

УДК 691.333: 532.685

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАПИЛЛЯРНОЕ ВОДОНАСЫЩЕНИЕ БЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ

**Романенко И.И., Пинт Э.М., Петровнина И.Н., Еличев К.А., Романенко М.И.**  
 ФГБУВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»,  
 Пенза, e-mail: rom1959@mail.ru

Настоящая статья посвящена исследованию влагопереноса в бетонных образцах. Бетон является одним из самых популярных строительных материалов в мире. Из него возводят как жилые здания, так и уникальные сооружения мостовых конструкций, корпуса атомных и гидроэлектростанций. Содержание влаги в бетоне оказывает существенное влияние на его механические свойства, а также на долговечность. Способность переноса влаги в пористой среде играет важную роль в разрушении строительных материалов, изготовленных на основе различных бетонов и строительных растворов. В общем, существуют две различные модели, используемые для изучения влагопереноса в пористых материалах. Это диффузионная модель, главную роль в которой играет поперечное сечение материала и на начальном этапе набора прочности бетоном, определяется диффузией воды. Другая модель описывает капиллярно-транспортный механизм. Он моделирует проникновение и перемещение жидкости по капиллярам в поровом пространстве. Процессы протекают в цилиндрическом капилляре с постоянным сечением и в контакте с бесконечным жидкостным резервуаром. При этом игнорируются сложность конфигурации поровой структуры и поверхностная неоднородность материала пор. Установлено, что направленное изменение структуры пор за счет использования «прививочного» материала оказывает существенное влияние на процессы капиллярного всасывания влаги и ее перемещение.

**Ключевые слова:** диффузия, капилляры, диполь, градиенты влаги, диэлектрическая постоянная, пористое тело, влагоперенос

## FACTORS AFFECTING ON CAPILLARY WATER SATURATION OF CONCRETE SAMPLES

**Romanenko I.I., Pint E.M., Petrovnina I.N., Elichev K.A., Romanenko M.I.**  
 Penza State University of Architecture and Construction, Penza, e-mail: rom1959@mail.ru

This article is devoted to the study of moisture transfer in concrete samples. Concrete is one of the most popular building material in the world. From it erected as a residential building, and unique constructions bridge structures, housing nuclear and hydroelectric power plants. The moisture content of the concrete has a significant influence on the mechanical properties and the durability. The ability to transfer moisture in the porous medium plays an important role in the destruction of building materials prepared from different concrete and mortar. In general, there are two distinct models for the study of moisture in porous materials. This diffusion model, in which the main role played by the cross-section of the material and the initial stage of a set of concrete strength is determined by the diffusion of water. Another model describes the capillary transport mechanism. It simulates the penetration and movement of fluid through the capillaries in the pore space. The processes in the cylindrical capillary with constant cross section and in contact with an infinite fluid reservoir. This ignores the complexity of the configuration of the pore structure and surface heterogeneity of material far. It is found that the direction of change in pore structure through the use of «vaccination» of the material has a significant influence on the processes of capillary absorption of water and its movement.

**Keywords:** diffusion, capillaries, dipole, moisture gradients, dielectric constant, a porous body, vlagoперенос

Влагоперенос в бетоне является сложным и малоизученным процессом. Это обусловлено многими факторами, влияющими на функционирование транспортных механизмов в сочетании с различными типами пор, которые, как правило, пронизывают бетоны. Механизм капиллярного всасывания с большой уверенностью можно считать движущей силой в частично насыщенном объеме твердого тела сетью капиллярных пор.

В то же время не ясен механизм переноса влаги в порах геля. Ученые как в России, так и за рубежом считают, что размеры поргеля слишком малы чтобы капиллярные

силы в них играли главную роль. В исследованиях [9–10] установлено, что главенствующую роль играет диффузный механизм переноса влаги.

Роль воздушных пустот в процессах массообмена в бетоне менее ясна. Размер воздушных пор намного больше, чем размеры капилляров, и механизм капиллярного всасывания в данном случае не применим. Он не работает. Воздушные поры играют оставочную роль в переносе влаги [11–12].

Транспортные механизмы определяются размерами пор, видом вяжущего, химическими добавками, пропитками, размерами поперечного сечения образцов.

