

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-8-16

<sup>1,\*</sup>Иноземцев А.С., <sup>2</sup>Королев Е.В.<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

\*E-mail: InozemcevAS@mgsu.ru

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В БЕТОННЫХ СМЕСЯХ НА ЛЕГКОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ

**Аннотация.** На основе рассмотренных моделей продемонстрировано, что меньшая плотность полого заполнителя требует меньшего его количества для достижения заданной плотности лёгких бетонов, что обеспечивает большую вариативность при разработке и проектировании каркасообразующей части и формирует потенциал для достижения высоких механических свойств. Доля адсорбционной воды полого заполнителя, в отличие от пористого заполнителя, не зависит от общего количества воды в системе, что позволяет прогнозировать расход воды, а значит управлять реотехнологическими свойствами смесей на их основе. Распределение физически связанной воды в составах на полом заполнителе носит отличный характер от составов на пористом заполнителе. Доля физической воды на таком заполнителе больше, чем на полом для составов с плотностью не более 1500...1600 кг/м<sup>3</sup>, менее этого диапазона – большее содержание такой воды наблюдается в системах на полом заполнителе.

Показано, что распределение воды в системах на пористом и полом заполнителе существенно отличается. Учитывая роль пористого заполнителя в формировании структуры лёгких бетонов, можно предположить, что при разработке лёгких бетонов с плотностью более 1600 кг/м<sup>3</sup> целесообразно использовать пористый заполнитель, а при разработке лёгкого бетона с плотностью менее 1600 кг/м<sup>3</sup> – полый заполнитель. Это обеспечивает рациональное распределение воды в бетонной смеси, а, следовательно, условия для формирования прочной структуры лёгкого бетона.

**Ключевые слова:** лёгкий бетон, полый заполнитель, пористый заполнитель, структура, модель, распределение воды, адсорбция воды

**Введение.** Заполнитель является важным компонентом как тяжелых, так и лёгких бетонов, оказывающим существенное влияние на параметры структуры и свойства материала [1]. Одним из способов получения лёгких бетонов и растворов является введение лёгких заполнителей, в качестве которых используются природные [Ошибка! Источник ссылки не найден.—4] и искусственные пористые заполнители [5–7].

Согласно [8] лёгкие заполнители по строению следует классифицировать на *пористые* и *полые* заполнители. Пористыми заполнителями называют [9] сыпучие зернистые материалы гравийной формой зёрен с неравномерной плотностью оболочки и центра или щебнеподобные зёрна неправильной угловатой формы и шероховатой ноздреватой поверхностью с насыпной плотностью до 1000 кг/м<sup>3</sup>. К полым заполнителям (наполнителям) относят мелкие порошки [10], зёрна которых имеют плотную внешнюю оболочку и газо-воздушное ядро.

Высокие физико-механические свойства лёгких бетонов характерны для составов на пористых заполнителях преимущественно искусственно вспученных, в основном, на керамзите. Одной из основных особенностей пористых заполнителей является их способность поглощать

значительное количество воды [11]. Как правило, поглощающую способность лёгкого заполнителя относят к положительной особенности технологии, так как структурообразование бетона проходит полнее за счёт формирования резерва воды для гидратации портландцемента. При этом в технологии керамзитобетона существуют полярные представления о необходимости предварительного увлажнения заполнителя, которое может иметь как положительный, так и отрицательный эффект. Нежелательным и вредным в [11] называют предварительное увлажнение керамзитового гравия, что объясняется неуправляемыми процессами релаксации и напряжениями в гранулах, которые возникают при насыщении водой на начальной стадии и при увеличении водонасыщения, соответственно.

Однако отмечается [12], что насыщение керамзита водой не приводит к снижению его прочности (повышение прочности составляет порядка 15...17 %), что объясняется напряжённым состоянием гранул заполнителя, возникающим в процессе быстрого перехода от пиропластического состояния к твёрдому. Усадка и расширение искусственных пористых заполнителей при изменении их влажности колеблется в широких пределах. Изменение объёма составляет величину

порядка усадки и расширения цементного камня и даже превосходит их (расширение 1,3...2,1 мм/м, усадка 0,7...1,2 мм/м). Отмечается, что остаточные напряжения значительно снижаются с уменьшением размера гранул пористого заполнителя и существенно увеличиваются при отклонении формы гранул от сферической формы и особенно – при наличии на ней трещин, выступов и изломов. В [11] «эффект предварительного обжаривания пористого заполнителя, повышающего его растяжимость в лёгком бетоне», описывается первоначальным увеличением его объёма за счёт поглощения влаги из цементного раствора, последующей его деформацией сжатия в результате обратной миграции влаги в твердеющий цементный камень. Эти процессы происходят на фоне усадки цементного раствора. Через определённый период времени величина обжаривания цементной оболочкой (за счёт усадки) протекает интенсивнее, чем сокращение размеров пористого заполнителя за счёт отдачи воды. Процесс обжаривания лёгкого заполнителя продолжается до момента прекращения обменных процессов или до момента разрыва цементной оболочки.

