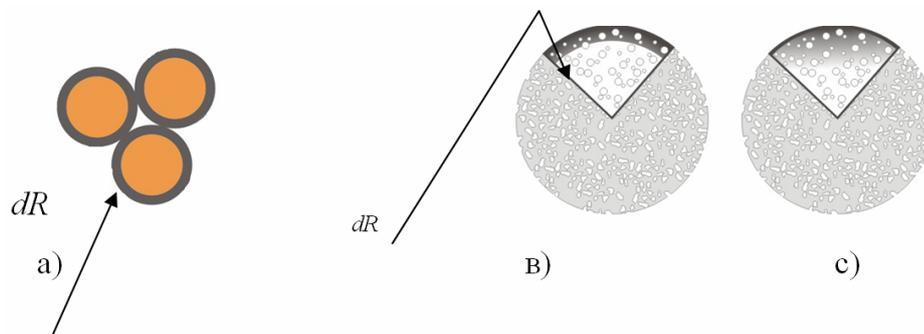


## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАСЫЩЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫМ РАСТВОРОМ ПОРИСТОГО ЭЛЕМЕНТА ЗАПОЛНИТЕЛЯ КЕРАМЗИТОБЕТОНА И ЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

*Представлено математическую модель процесса насыщения цементным раствором пористого элемента заполнителя керамзитобетона. Выявлено, что для экономии цементного раствора за счёт сокращения времени перемешивания необходимо в процесс перемешивания включить вибрацию.*

В работах [1] – [4] разработаны элементы математических моделей процессов приготовления и укладки крупнопористого керамзитобетона (КПКБ), заполнителем которого являются зерна в виде твёрдых керамзитовых пористых шаров приблизительно одинакового размера радиуса  $R$  (рис. 1 а) - в)).

Для развития и уточнения модельных представлений о процессе приготовления КПКБ, необходимо решить задачу, которая, в допустимых приближениях, содержательно отражает физико-химические, гидродинамические и механические свойства участвующих материалов, а также самого процесса насыщения (рис. 1, с)). В данной постановке подобная задача, в известной автору литературе, не рассматривалась, хотя фрагментарно разбиралась во многих публикациях, например, в работах [5] – [6].



**Рис. 1. Схематичное изображение слоя пропитки цементным раствором  $dR$  в модельном представлении (а, в) и в реальном процессе (с)**

В настоящей работе рассматривается математическая модель процесса насыщения цементным раствором отдельного пористого керамзитового элемента (ПЭ) и ее интерпретация для наиболее распространенных технологических ситуаций.

Рассмотрим уравнение вынужденной диффузии раствора, в виде одномерной задачи тепломассопереноса извне, то есть раствора, заполняющего пространство между зернами ПЭ, внутрь шара в радиальном направлении в сферической системе координат [1]:

$$E_k \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{D_k}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{k}{\eta} \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\partial P}{\partial r} - cW \quad (1)$$

с граничными условиями:

$r = R - dR$  :  $W = 0$  (клей проникает не глубже  $dR$  от поверхности ПЭ) либо  $D_k \frac{\partial W}{\partial r} = 0$  (клей проникает до центра с постоянным составом, начиная с уровня  $dR$ )

$$r = R : D_k \frac{\partial W}{\partial r} = \beta_k (W - W_0), \quad (2)$$

и начальными условиями:

$$W|_{t=0} = W_0, \quad (3)$$

где  $E_k = E_k(t)$  - удельная эффективная пористость зерна  $E_k = E_k(t)$ , характеризующая долю пор, открытых для диффузии клея внутрь зерна, изменяющаяся, в общем случае по времени, в процессе затворения и укладки;  $W = W(r, t)$  - объемная доля жидкой фазы (степень насыщения пор ПЭ) в точке ПЭ на расстоянии  $r$  от

центра шара до его поверхности ( $0 \leq r \leq R$ ) в двухфазной гетерогенной системе “жидкость - воздух” в момент времени  $t$ ;

$D_K$  – коэффициент диффузии в зерне ПЭ;

$W_0$  – начальная концентрация раствора зерне;

$k$  – проницаемость керамзита;

$\eta$  – вязкость цементного раствора;