Поэтому во время проведения исследований перед нами, стояла задача разработать модель для прогнозирования движения воды в бетоне при различных типах воздействия и создать механизм для снижения капиллярного насыщения материалов из бетона. Поэтому ограничиваемся рассмотрением потока жидкости за счет капиллярного всасывания.

Простейшая теоретическая модель, которая связывает высоту поднятия жидкости по капилляру с радиусом пор  $r$  в бетонах для двухкомпонентной системы может быть определена по формуле Жюрена (полученная из формулы Лапласа для определения подъемной силы мениска)

$$H_k = \frac{2\alpha \cdot \cos\theta}{r \cdot g \cdot \rho}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – поверхностное натяжение жидкости (для воды  $\alpha = 72,8$  дин/см при  $t = 20^\circ\text{C}$ );  $\theta$  – краевой угол смачивания;  $r$  – радиус капилляра;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\rho$  – плотность воды.

При полном смачивании всех частиц материала капилляра ( $\theta = 0$ ) и численных значениях  $\alpha$  и  $g$

$$H_k = 0,15/r. \quad (2)$$

Отсюда следует, что высота поднятия жидкости по капиллярам обратно пропорциональна радиусу капилляра. В то же время исследованиями было выявлено, что, на высоту подъема жидкости в капиллярно пористом материале влияет время экспозиции и тогда зависимость высоты подъема жидкости от времени определяется по формуле

$$H_t = \sqrt{r \cdot \infty \cdot \frac{\cos\theta}{2} \cdot \mu \cdot \sqrt{t}}, \quad (3)$$

где  $H_t$  – высота капиллярного поднятия воды в бетонах;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости.

Уравнение (3) показывает: высота капиллярного поднятия воды в бетонах пропорциональна квадратному корню от времени экспонирования. Уравнение (3) описывает модель трубы (капилляра) из бетона, представляющей пористую среду, и является приближенной.

В общем случае, перенос жидкости происходит через поры, микротрещины и пустоты бетона. При нормальных условиях со средним содержанием влаги и умеренной температуры основной движущей силой транспортного процесса в пористой среде

являются градиенты влаги и температуры. При низком содержании влаги основным механизмом переноса влаги осуществляется путем диффузии пара или капиллярного всасывания, когда поры находятся в контакте с жидкостью.

В течение последнего десятилетия все большая часть применяемого бетона обладает малой капиллярной пористостью. Это связано с переходом от традиционных бетонов к высокоэффективным реакционно порошковым с более низкой пористостью. В этих бетонах происходит трансформация реологической матрицы, обеспечивающая получение рациональной реологии [1, 2]. При этом составляющие реологическую матрицу микродисперсная каменная мука, тонкозернистые и мелкий пески выступают активными компонентами, влияющими на формирование порового пространства бетона [2].

Тем не менее, несмотря на снижение капиллярной пористости, при низких значениях  $W/W$  отношения, такие бетоны после предварительной сушки показывают картину водонасыщения типичную для традиционных бетонов, описываемую формулой (3) при одностороннем всасывании жидкости через капилляры. В результате исследований было установлено, что процесс водонасыщения бетона зависит от степени насыщения пор в начальный момент [3].

Экспериментальные данные [4, 8] свидетельствуют, что размер поперечного сечения образца существенно влияет на транспортный механизм водопоглощения. Формулы, описывающие теоретически процесс водонасыщения бетонного образца, не могут в точности описать происходящие явления, так как вступают в противоречие с нашими первоначальными допущениями, которые предполагают последующее набухание геля. Отклонения также происходят и за счет изменения в капиллярной абсорбции [4].

Молекула воды является диполем, равным по величине, но разным по знаку электрических зарядов на противоположных ее концах, а частицы вяжущего заполнителя на своей поверхности имеют положительные и отрицательные электрические заряды, в зависимости от того, из каких материалов состоит частица.

Под действием зарядов частиц происходит ориентация диполей воды. Расположением молекул воды в капилляре можно иллюстрировать процесс между двумя параллельными плоскостями стекол, частично погруженных в воду. Вода в узкой щели

капилляра находится в напряженном состоянии, вызванном взаимодействием зарядов системы капилляр – вода.