Таким образом, важнейшую роль в структурообразовании лёгкого бетона выполняет лёгкий заполнитель. Однако исследованию особенностей формирования структуры бетонов на поллом заполнителе уделено внимание в основном с эмпирической стороны [10, 13–15], поэтому анализ теоретических аспектов получения таких бетонов вызывает научный интерес. Целью настоящего исследования является теоретический анализ структурных параметров бетонных смесей на лёгких заполнителях и сравнительный анализ особенностей распределения воды в таких системах, для установления границ объёмного содержания пористого и полого заполнителя, обеспечивающих рациональные условия формирования прочной структуры материала.

Таким образом, показано, что распределение воды в системах на пористом и поллом заполнителях существенно отличается. Учитывая роль пористого заполнителя в формировании структуры лёгких бетонов (описанную выше), можно предположить, что при разработке лёгких бетонов с плотностью более 1600 кг/м<sup>3</sup> целесообразно использовать пористый заполнитель, а при разработке лёгкого бетона с плотностью менее 1600 кг/м<sup>3</sup> – полый заполнитель. Это обеспечивает рациональное распределение воды в бетонной смеси, а, следовательно, условия для формирования прочной структуры лёгкого бетона.

**Материалы и методы.** В работе используются математические методы моделирования объекта исследования – лёгкого бетона на пористом или поллом заполнителе – с привлечением общенаучных подходов научного исследования: метода абсолютных объёмов, закономерностей формирования структуры лёгкого бетона, изложенных в фундаментальных работах [11, 12, 16], взаимодействия на границе «твёрдое вещество – вода» [9, 17] и др.

**Основная часть.** Рассмотрим модель цементных материалов на пористом (керамзит) и поллом (керамические микросферы) лёгком заполнителе. В рассматриваемой системе «цемент – вода – заполнитель» (рис. 1) каждая частица твёрдой фазы является «потребителем» воды, требующим её расхода для смачивания поверхности и на формирование приповерхностного слоя воды. При этом характер взаимодействия с водой цемента, пористого и полого заполнителя будет отличаться. Взаимодействие цемента с водой носит сложный кинетический характер, описываемый с учётом протекания физико-химических процессов гидратации, который в данной работе не рассматривается. Принимается, что при достаточном количестве воды вид заполнителя не оказывает влияния на гидратацию цемента.

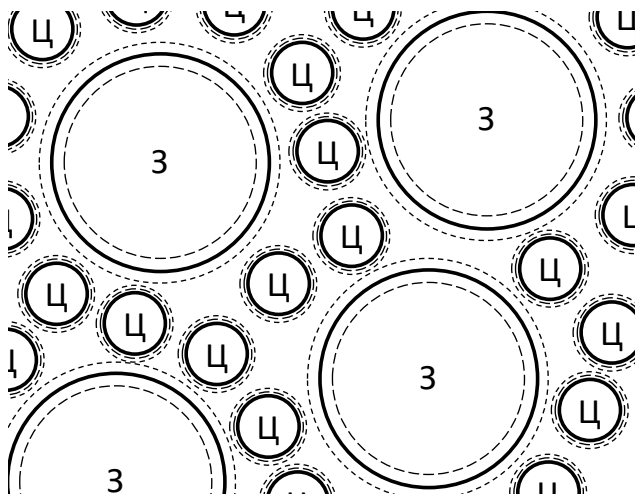


Рис. 1. Общая схема цементной системы, наполненной лёгким заполнителем

Лёгкий полый наполнитель будет потреблять воду на смачивание и формирование её адсорбционного слоя на твёрдой поверхности оболочки, а лёгкий пористый наполнитель дополнительно будет поглощать воду вследствие наличия пористо-капиллярной структуры. При этом количество воды, затрачиваемой на эти процессы, будет зависеть от геометрических характеристик рассматриваемых видов наполнителя и параметров пористо-капиллярного пространства пористого наполнителя. В этой связи исследование распределения воды в материалах, содержащих пористый или полый наполнитель, а также оценка влияния на баланс воды структуры бетонной смеси вызывает научный интерес.

Соотношение компонентов в рассматриваемой системе представляется долями цементного теста и наполнителя, в зависимости от плотности которых достигается требуемая средняя плотность бетонной смеси.

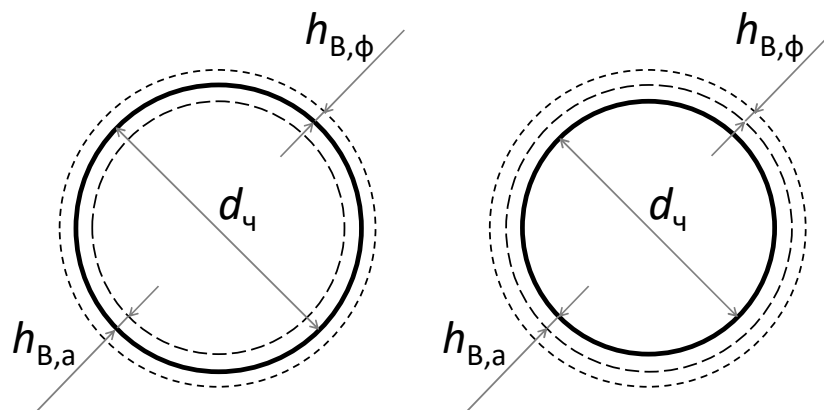


Рис. 2. Модель распределения воды на частицах пористого (слева) и полого (справа) наполнителя

$$v_B = v_{B,a} + v_{B,\phi} \tag{3}$$

При этом ключевым в распределении воды в системе и смещение баланса жидкости между цементом и наполнителем будет зависеть от адсорбционных свойств лёгкой фазы

$$(v_{Ц} + v_{B,a}^{Ц} + v_{B,\phi}^{Ц}) + (v_3 + v_{B,a}^3 + v_{B,\phi}^3) = 1 \tag{4}$$