$\beta_K$  – коэффициент массообмена между раствором и наружной поверхностью зерна;

$P$  – внутривязкостное давление складывающееся, в основном, из следующих четырех составляющих:

$$P = P_{\text{парц}} + P_{\text{тяж}} + P_{\text{вращ}} + P_{\text{возм}} \quad (4)$$

где:  $P_{\text{парц}}$  – парциальное давление воздуха (или среды, заполняющей поры ПЭ), включающее избыточное давление, создаваемое при заполнении пор цементным раствором и силами поверхностного натяжения в порах;

$P_{\text{тяж}}$  – составляющая давления от силы тяготения;

$P_{\text{вращ}}$  – давление, создаваемое вынужденной конвекцией раствора от вращения ротора бетоносмесителя за счет центробежной силы;

$P_{\text{возм}}$  – давление, искусственно создаваемое внешними источниками возмущения бетонной смеси (например, вибраторами), для ускорения процесса насыщения тела ПЭ цементным раствором, а также для создания более равномерной зоны пропитки  $dR$  на шаре и уплотнения смеси;

$c$  – эффективная характеристика суммарной скорости химических реакций, протекающих в процессе смешивания цемента с водой и влияющих на насыщение пор раствора.

Здесь предполагается равнодоступность поверхности ПЭ, а цементный раствор с водоцементным массовым отношением  $B/C$ , не изменяющимся во время процесса.

Система (1) – (4) является обобщённой нестационарной моделью, содержащей основные параметры процесса насыщения ПЭ. Исследование влияния на решение соответствующих членов выражения в правой части, описывает и подсказывает пути организации соответствующих технологий затворения.

Количественно оценить влияние перечисленных факторов на общий процесс насыщения в силу их многочисленности так же сложно, как и всех стадий процесса. Решение этой задачи является предметом дальнейших исследований автора.

Однако, на первом этапе, полезно провести качественный анализ влияния каждого из членов в правой части уравнения, характеризуя основные физико-химические, гидродинамические и механические параметры процесса насыщения ПЭ, входящие в условия задачи (1) - (4).

Рассмотрим основные технологически важные ситуации.

1. Керамзитовые ПЭ намокают в неподвижном растворе.

Это соответствует условиям  $P_{\text{вращ}}=0$ ,  $P_{\text{возм}}=0$ .

Уравнение (2.13) принимает следующий вид

$$E_K \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{D_K}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{k}{\eta} \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\partial (P_{\text{ПАРЦ}} + P_{\text{ТЯЖ}})}{\partial r} - cW \quad (5)$$

Оно отражает процессы диффузии в пористой среде, учитывая физико-химические реакции, протекающие на зерне.

Если, кроме того, положить  $c=0$ , то приходим к случаю, когда существенных физико-химических превращений нет. И модельное уравнение преобразуется к виду.

$$E_K \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{D_K}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{k}{\eta} \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\partial (P_{\text{ПАРЦ}} + P_{\text{ТЯЖ}})}{\partial r} \quad (6)$$

Если далее предположить, что давление внутри пор по глубине зерна не меняется, то

$$E_K \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{D_K}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial W}{\partial r} \right) \quad (7)$$

В совокупности с граничными и начальными условиями (2)-(3), уравнение (7) является классической задачей свободной диффузии в пористых средах.

2. Обычное перемешивание в бетоносмесителе.

Тогда  $P_{\text{возм}}=0$  и приходим к задаче

$$E_k \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{D_k}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{k}{\eta} \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\partial (P_{\text{ПАРЦ}} + P_{\text{ТЯЖ}} + P_{\text{ВРАЩ}})}{\partial r} - cW \quad (8)$$

Уравнения, аналогичные предыдущему пункту, для случаев отсутствия физико - химических взаимодействий  $c=0$  и постоянства давления в радиальном направлении. В этом случае можно также утверждать, что  $P_{\text{ВРАЩ}}$  будет вносить больший вклад, чем два других составляющих в изменении радиального давления.