Согласно теории Лапласа [1] в напряженном состоянии находится поверхностная пленка жидкости, а остальная часть жидкости не связана со стенками капилляра. Помимо электрических сил на молекулы воды в капилляре действуют и силы гравитации. Из условия статического равновесия между электрическими силами и гравитационными следует, что высота подъема воды в капилляре равна

$$h_0 = \frac{q_c \cdot q_b}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot r^2}, \quad (4)$$

где  $h_0$  – высота столба жидкости в щели капилляра;  $q_c$  – суммарный электрический заряд, приходящийся на  $1 \text{ см}^2$  стенки щели;  $q_b$  – суммарный электрический заряд молекулы воды, расположенный на  $1 \text{ см}^2$  срединной плоскости;  $\varepsilon$  – диэлектрическая постоянная;  $r^2$  – расстояние между плоскостями щели;  $\rho_b$  – плотность воды.

В бетонах капилляр представляется тонкой трубкой, а не щелью. В результате чего притяжение к стенкам будет больше, чем в плоской щели.

$$h_{\text{тп}} = \frac{2q_c \cdot q_b}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot r}. \quad (5)$$

Для экспериментов использовали цилиндрические образцы бетона диаметром 100 мм, изготовленные при В/Ц отношении 0,51 (рис. 1). Материалы: портландцемент Вольский ЦЕМ II/A-42,5 Н; песок Сурский с  $M_{\text{кр}} = 1,51$ ; щебень гранитный фракции 3–8 мм; вода питьевая. Испытывали шлакощелочные бетоны (ШЩБ) на составах идентичных портландцементов. Высота цилиндрических образцов 100 мм. На расстоянии 30 и 50 мм от основания образца делалась проточка алмазным диском на глубину 30 мм. Погружение образца в воду осуществлялось на глубину 10 мм. Время экспозиции: 3, 6, 9, 12, 15 мин, 1 ч, 2, 3, 4...48 ч. Испытания проводили на образцах в возрасте 28 суток твердения в нормальных условиях после сушки в сушильном шкафу при температуре  $105^\circ\text{C}$  до постоянного веса. Боковая поверхность образцов обрабатывалась кремнийорганическим составом на всю высоту с целью исключения бокового всасывания влаги.

Зависимость прироста массы образцов от времени экспозиции представлена на рис. 2.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что форма, площадь поперечного сечения образца существенно влияют на кинетику водопоглощения, определяемую диффузией и капиллярным транспортным механизмом поднятия воды.

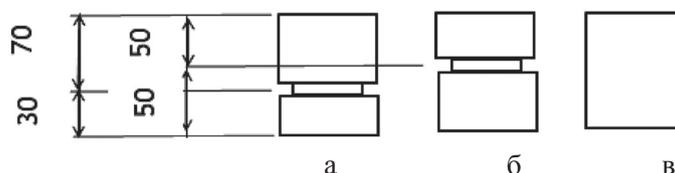


Рис. 1. Бетонные образцы для испытания на водопоглощение: а – с проточкой на расстоянии 30 мм; б – с проточкой на расстоянии 50 мм; в – без проточки

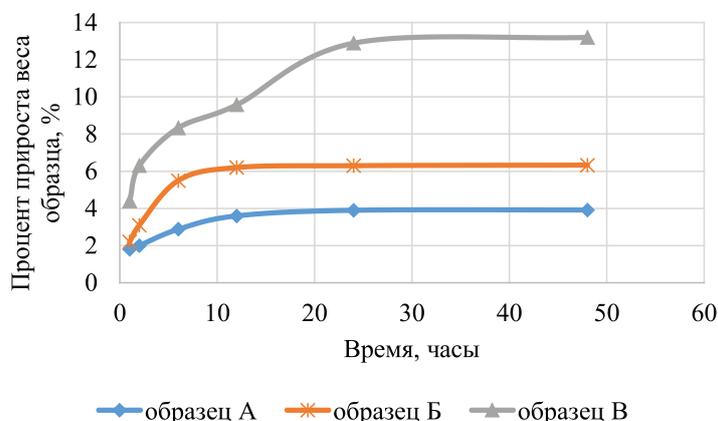


Рис. 2. Зависимость водопоглощения бетонных образцов при В/Ц = 0,51 (образцы представлены на рис. 1)

Данная зависимость не является линейной и носит квадратичную зависимость. Полагаем, что капиллярные разрывы, состоящие из узких проходов или больших пустот вдоль пути движения водяного потока по системе капиллярных пор, могут создавать дополнительные препятствия. И тем самым вносятся граничные условия на процессы массопереноса в пористом теле. По существу, необходимо вносить в рассматриваемую модель условия, связанные с ветвистостью капилляров, выходом их на боковые поверхности и на возмозжные крупные поры.