Для плотных частиц цемента (без учета процесса гидратации) доля адсорбционной воды составляет

$$v_{B,a}^{Ц} = v_{Ц} \rho_{Ц} h_{B,a} S_{уд,Ц} \tag{5}$$

где  $h_{B,a} = 30$  нм [15],  $S_{уд,Ц}$  – удельная поверхность цемента.

Для наполнителей величина адсорбирующейся воды связана с водопоглощением  $W_{m,3}$  частиц

$$v_{B,a}^3 = W_{m,3} \rho_B \tag{6}$$

Открытая пористость наполнителя, определяющая его поглощающую способность, вносит

$$\begin{cases} v_{ЦТ} + v_3 = 1 \\ v_{ЦТ} \rho_{ЦТ} + v_3 \rho_3 = \rho_{БС} \end{cases} \tag{1}$$

где  $v_{ЦТ} = v_{Ц} + v_B$  – объёмная доля цементного теста, приготовленного с известным В/Ц-отношением

$$\begin{cases} v_{Ц} \rho_{Ц} + (1 - v_{Ц}) \rho_B = \rho_{ЦТ} \\ \frac{Ц}{\rho_{Ц}} + \frac{B}{\rho_B} = 1 \end{cases} \tag{2}$$

где  $v$  и  $\rho$  – объёмное содержание и истинная плотность соответствующих компонентов смеси; индексами обозначены цемент (Ц), вода (В), наполнитель (3), бетонная смесь (БС) и цементное тесто (ЦТ).

Распределение воды на поверхности твердых частиц представляется долями адсорбированной и физически связанной (рис. 2).

ключевой вклад в перераспределение доли физически связанной воды. То есть доля этой воды, из условия равномерного ее распределения на открытые частицы цемента и наполнителя, составляет

$$\begin{cases} v_{B,\phi}^{Ц+3} = v_{B,\phi}^{Ц} + v_{B,\phi}^3 \\ v_{B,\phi}^{Ц+3} = v_B - v_{B,a}^{Ц} - v_{B,a}^3 \end{cases} \tag{7}$$

На рис. 3 и 4 представлены модели изменения доли адсорбционной воды на частицах цемента и наполнителя, соответственно, в системе «цемент – вода – наполнитель» при варьировании В/Ц-отношения и плотности. Для моделирования приняты следующие начальные условия: площадь удельной поверхности и плотность цемента  $S_{уд,Ц} = 250$  м<sup>2</sup>/кг и  $\rho_{Ц} = 3100$  кг/м<sup>3</sup>, соответственно; средний диаметр частиц и плотность пористого наполнителя  $d_{ч,К} = 20$  мм и  $\rho_{К} = 850$  кг/м<sup>3</sup>, соответственно, а полого  $d_{ч,МС} = 70$  мкм и  $\rho_{МС} = 530$  кг/м<sup>3</sup>, соответственно.

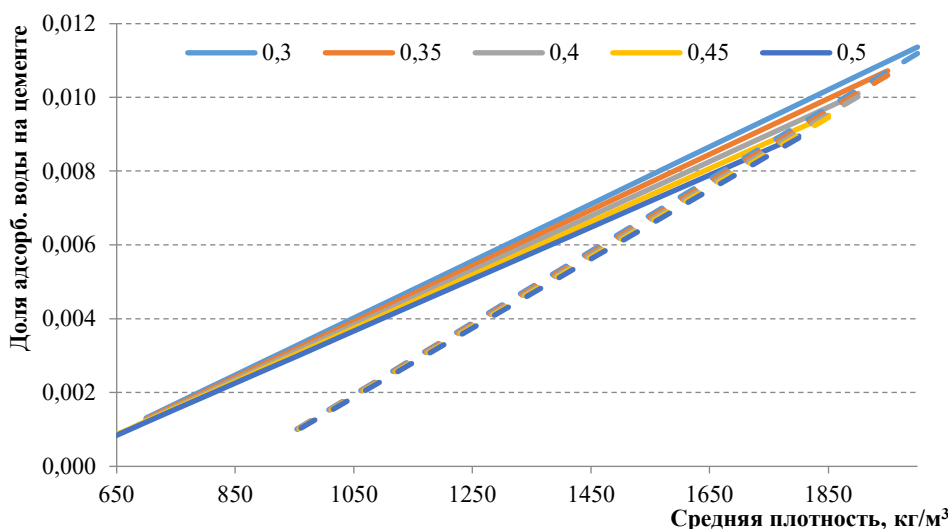


Рис. 3. Модель изменения доли адсорбционной воды на частицах цемента от средней плотности в системах с пористым (пунктирные линии) и плотным (сплошные линии) наполнителем при варьировании В/Ц

