

УДК 517.28+536.491+699.86

*А.Д. Жуков, А.В. Чугунков,
П.К. Гудков***ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА
И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ЕГО СВОЙСТВ**

Универсальная модель формируется посредством формализации структуры ячеистого бетона: от реальной до модельной. Формализация основывается на ряде последовательных предположений, изложенных в статье, с проверкой адекватности полученных результатов.

С использованием универсальной модели рассмотрены возможности прогнозирования свойств ячеистого бетона. Определяющей характеристикой принята его пористость. Получены аналитические зависимости, связывающие пористость, особенности структуры и свойства минеральной матрицы с прочностью и теплопроводностью ячеистого бетона. Отдельно решается задача о теплопроводности влажного материала. По результатам моделирования осуществлена графическая интерпретация и построена объединенная номограмма.

Ключевые слова: моделирование, структура, ячеистый бетон, матрица, теплопроводность, пористость, прочность.

Модели структуры ячеистых материалов связаны с их функциональными свойствами и подходят для описания их прочностных характеристик либо теплофизических свойств. Разработка гипотетического материала предполагает создание универсальной модели. Создание универсальной модели ячеистых материалов может быть основано на использовании принципов элементарного объема [1, 2] и правилах, сформулированных для характеристик не изотропных (хаотических) структур [3].

Ячеистая структура материалов может быть формализована с помощью моделей с использованием шаров с различной упаковкой и различными прослойками между ними. Подобные модели реализованы применительно к различным структурам: крупнопористому бетону, ячеистым материалам и минеральным смесям [3], грунтам [4]. Иногда модели рассматриваются как трехмерные, иногда используется их двумерная проекция (на плоскость). Проекция на плоскость более наглядна, но она не полностью отражает структуру связей между элементами модели.

Основой любого моделирования, в т.ч. и создания модели структуры материала (анизотропной среды и пр.) является последовательная формализация реальных структур (рис. 1). Эта формализация основывается на ряде последовательных предположений.

1-м шагом является предположение, что структура состоит из регулярных (повторяющихся элементов), а элементы, слагающие структуру, имеют форму, поддающуюся геометрическому описанию. Одним из вариантов пра-

*A.D. Zhukov,
A.V. Chugunkov,
P.K. Gudkov***GEOMETRICAL MODEL
AND FORECASTING
PROPERTIES OF FOAM
MORTAR**

General model is formed by formalization of foam mortar structure: from realistic to model. Formalization based on number of successive hypotheses which take into account validity check of obtained results which are enounced in the article.

The predictability of foam mortar properties are reviewed in the article using the general model. As a critical characteristic of foam mortar was adopted pinhole rating. The analytic dependence relating to the pinhole rating, structural features, properties of mineral matrix with durability and thermal conductivity of foam mortar are obtaining. Article presents the separately solved task about thermal conductivity of wet material. According to the modeling results accomplished the graphical interpretation and plotted the pooled nomogram.

Key words: modeling, structure, foam mortar, matrix, thermal conductivity, pinhole rating, strength.

вильной структуры являются частицы округлой формы (сферической, эллиптической и им подобной).

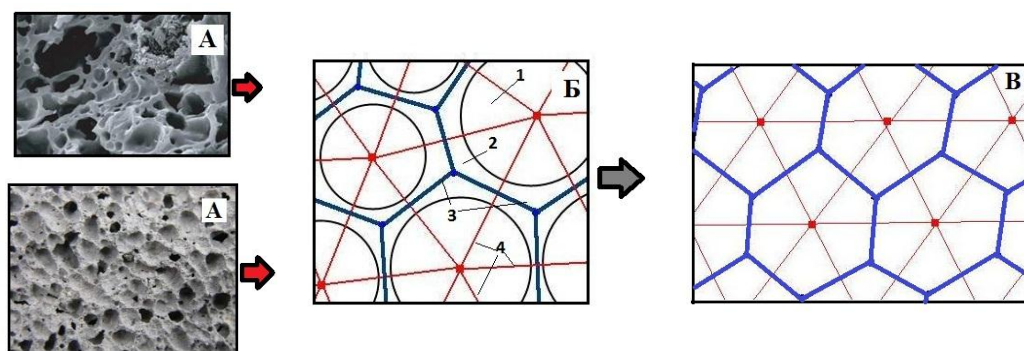


Рис. 1. Формализация структуры ячеистого бетона: А – реальная структура; Б – модель пористости; В – формализованная структура: 1 – поры (ячейки) в материале; 2 – межпоровые перегородки; 3 – расположение осей каркаса (минеральной матрицы); 4 – расположение осей конвективных потоков