В настоящей работе были проведены исследования возможности улучшения стойкости бетонов в условиях капиллярного водонасыщения бетонов путем введения технической «прививки» порового пространства. В качестве «прививочного» материала использовано отработанное машинное масло, вводимое на стадии приготовления шлакощелочного бетона (ШЩБ).

Традиционные исследования для получения материалов с повышенной стойкостью направлены на получение бетонов с низкой капиллярной пористостью и высокой плотностью конгломератов в зоне контакта заполнителя с вяжущим.

П.Н. Гончаров, А.А. Пашенко, и Б.А. Крылов исследовали ШЩБ в условиях капиллярного подсоса, армированных дисперсными материалами.

Было установлено, что ШЩБ обладают повышенной коррозионной стойкостью в углеводородных средах и кислых неорганических растворах, вследствие низкой капиллярной пористости, высокой плотности бетонов и адгезии к полиакриловым армирующим волокнам. Высокая стоимость армирующих материалов ограничивает широкое применение.

Однако предложенная нами технология формирования макро- и микроструктуры бетона способствует созданию механизма «избирательности» по отношению к агрессивным внешним воздействиям, т.е. происходит самоорганизация внутреннего пространства пор.

Все исследования проводились на гранулированных шлаках Новолипецкого, Челябинского и Череповецкого металлургических заводов, электротермофосфорном шлаке ПО «Фосфор» (г. Тольятти). В качестве активаторов твердения использованы растворы: NaOH,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , содощелочной плав (СЩП) и их композиции.

Шлакощелочное вяжущее (ШЩВ) отличается от портландцемента отсутствием в продуктах гидратации высокоосновных гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция.

В.Д. Глуховский и О.Н. Сикорский [4] установили, что ШЩВ взаимодействует практически со всеми силикатными и алюмосиликатными пылеватыми частицами, входящими в состав заполнителя, что способствует получению высокой плотности композита. А в продуктах гидратации доминируют гидрогранаты и низкоосновные гидросиликаты кальция.

Нами было установлено, что шлакощелочные бетоны, приготовленные на растворе NaOH, по сравнению с бетонами на портландцементе имеют в 1,1–1,5 раза больше крупных пор с эффективным диаметром более 0,1 см.

Использование в качестве активатора твердения раствора  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  способствует снижению диаметра пор и капилляров в 1,5–2 раза.

При введении диспергированного машинного масла в ШЩВ происходит модификация внутренней поверхности пор, капилляров и зон контакта продуктов гидратации ШЩВ с заполнителями, доказательством которого служит явление капиллярного подсоса и угла смачивания.

Молекула воды является диполем, равным по величине, но разным по знаку электрических зарядов на противоположных ее концах, а частицы шлака, заполнителя на своей поверхности имеют положительные и отрицательные электрические заряды, в зависимости от того, из каких материалов состоит частица. Водный раствор солей в капилляре находится в напряженном состоянии, вызванном взаимодействием зарядов системы капилляр – вода. Исходя из равенств (4) и (5) можно предположить, что если стенки капилляров, пор и разрывов внутренней сплошности пористого тела не будут иметь электрического заряда за счет поверхностного слоя моторного масла, то никакого капиллярного всасывания за счет электрических зарядов не будет или будет ограничено. Это подтверждено нашими опытами. ШЩБ с модифицированной структурой дисперсным машинным маслом практически не впитывают масла, растворы солей и сахара. Это способствует повышению долговечности бетонных изделий на основании ШЩВ. На рис. 3 представлена кинетика водопоглощения ШЩБ при Р/Ш отношении 0,5.