Видно, что графики изменения доли адсорбционной воды на частицах цемента для систем с пористым и плотным наполнителем отличается интенсивностью. Снижение плотности, вызванное увеличением доли лёгкого наполнителя, приводит к более интенсивному снижению доли адсорбционной воды  $v_{В,а}^Ц$ . При этом чем меньше плотность, тем существеннее отличие между системами на пористом и плотном наполнителе, т.е. тем больше отличие в количестве адсорбционной воды (разница значений между графиками, обозначенными пунктирными и сплошными линиями).

Это объясняется тем, что достижение одинаковой плотности композита достигается заменой вяжущего вещества большим количеством наполнителя, так как плотность пористого наполнителя больше, чем у плотного. В результате, в системе остается меньшее количество вяжущего вещества, на поверхности которого адсорбируется вода. При этом отметим, что в этом случае ограничена возможность достижения минимальной плотности композита. Для рассматриваемой модели минимально достижимая средняя плотность для систем на пористом наполнителе составляет около 1000...950 кг/м<sup>3</sup>, а на плотном наполнителе стремится к 700...650 кг/м<sup>3</sup>.

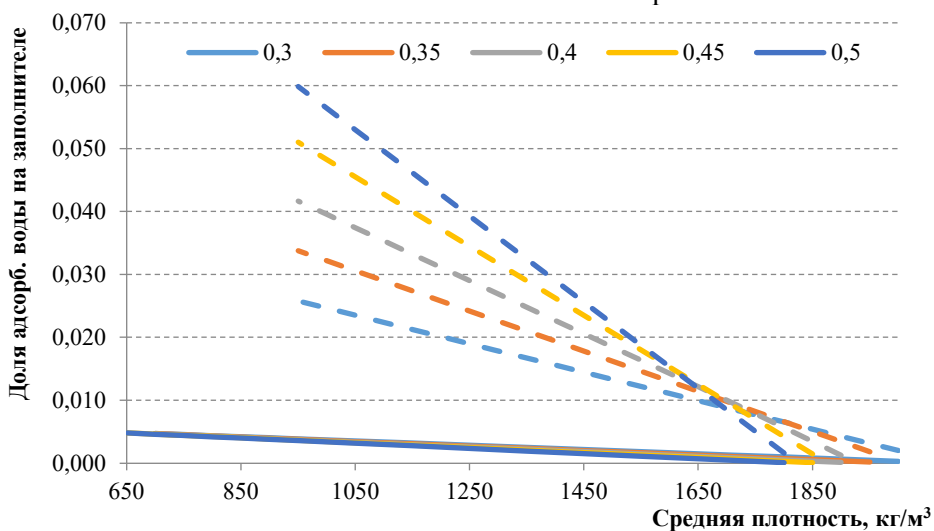


Рис. 4. Модель изменения доли адсорбционной воды на частицах наполнителя от средней плотности для пористого (пунктирные линии) и плотного (сплошные линии) наполнителя при варьировании В/Ц

Наибольший интерес представляет вклад наполнителя в распределение воды в рассматриваемой системе. Так, на рис. 4 показана зависимость количества адсорбционной воды на частицах наполнителя пористой и плотной структуры, из которой видно, что в композициях на пористом наполнителе доля такой воды существенно выше, чем

на плотном. Закономерным объяснением этому является наличие пористо-капиллярной структуры наполнителя, которая участвует в накоплении воды в его зёрнах. При этом, представленные на рис. 6 графики для различного В/Ц-отношения демонстрируют растущую интенсивность изме-

нения при увеличении содержания воды. Это связано тем, что поглощающая способность пористого заполнителя напрямую зависит от общего количества воды в системе [9]. Для плотной оболочки полого заполнителя доля адсорбционной воды изменяется по противоположному цементу направлению линейной зависимости, что связано с заменой вяжущего вещества лёгким заполнителем.

Исходя из того, что процесс адсорбции воды протекает в приоритетном порядке, то дальнейшее распределение воды в системе, как конкурентный процесс, протекает по остаточному принципу. В связи с этим особый интерес представляет изменение количества воды в системе с заполнителями разной структуры (рис. 5 и 6). При этом физически связанная вода в модельной системе будет распределяться пропорционально долям твердой фазы.