Ячейки сами по себе – регулярные элементы; геометрическая форма их близка к эллиптической (эллипсоид, шар); неровность поверхности может быть учтена коэффициентами формы и шероховатости, сообщение между ячейками – введением капиллярной проницаемости перегородок.

2-м шагом является «присвоение» элементам структуры определенных свойств, на основе чего осуществляется интегральная оценка свойств системы в целом. На этом этапе осуществляется построение математических структурных моделей. Возможно использование систем дифференциальных уравнений, статистических решений. Единственное, о чем нельзя забывать, реальные структуры не являются однородными и поэтому оперировать таким понятием как поле (подразумевающим непрерывность и присутствие свойств в каждой точке) надо с известной осторожностью.

Проецируя на плоскость ячеистую структуру можно выделить две системы взаимосвязей. *Первая система связей* соединяет центры ячеек (рис. 1, б). Эти «красные линии» являются приоритетными направлениями распространения конвективных потоков тепла (по системам сообщающихся капилляров) и потоков тепла излучением; возможные направления паро- и воздухопроницаемости, насыщение материала влагой.

Вторая система («синие линии») проходит через минеральную матрицу и соединяет центры соприкосновения наибольшего количества ячеек (четырёх – в трехмерной модели и трех – в двухмерной модели). Этим точкам соответствуют наибольшие сечения минеральной матрицы, что позволяет рассматривать синие линии как несущий каркас («скелет») материала. С другой стороны, те же «синие линии» можно рассматривать как направления кондуктивных потоков тепла. Характеристикой структуры являются: диаметр ячеек, их распределение по размерам, толщины перегородок (матрицы) в наименьшем сечении, коэффициенты шероховатости поверхности, эллиптичности ячеек, воздухопроницаемости матрицы.

3-м шагом является проверка адекватности моделей реальным процессам с определением рамок в пределах, которых модели сохраняют свою достоверность.

Модель рассматривается на двух уровнях: идеальном и классическом. *Идеальная модель* характеризуется постоянством всех параметров: как геометрических, так и характеристик свойств. В этом случае геометрической интерпретацией модели является сетка из равносторонних треугольников.

Классическая модель характеризуется одномодальным распределением каждого параметра. В этом случае во все расчетные формулы вводится эффективное значение параметра (характеризующего значения геометрической структуры или свойство) и коэффициент вариации. Для решения технических задач вводятся характеристики свойств: прочность матрицы при сжатии, теплопроводность матрицы и воздуха, диаметр ячейки. Подобная модель позволяет, во-первых, оценить геометрические свойства изделия, во-вторых, является отражением реальной структуры материала («хаос» задается введением нормального распределения всех геометрических характеристик), поэтому, задавая геометрическим элементам определенные свойства можно моделировать свойства изделий: прочность при сжатии и на отрыв слоев, теплопроводность, газопроницаемость, изучать механизм эрозии волокон. В-третьих, модель может использоваться для изучения закономерностей формирования ячеистой структуры материала.

В геометрической (логической) модели объединяются три параметра, в наибольшей степени характеризующие свойства материала: его пористость, прочность при сжатии и теплопроводность. Причем прочность рассматривается как функция пористости и прочностных характеристик минеральной матрицы, а теплопроводность – как функция пористости, теплопроводности минеральной матрицы и теплопроводности воздуха, находящегося в ячейках структуры.

Пористость ячеистого бетона. Пористость характеризует долю (процентное содержание) газовой (воздушной) фазы в объеме материала. Принято подразделять пористость на истинную, кажущуюся и закрытую.

