po statisticheskoy fizike. M. : Vyssh. shk., 1978. 150 s.

© Жуков А. Д., Смирнова Т. В., Чугунков А. В., 2012

Поступила в редакцию
в ноябре 2012 г.

Ссылка для цитирования:

Жуков А. Д., Смирнова Т. В., Чугунков А. В. Перенос тепла в высокопористых материалах // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 3 (23).