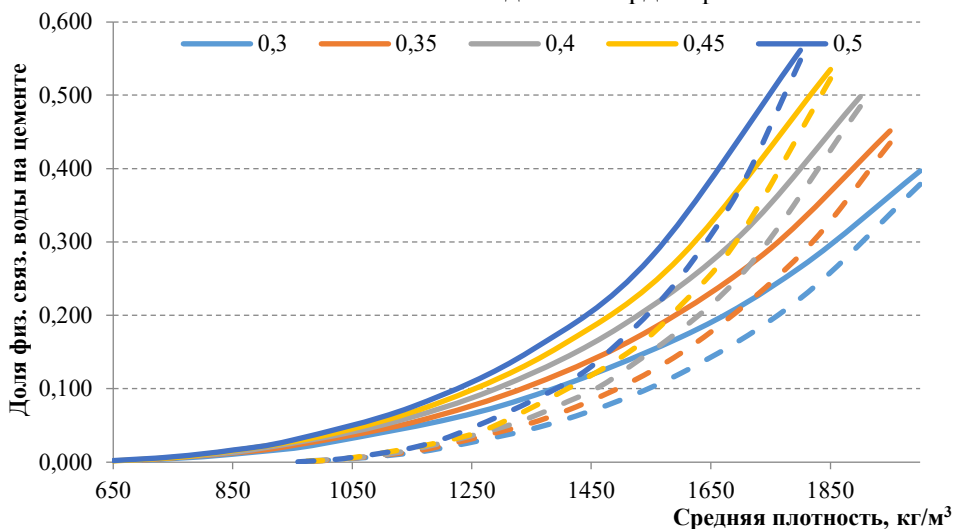


Рис. 5. Модель изменения доли физически связанной воды на частицах цемента от средней плотности в системах с пористым (пунктирные линии) и полым (сплошные линии) заполнителем при варьировании В/Ц

Данные рис. 5 демонстрируют, что зависимости для модельных систем на полых заполнителях располагаются выше, чем графики для систем с пористым заполнителем. Это означает, что зависимость, согласно которой доля физически связанной воды на поверхности частиц вяжущего вещества (цемента) в лёгких бетонах на полых заполнителях больше, чем в бетонах на пористом заполнителе независимо от средней плотности. При этом важно отметить, что, не смотря на

меньший размер частиц полого заполнителя (большую удельную поверхность), их плотная стенка препятствует интенсивной адсорбции воды, оставляя большее её количество для распределения по поверхности твердых частиц, в том числе цемента. Вместе с этим количество физически связанной воды на частицах заполнителя в зависимости от плотности меняется по экстремальной зависимости (рис. 6).

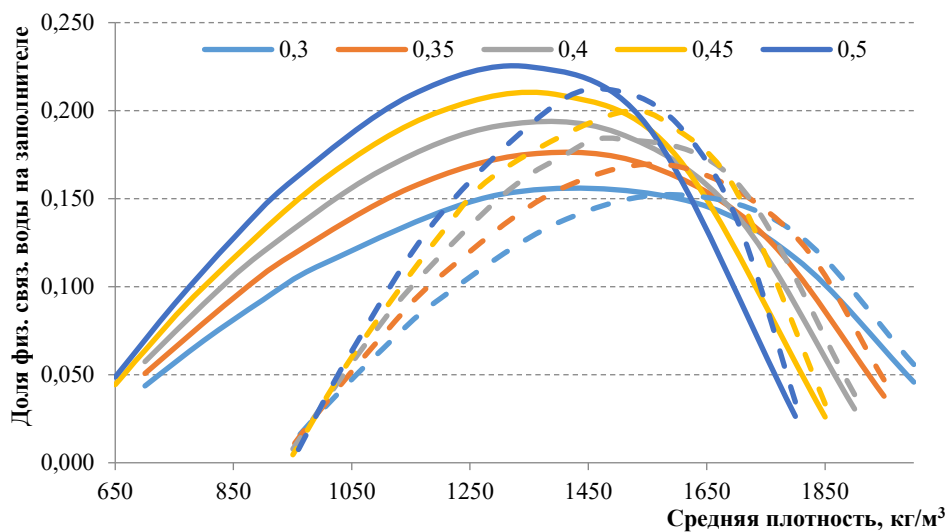


Рис. 6. Модель изменения доли физически связанной воды на частицах заполнителя от средней плотности для пористого (пунктирные линии) и пологого (сплошные линии) заполнителя при варьировании В/Ц

Представленная модель распределения физически связанной воды на поверхности заполнителя демонстрирует, что эта зависимость от средней плотности бетона имеет экстремальный характер. Также важно отметить, что абсциссы точек пересечения этих зависимостей с осью «Средняя плотность» различны. Видно, что восходящий участок кривой, рассматриваемой на рис. 6, для композиций на пористом заполнителе заканчивается в диапазоне 1500...1600 кг/м<sup>3</sup>, а для составов с полым заполнителем – в диапазоне 1300...1450 кг/м<sup>3</sup>. Кроме того, видно, что на восходящей кривой модельных композиций на пористом заполнителе доля физически связанной воды меньше, чем у композиций на полном запол-

нителе при равной плотности. На нисходящей части кривой наблюдается обратная зависимость: доля физической воды на поверхности частиц полого заполнителя меньше, чем на зернах пористого заполнителя. Это свидетельствует о том, что в системах с одинаковым В/Ц-отношением доля воды, участвующей в формировании свойств смесей, будет больше в композициях с полым заполнителем при плотности до 1500...1600 кг/м<sup>3</sup>.

Обобщающие выводы о распределении адсорбционной и физически связанной воды на частицах цемента и заполнителя можно сделать с помощью рис. 7, предоставляющего относительную величину воды при В/Ц = 0,3.