Истинная (общая) пористость $\Pi_{и}$ характеризует отношение общего объема всех пор к объему материала (в долях или процентах):

$$\Pi_{и} = \Pi_{з} + \Pi_{к};$$

$$\Pi_{и} = \left(\frac{\rho - m_v}{\rho} \right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{m_v}{\rho} \right) \cdot 100,$$

где m_v – средняя плотность материала; ρ – плотность минеральной матрицы.

Кажущаяся (открытая) пористость ($\Pi_{к}$) – отношение общего объема сообщающихся пор к объему материала. *Закрытая пористость* ($\Pi_{з}$) характеризует объем закрытых пор в объеме материала. Общая пористость ячеистого бетона составляет 85...90 %, в т.ч. доля открытой и закрытой пористости составляет 40...45 %.

Истинную пористость теплоизоляционных материалов определяют обычно расчетным путем исходя из значений истинной и средней плотности материала. Открытую пористость оценивают экспериментальными методами по объему пор, заполняемых водой. Закрытую пористость рассчитывают по показателям истинной и открытой пористости.

Объем истинной пористости зависит от содержания в материале твердой фазы, которая определяет механические и в значительной степени эксплуатационные свойства изделий. Поэтому превышение рациональных значений общей пористости приводит к резкому снижению прочностных и увеличению деформативных показателей материала.

Размер пор оказывает большое влияние на теплопроводность и несущую способность материала. Необходимо стремиться к минимальным размерам пор. Однако при этом снижается толщина межпоровой перегородки, что должно учитываться при оптимизации этого параметра. Снижения размера пор достигают: регулированием процессов поризации и реологических свойств массы, понижением дисперсности твердых составляющих.

Теплопроводность характеризуется количеством теплоты, Дж, проходящей в течение 1 ч через слой материала толщиной 1 м, площадью 1 м², при разности температур на поверхностях в 1 К (1 °С).

Эффективная теплопроводность любой хаотической структуры не изменится, если конкретная картина «хаоса» будет заменена другой, ей адекватной, т.е. сохранится изотропность системы, ее устойчивость, а концентрации компонент останутся неизменными. Вероятность появления упорядоченной структуры, ничтожно мала, но равна вероятности появления любой другой хаотической структуры. Упорядоченная структура является частным случаем хаотической, и свойства этих структур будут одинаковы, если соблюдены условия адекватности.

Использование модели (рис. 1) и методики расчета термического сопротивления неоднородной конструкции [5] позволяет выразить теплопроводность ячеистого бетона λ_B через его пористость и теплопроводности минеральной матрицы $\lambda_{м.м}$ и находящегося в ячейках газа $\lambda_я$.

Расчет основан на следующем предположении: условия аддитивности (сложения). В стационарном процессе ($\nabla t = \text{const}$, а $\nabla^2 t = 0$), поток тепла q_0 через слой ячеистого материала толщиной δ складывается из потока тепла через минеральную матрицу $q_{м.м}$ и через заключенный в ячейках структуры газ $q_я$:

$$q_0 = q_{м.м} + q_я.$$

В соответствии с уравнением Фурье поток тепла в единицу времени определяется следующей зависимостью: $q = \frac{\lambda}{\delta} F \nabla t$.

Осью минеральной матрицы является трехмерная кривая второго порядка, канонический вид которой представляет собой множество точек максимально удаленных от центров четырех контактирующих между собой (через минеральную прослойку) ячеек. Соответственно, путь, который проходит тепло через матрицу, увеличивается именно за счет этой кривизны, а коэффициент 0,86 $\left(\text{или } \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$ и учитывает трехмерную геометрию (кривизну) минеральной матрицы.