3. Перемешивание в бетоносмесителе с внешним возмущением:

$$E_k \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{D_k}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{k}{\eta} \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\partial (P_{\text{ПАРЦ}} + P_{\text{ТЯЖ}} + P_{\text{ВРАЩ}} + P_{\text{ВОЗМ}})}{\partial r} - cW \quad (9)$$

Модель отражает ситуацию, когда на процесс перемешивания накладывается внешнее воздействие, например, в виде вибратора. В этом случае процессы вынужденной диффузии раствора внутрь зерна существенно интенсифицируются, что должно приводить к значительному сокращению времени необходимой пропитки цементным раствором. Это объясняет ранее известные в литературе предположения.

Главный практический вывод – для экономии цементного раствора за счёт сокращения времени перемешивания необходимо в процесс перемешивания включить вибрацию. За счет воздействия вибрации в момент приготовления гранулы керамзита дополнительно диспергируются и активируются, а также уплотняются цементным раствором на поверхности. Значительная интенсивность вибрационного воздействия позволяет получить бетонную смесь с высокой вязкостью при пониженном водопотреблении и расходе цемента.

Очевидно, что для крупнопористого керамзита главное влияние на решение этой задачи будут вносить члены  $P_{\text{ВОЗМ}}$  и  $cW$ , поэтому при изучении процесса насыщения и его моделировании именно им необходимо уделить особое внимание.

Кроме того, коэффициент  $\frac{k}{\eta}$  показывает, что этот член по модулю возрастает, то есть усиливает влияние на решение, а значит и на скорость насыщения, если знаменатель – вязкость  $\eta$  - уменьшается (фактически  $B/C$  растёт) либо числитель - коэффициент проницаемости ПЭ  $k$  – увеличивается (эффективная пористость  $E_k$  растёт). Задача (1)–(9) может быть решена только численно в силу нелинейности. Для этого необходимо разработать пакет прикладных программ с анализом конкретных значений физико-химических и механических констант, характеризующих свойства цемента, добавок, водоцементного отношения и режимов технологии приготовления КПКБ. Кроме того, необходимо знать все константы и параметры, входящие в модель (1)–(4). Это потребует анализа известной литературы и постановки специальных экспериментов.

Решение задач (1) – (9) даст возможность оценить реальную толщину диффузионного слоя  $dR$  ПЭ, насыщенного цементным раствором за время  $t$ , а значит и общий объём этого клея  $V_{\text{Ц}}$  для укладки КПКБ в опалубку объёма  $V_{\text{ОП}}$  с заполнителем объёма  $V_{\text{ПЭ}}$ , что поможет получить приближенное решение основных технологических задач по организации процесса приготовления КПКБ и его укладки в несъемную опалубку при минимальных затратах, и обеспечении ряда заданных необходимых свойств, в первую очередь, проектной прочности, расхода цементного клея, теплопроводности и объемной массы.

#### Список использованных источников

1. Рязанова Г.Н., Камбург В.Г., Ткаченко А.Н. Модельные представления технологии возведения ограждающих конструкций // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2008.– № 2. – С. 78 – 84.
2. Рязанова Г.Н., Камбург В.Г., Баранова Т.И., Ткаченко А.Н. Технология и моделирование процесса возведения ограждающих конструкций из крупнопористого керамзитобетона в несъемной опалубке // РААСН, АСАДЕМIA. Архитектура и строительство. – 2008. – № 2. – С. 71 – 76.
3. Рязанова Г.Н., Камбург В.Г., Баранова Т.И., Ткаченко А.Н. Технологические задачи моделирования процесса возведения ограждающих конструкций из крупнопористого керамзитобетона в несъемной опалубке // XXVIII Российская школа по проблемам науки и технологий. Наука и технологии. Межрегиональный совет по науке и технологиям. – Екатеринбург, УрО РАН, 24 – 26 июня, 2008. – С. 72 – 75.
4. G.N. Ryazanova, V.G. Kamburg, T.I. Baranova, A.N. Tkachenko. Technological Tasks of Erection Process Modelling of Enclosing Structures Made of High Porous Haydite Concrete in Monolithic Sheathing // The third international forum on strategic technologies. – Новосибирск, 23 – 29 июня, 2008. – С. 117 – 118.
5. Иванов И.А. Лёгкие бетоны на искусственных пористых заполнителях / И. А. Иванов // Стройиздат – М., 1993. – 182 с.
6. Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов // М.: Высшая школа, 1987. – 415 с.