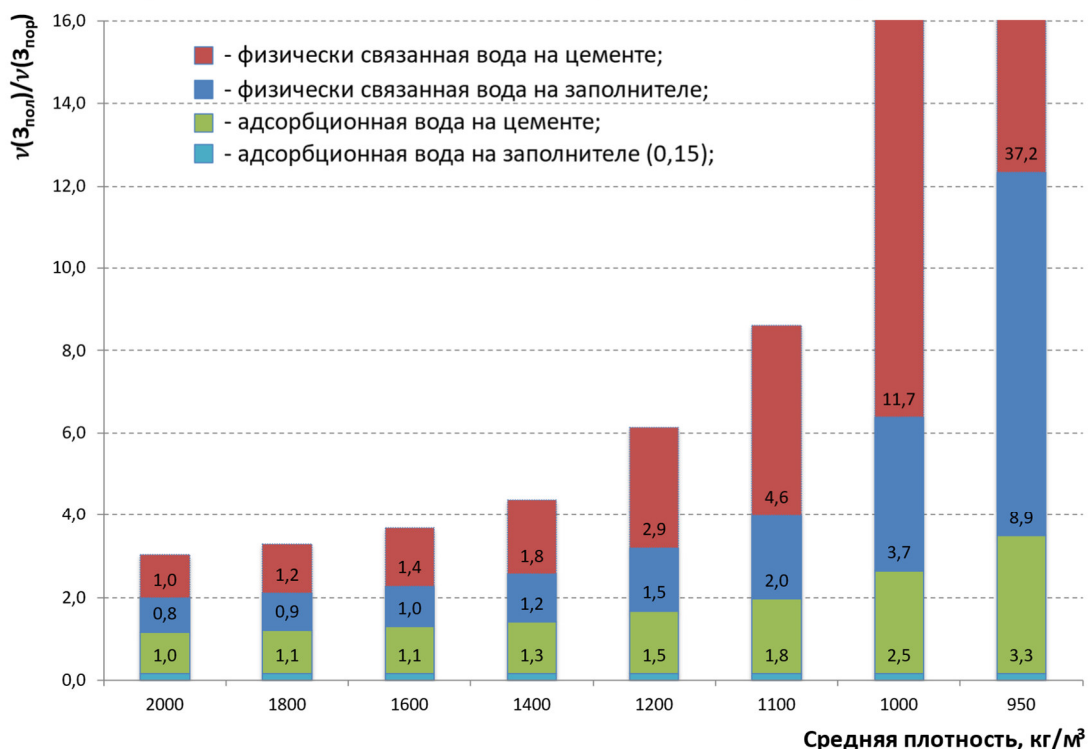


Рис. 7. Сравнительное распределение воды для модели «цемент – вода – заполнитель» в системе с полым заполнителем ( $Z_{пол}$ ) к системе на пористом заполнителе ( $Z_{пор}$ ) при В/Ц = 0,3

На рис. 7 видно, что доля адсорбционной и физически связанной воды становится сравнительно больше для модельных систем на полном заполнителе, чем на пористом, при плотности не более 1600 кг/м<sup>3</sup>. Отличие для этих систем нарастает экспоненциально при снижении плотности и увеличении В/Ц-отношения.

Анализ рассматриваемых моделей позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

1) Меньшая плотность полого заполнителя требует меньшего его количества для достижения заданной плотности лёгких бетонов, что обеспечивает большую вариативность при разработке и проектировании каркасообразующей части и формирует потенциал для достижения высоких механических свойств.

2) Доля адсорбционной воды полого заполнителя, в отличие от пористого заполнителя, не зависит от общего количества воды в системе, что позволяет прогнозировать расход воды, а значит, управлять реотехнологическими свойствами смесей на их основе.

3) Распределение физически связанной воды в составах на полном заполнителе носит отличный характер от составов на пористом заполнителе. Доля физической связанной воды на таком заполнителе больше, чем на полном для составов с плотностью не более 1500...1600 кг/м<sup>3</sup>, менее этого диапазона – большее содержание такой воды наблюдается в системах на полном заполнителе.

**Выводы.** Таким образом, показано, что распределение воды в системах на пористом и полном

заполнителях существенно отличается. Учитывая роль пористого заполнителя в формировании структуры лёгких бетонов (описанную выше), можно предположить, что при разработке лёгких бетонов с плотностью более 1600 кг/м<sup>3</sup> целесообразно использовать пористый заполнитель, а при разработке лёгкого бетона с плотностью менее 1600 кг/м<sup>3</sup> – полый заполнитель. Это обеспечивает рациональное распределение воды в бетонной смеси, а, следовательно, условия для формирования прочной структуры лёгкого бетона.