С учетом геометрических особенностей модельной структуры, уравнения Фурье и условия аддитивности потока получаем формулу для теплопроводности:

$$\lambda_0 = 0,86 \frac{F_{м.м}}{F_0} \lambda_{м.м} + \frac{F_я}{F_я} \lambda_я = 0,86(1 - 0,01\Pi_и) \lambda_{м.м} + 0,01\Pi_и \lambda_я.$$

Теплопроводность минеральной матрицы ($\lambda_{м.м}$) – это теплопроводность мелкозернистого бетона плотностью 2000...2200 кг/м³, которая может рассматриваться как постоянная величина. В расчетах $\lambda_{м.м}$ принимается равной 0,72...0,76 Вт/м·К. Теплопроводность газа в ячейке $\lambda_я$ зависит от свойств газа (газовой или паровоздушной смеси) и температуры и влажности материала.

Среди газов резко выделяются своей теплопроводностью, которая в 5...10 раз больше, чем у других газов, гелий и водород. Молекулы этих газов обладают малой массой, а, следовательно, имеют большую среднюю скорость перемещения. В ячеистых бетонах газообразование происходит за счет выделения водорода. Поэтому на ранних стадиях теплопроводность его выше, чем у аналогов. Теплопроводность газовых смесей не может быть

определена по закону аддитивности, ее определяют опытным путем. Для удобства использования формула для теплопроводности представлена в номографическом виде (рис. 2, сектор I, III и IV).

Влажностное состояние. При увеличении влажности материала до равновесной происходит насыщение газообразной фазы парами воды (это ведет к увеличению λ_a), и начинается конденсация влаги в виде тонких пленок на внутренней поверхности ячеек и в сохранившихся капиллярах минеральной матрицы. Пленочная конденсация ведет к увеличению теплопроводящего сечения материала. При заполнении ячеек свободно водой этот процесс усиливается.

Влажностное состояние очень существенно влияет на теплопроводность и звукопоглощение ТИМ. В общем случае теплопроводность влажного материала определяют по формуле

$$\lambda_w = \lambda_0 + \beta_w W,$$

где β_w – прирост теплопроводности на 1 % объемной влажности; W – объемная влажность материала.

Значение β_w зависит от общей пористости и насыщения материала влагой. По мере снижения средней плотности величина β_w возрастает. Например, для газобетона бетона плотностью 200 кг/м³ – $\beta_w = 0,0081$; 300 кг/м³ – $\beta_w = 0,0076$; 400 кг/м³ – $\beta_w = 0,0071$; с плотностью 500 кг/м³ – 0,0066; с плотностью 600 кг/м³ – 0,0062.

Повышение влажности наиболее отрицательно сказывается на теплопроводности эффективных ТИМ. Рост теплопроводности с повышением влажности имеет линейный характер и значения β_w при положительных температурах вдвое ниже, чем при отрицательных. Однако теплопроводность линейно увеличивается с повышением влажности лишь на ранних стадиях увлажнения: до 10...15 % объемной влажности. Связано это с характером распределения воды (обводнением) в материалах по мере их водонасыщения. Уже при малом количестве воды в теле материала возможно образование водных термических мостиков в местах наибольшего сужения пор и трещин, что приводит к ощутимому повышению теплопроводности материала в сравнении с сухим состоянием. Дальнейшее повышение влажности в меньшей степени сказывается на увеличении теплопроводности теплоизоляции.

На теплопередачу большое влияние оказывает температура, при которой эксплуатируется влажное изделие. Объясняется это тем, что вода, находящаяся в материале в воздушных порах, заполняет их не полностью. Поэтому в порах одновременно присутствуют воздух, вода и водяной пар. Передача тепла через такие поры осуществляется теплопроводностью воздуха, излучением от стенок пор, конвекцией, проводимостью воды и диффузией паров воды в воздухе. Последний фактор длительное время не принимали во внимание, хотя вода при нагревании ведет себя не как обычная составляющая материала, а как теплоноситель, которому свойственно испаряться и конденсироваться. Поскольку противоположные поверхности пор имеют разную температуру, возникает разница давлений насыщенных паров между этими поверхностями. В результате пары диффундируют от более нагретой стенки к холодной, где и конденсируются. Затем конденсированная вода переносится по системе капилляров в другую пору на холодную сторону стенки.