*Источник финансирования. Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2011. 524 с.
2. Якубович М.А. Автодорожные мосты из лёгкого железобетона. М.: Автотрансиздат, 1956. 68 с.
3. Юдин И.В., Ярмаковский В.Н. Инновационные технологии в индустриальном домостроении с использованием конструкционных лёгких бетонов // Строительные материалы. 2010. № 1. С. 15–17.
4. Lam T.V., Vu D.T., Dien V.K., Bulgakov B.I., Korol E.A. Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. Т. 84. № 8. Pp. 173–191. DOI: 10.18720/MCE.84.17
5. Соловьева Л.Н., Ходыкин Е.И., Мосьпан А.В. Перспективы использования кремнеземсодержащего сырья для получения гранулированного заполнителя лёгких бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. № 1. С. 9–11.
6. Давидюк А.Н., Давидюк А.А. Прочностные свойства лёгких бетонов на стекловидных заполнителях для многослойных ограждающих конструкций // Бетон и железобетон. 2008. № 6. С. 9–13.
7. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Соболева Г.Н., Золотухина Н.В., Обыденная А.А. Композиционный заполнитель для лёгких бетонов с использованием хризотилцементных и золошлаковых отходов // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 53–59.
8. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Лёгкие бетоны на полых и пористых заполнителях // Строительные материалы. 2024. № 7. С. 41–47.
9. Макридин Н.И. Искусственные пористые заполнители и лёгкие бетоны: учеб. пособие / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова. Пенза: ПГУАС, 2013. 324 с.
10. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Высокопрочные лёгкие бетоны. СПб.: СПбГАСУ, 2022. 192 с.
11. Максимова И.Н., Макридин Н.И. Строительное материаловедение конструкционных лёгких бетонов: моногр. Пенза: ПГУАС, 2014. 204 с.
12. Петров В.П., Макридин Н.И., Ярмаковский В.Н. Пористые заполнители и лёгкие бетоны. Материаловедение. Технология производства: учебное пособие. Самара: СГАСУ, АСВ, 2009. 436 с.
13. Ключков А.В., Павленко Н.В., Строкова В.В., Беленцов Ю.А. К вопросу об использовании стеклянных полых микросфер для теплоизоляционно-конструкционных кладочных растворов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 64–66.
14. Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Отмахов В.И., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К. Исследование полых микросфер, полученных на основе золошлаковых отходов ТЭС кемеровской области в потоке термической плазмы // Стекло и керамика. 2018. № 1. С. 36–39.
15. Семенов В.С., Розовская Т.А. Сухие кладочные смеси с полыми керамическими микросферами // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 195–199.
16. Иванов И.А. Лёгкие бетоны на искусственных пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1993. 182 с.
17. Карнаков В.А., Ежова Я.В., Марчук С.Д., Донской В.И., Щербаченк Л.А. Аномальные свойства адсорбированных пленок воды в слоистых минералах // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. № 11. С. 1946–1948.

#### Информация об авторах

**Иноземцев Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения. E-mail: inozemcevAS@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

**Королев Евгений Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, действительный член РИА, почетный строитель России, проректор по научной деятельности. E-mail: progector\_nr@spbgasu.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 07.07.2024 г.

© Иноземцев А.С., Королев Е.В., 2024

<sup>1,\*</sup>Inozemtcev A.S., <sup>2</sup>Korolev E.V.<sup>1</sup>National Research University Moscow State University of Civil Engineering<sup>2</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

## THEORETICAL DESCRIPTION OF WATER DISTRIBUTION IN CONCRETE MIXTURES ON LIGHTWEIGHT AGGREGATE

**Abstract.** Based on the models considered, it has been demonstrated that a lower density of hollow aggregate requires a smaller amount of it to achieve a given density of lightweight concrete. This provides greater variability in the development and design of the frame-forming part and creates the potential for achieving high mechanical properties. The proportion of adsorption water of a hollow aggregate does not depend on the total amount of water in the system, in contrast to a porous aggregate. This allows predicting water consumption and managing the rheotechnological properties of mixtures based on them. The distribution of physically bound water in compositions on hollow aggregate is different from that in compositions on porous aggregate. The proportion of physical water on such an aggregate is greater than on a hollow one for compositions with a density of no more than 1500...1600 kg/m<sup>3</sup>. If the density is less than this range, then in hollow aggregate systems a higher content of such water is observed.

It is shown that the distribution of water in systems on porous and hollow aggregate differs significantly. Considering the role of porous aggregate in forming the structure of lightweight concrete, it can be assumed that when developing lightweight concrete with a density of more than 1600 kg/m<sup>3</sup>, it is advisable to use porous aggregate. When developing lightweight concrete with a density of less than 1600 kg/m<sup>3</sup>, it is advisable to use hollow aggregate. This ensures rational distribution of water in the concrete mixture and, consequently, conditions for the formation of a strong structure of lightweight concrete.

**Keywords:** lightweight concrete, hollow aggregate, porous aggregate, structure, model, water distribution, water adsorption

### REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. Concrete technology [Tekhnologiya betona]. Moscow: ASV, 2011. 524 p. (rus)
2. Yakubovich M.A. Lightweight reinforced concrete road bridges [Avtodorozhnye mosty iz lyogkogo zhelezobetona]. Moscow: Autotransizdat, 1956. 68 p. (rus)
3. Yudin I.V., Yarmakovskiy V.N. Innovative technologies in industrial housing construction using structural lightweight concrete [Innovatsionnye tekhnologii v industrial'nom domostroenii s ispol'zovaniem konstruktsionnykh legkikh betonov]. Building materials. 2010. No. 1. Pp. 15–17. (rus)
4. Lam T.V., Vu D.T., Dien V.K., Bulgakov B.I., Korol E.A. Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete. Magazine of Civil Engineering. 2018. T. 84. № 8. Pp. 173–191. DOI: 10.18720/MCE.84.17
5. Solovieva L.N., Khodykin E.I., Mospan A.V. Prospects for the use of silica-containing raw materials for the production of granulated aggregate for lightweight concrete [Perspektivy ispol'zovaniya kremnezemsoderzhashchego syr'ya dlya polucheniya granulirovannogo zapolnitelya legkikh betonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2008. No. 1. Pp. 9–11. (rus)
6. Davidyuk A.N., Davidyuk A.A. Strength properties of lightweight concretes on glassy aggregates for multilayer enclosing structures [Prochnostnye svoystva legkikh betonov na steklovidnykh zapolnitelyah dlya mnogoslojnykh ograzhdayushchikh konstruktsij]. Concrete and reinforced concrete. 2008. No. 6. Pp. 9–13. (rus)
7. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Soboleva G.N., Zolotukhina N.V., Obydenaia A.A. Composite filler for lightweight concrete using chrysotile cement and ash waste [Kompozitsionnyy zapolnitel' dlya legkikh betonov s ispol'zovaniem hrizotilcementnykh i zoloshlakovykh othodov]. Building materials. 2021. No. 8. Pp. 53–59. (rus)
8. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Lightweight concretes on hollow and porous aggregates [Lyogkie betony na polyh i poristykh zapolnitelyah]. Building materials. 2024. No. 7. Pp. 41–47. (rus)
9. Makridin N.I., Maksimova I.N. Artificial porous aggregates and lightweight concretes [Iskusstvennye poristye zapolniteli i lyogkie betony]. Penza: PGUAS, 2013. 324 p. (rus)
10. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. High-strength lightweight concrete [Vysokoprochnye lyogkie betony]. Saint-Petersburg: SPbGASU, 2022. 192 p. (rus)
11. Maksimova I.N., Makridin N.I. Construction materials science of structural lightweight concrete



[Stroitel'noe materialovedenie konstrukcionnyh lyogkih betonov]. Penza: PGUAS, 2014. 204 p. (rus)

12. Petrov V.P., Makridin N.I., Yarmakovskiy V.N. Porous aggregates and lightweight concrete. Materials science. Production technology [Poristye zapolniteli i lyogkie betony. Materialovedenie. Tekhnologiya proizvodstva]. Samara: SGASU, ASV, 2009. 436 p. (rus)

13. Klochkov A.V., Pavlenko N.V., Strokova V.V., Belentsov Yu.A. On the issue of using glass hollow microspheres for thermal insulation and structural masonry mortars [K voprosu ob ispol'zovanii steklyannyh polyh mikrosfer dlya teploizolyacionno-konstrukcionnyh kladochnyh rastvorov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 3. Pp. 64–66. (rus)

14. Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Otmakhov V.I., Volokitin G.G., Skripnikova N.K. Study of hollow microspheres obtained from ash and slag waste of thermal power plants of the Kemerovo

region in a thermal plasma flow [Issledovanie polyh mikrosfer, poluchennyh na osnove zoloshlakovyh othodov TES kemerovskoy oblasti v potoke termicheskoy plazmy]. Glass and ceramics. 2018. No. 1. Pp. 36–39. (rus)

15. Semenov V.S., Rozovskaya T.A. Dry masonry mixes with hollow ceramic microspheres [Suchie kladochnye smesi s polyimi keramicheskimi mikrosferami]. Scientific Review. 2013. No. 9. Pp. 195–199. (rus)

16. Ivanov I.A. Lightweight concretes on artificial porous aggregates [Legkie betony na iskusstvennyh poristyh zapolnitelyah]. Moscow: Stroyizdat, 1993. 182 p. (rus)

17. Karnakov V.A., Ezhova Ya.V., Marchuk S.D., Donskoj V.I., Shcherbachenk L.A. Anomalous properties of adsorbed water films in layered minerals [Anomal'nye svoystva adsorbirovannyh plenok vody v sloistyh mineralah]. Solid State Physics. 2006. Vol. 48. No. 11. Pp. 1946–1948. (rus)

#### *Information about the authors*

**Inozemtcev, Aleksandr S.** PhD, Assistant professor. E-mail: InozemtcevAS@mgsu.ru. National Research University Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

**Korolev, Evgeniy V.** DSc, Professor, Full member of RIA, Honorary Builder of Russia. E-mail: prorektor\_nr@spbgasu.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, st. 2nd Krasnoarmeyskaya, 4.

*Received 07.07.2024*

#### **Для цитирования:**

Иноземцев А.С., Королев Е.В. Теоретическое описание распределения воды в бетонных смесях на легком заполнителе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-8-16

#### **For citation:**

Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Theoretical description of water distribution in concrete mixtures on lightweight aggregate. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-8-16