Ниже 60 °С теплопередача осуществляется в значительной мере за счет теплопроводности воды. В этом случае повышение содержания воды в материале увеличивает его теплопроводность. Около 60 °С количество тепла, передаваемого за диффузии паров и проводимости жидкости, будет одина-

ковым. В этом случае увеличение влагосодержания будет вызывать повышение теплопроводности до тех пор, пока воды в материале станет достаточно для насыщения содержащегося в ней воздуха и для смачивания всех поверхностей пор, капилляров и трещин. Дальнейший рост влагосодержания не влияет существенно на теплопроводность.

Свыше 60 °С основным фактором теплопередачи является теплопроводность посредством диффузии водяных паров. Максимальные значения теплопередачи достигаются, когда содержащейся в материале влаги будет достаточно для смачивания всех поверхностей и, следовательно, насыщения водяными парами воздуха, находящегося в материале. С дальнейшим увеличением влагосодержания воды насыщенный воздух из ряда пор вытесняется водой, и теплопроводность материала снижается.

При полном насыщении водой теплопроводность ячеистого бетона зависит только от теплопроводности самой матрицы и теплопроводности воды (рис. 3, сектор IV).

Прочность ячеистого бетона на сжатие определяется как прочностными характеристиками минеральной матрицы (мелкозернистого бетона с молотым заполнителем), так и его пористостью. Для определения взаимосвязи между пористостью ячеистого бетона, его средней плотностью и прочностью при сжатии используется трехмерный вариант геометрической модели. В этом случае внешняя нагрузка воспринимается системой, работающей как ферма (в каждой точке соединяются четыре стрелы и нагрузка от верхнего передается на три нижних) [3]. Поэтому коэффициент структуры равен

$$0,289 \left(\frac{\sqrt{3}}{2 \cdot 3} = \frac{\sqrt{3}}{6} = 0,289 \right),$$

а зависимость прочности ячеистого бетона от его пористости и прочности минеральной матрицы представлена формулой

$$R_0 = 0,289(1 - \Pi_{\text{п}}) R_{\text{м.м.}}$$

Результаты расчета с использованием этой формулы сведены в номограмму (рис. 2, секторы I и II).

Универсальная номограмма, приведенная на рис. 2, позволяет определить расчетным путем значения плотности ячеистого бетона его теплопроводности и прочности как функций его пористости.

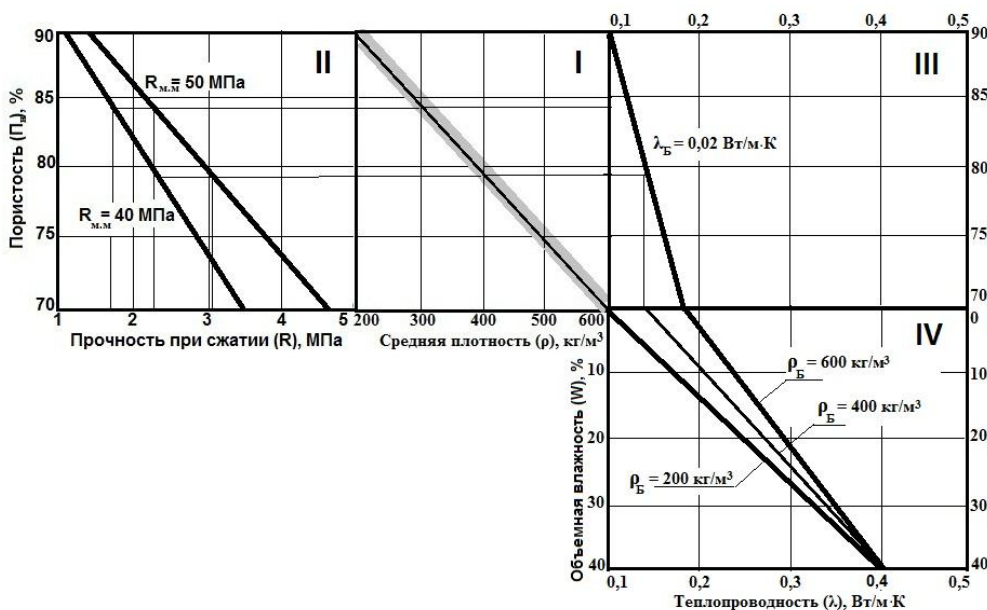


Рис. 2. Номограмма определения свойств ячеистого бетона с использованием универсальной модели

В секторе I номограммы устанавливается взаимосвязь между пористостью ячеистого бетона и его средней плотностью. В II секторе номограммы устанавливается зависимость между прочностью ячеистого бетона и его пористостью при различных прочностях минеральной матрицы $R_{м.м.}$. Результаты расчета соответствуют экспериментальным данным. В секторе III – между пористостью и теплопроводностью при различных значениях теплопроводности газа в ячейке $\lambda_{я.}$. В секторе IV – между теплопроводностью и влажностью материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М. : Стройиздат, 1981. 464 с.
2. Жуков А.Д., Чугунков А.В., Рудницкая В.А. Решение технологических задач методами математического моделирования : монография. М. : МГСУ, 2011. 176 с.
3. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М. : Наука, 1978. 399 с.
4. Лейбензон Л.С. Руководство по нефтепромысловой механике. Ч. 2. Гос. науч.-техн. издат., 1934. 351 с.
5. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий.

REFERENCES

1. Ahverdov I.N. Osnovy fiziki betona [Fundamentals of concrete physics]. Moscow, Stroyizdat [Constructive publishing office], 1981, p. 464.
2. Zhukov A.D., Chugunkov A.V., Rudnitskaya V.A. Reshenie tekhnologicheskikh zadach metodami matematicheskogo modelirovaniya [Solution of technological tasks by mathematical modeling methods], Moscow, MSUCE, 2011, p. 176.
3. Buslenko N.P. Modelirovanie slozhnykh sistem [Complex systems modeling]. Moscow, Nauka [Science], 1978, p. 399.
4. Leybenzon L.S. Rukovodstvo po neftepromyslovyoy mekhanike [Guide for oilfield mechanics]. Part 2, Gos.nauch.-tehn.izdat., [State technical scientific printing and publications center], 1934, p. 351
5. Building code № 23-02-2003 Teplovaya zashchita zdaniy [Building thermal protection].

Поступила в редакцию в апреле 2012 г.

Об авторах: **Жуков Алексей Дмитриевич**, доцент, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии отделочных и изоляционных материалов, **ФГБОУ ВПО «МГСУ»**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, taurusj@rambler.ru;

Чугунков Александр Викторович, инженер, начальник отдела КНИЛГ, **ФГБОУ ВПО «МГСУ»**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, chugunkov@rambler.ru;

Гудков Павел Кириллович, инженер, программист 1-й категории редакционно-издательского центра, **ФГБОУ ВПО «МГСУ»**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Gudkov.PK@yandex.ru

About authors: **Zhukov Alexei Dmitrievich**, Assistant Professor, Candidate of Technical Science, Professor of finishing and insulating materials technology department, **Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)**, 26 Yaroslavskoye shosse, 129337, Moscow, Russian Federation, taurusj@rambler.ru;

Chugunkov Aleksandr Viktorovich, head of department of buildings inspection KNILG, **Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)**, 26 Yaroslavskoye shosse, 129337, Moscow, Russian Federation, chugunkov@rambler.ru;

Gudkov Pavel Kirillovich, инженер, программист 1-й категории редакционно-издательского центра, **Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)**, 26 Yaroslavskoye shosse, 129337, Moscow, Russian Federation, Gudkov.PK@yandex.ru

Для цитирования:

Жуков А.Д., Чугунков А.В., Гудков П.К. Геометрическая модель ячеистого бетона и прогнозирование его свойств // Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование». 2012. Вып. 2. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.

For citation:

Zhukov A.D., Chugunkov A.V., Gudkov P.K. Geometricheskaya model' yacheistogo betona i prognozirovaniye ego svoystv [Geometrical model and forecasting properties of foam mortar] *Nauchno-prakticheskiy Internet-zhurnal «Nauka. Stroitel'stvo. Obrazovanie»* [Science, construction, education], 2012, no. 2. Available at: <http://www.nso-journal.ru>.