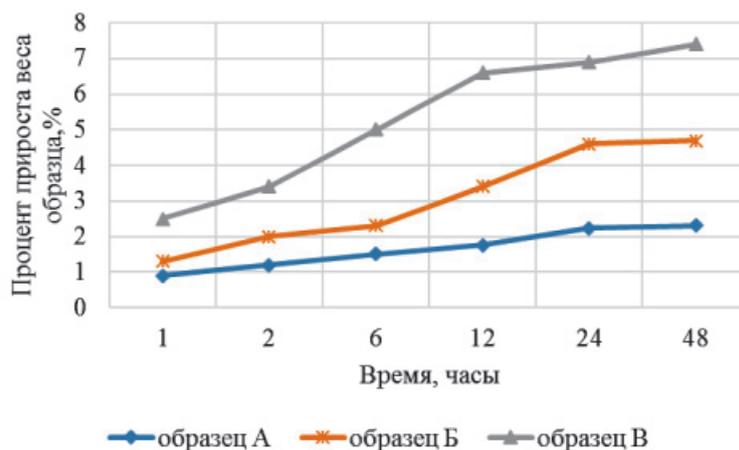


Рис. 3. Зависимость водопоглощения ШЩБ образцов при  $V/C = 0,5$  (образцы представлены на рис. 1)

Прослеживаются отклонения от правил, используемых для описания процесса водопоглощения пористым телом:

- мелкопористая структура бетонных образцов характеризуется наличием капилляров с диаметром порядка нескольких ангстрем.

Очень маленький расчетный размер пор, а также модифицирование поровой поверхности поверхностно-активными веществами свидетельствуют о том, что структура пор сильно препятствует проникновению воды. Это вызывает блокирование пор в бетоне и приводит к низкой проницаемости. Тогда механизмы капиллярного всасывания не могут самостоятельно объяснить процессы водопоглощения пористым телом.

- Полученные результаты по изучению капиллярного водопоглощения свидетельствуют, что процесс этот протекает длительное время. Они не совпадают с теоретически рассчитанными. Экспериментальные данные получены ниже расчетных [14, 20–21].

- Поглощение воды сухих образцов бетона зависит от поперечного сечения активной поверхности и траекторий линий всасывания. Таким образом, динамика, всасывания воды капиллярами неадекватно описывается уравнениями (1), (2), (3), (4). Транспортные свойства капилляров бетона были изучены при введении ряда граничных условий: бетон рассматривается как изотропный материал с однородной пористой структурой.

### Выводы

1. Результаты, полученные в экспериментальных исследованиях недостаточны

для оценивания всех искомых параметров влагопереноса в бетонных образцах и поэтому поиск оптимальной модели не может завершиться на данном этапе.

2. Все компоненты композиционного материала – бетона обладают пористостью различного уровня. На перемещение влаги по капиллярам бетона накладываются условия, обусловленные параметрами капилляров и механизмами взаимодействия воды с продуктами гидратации клинкерного фонда вяжущего.

3. В рассматриваемых моделях не были учтены особенности высокоразвитой поверхности пор цементного камня и геля, а также выходы на боковую поверхность образцов.

4. В связи со сложностью создания приближенной модели переноса влаги в бетонных образцах были исследованы явления, связанные с поглощением и переносом влаги. При этом рассматривали движение по капиллярам большого диаметра и непосредственно за счет диффузии.

5. Установлено, что активное использование «прививочного» материала в качестве модификатора структуры бетона позволяет существенно влиять на процессы влагопереноса в бетонных изделиях и повысить эксплуатационные свойства.

### Список литературы

1. Бернацкий А.Ф., Целебровский Ю.В., Чунчин В.А. Электрические свойства бетона / под ред. доктора техн. наук, проф. Ю.Н. Верещагина. – М.: Энергия, 1980. – 280 с.
2. Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С. 103–106.
3. Калашников, В.И. Роль дисперсных и тонкозернистых наполнителей в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Суздальцев, Р.А. Дрянин, Г.П. Сехпосян // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 7. – С. 11–21.

4. Полищук Н.В., Панченко И.М., Панченко М.С., Карпович И.Н. Эффекты воздействия и последствие электрических полей на поднятие воды в микрокапиллярах // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 4. – С. 54–67.
5. Романенко И.И. Модифицированные шлакощелочные бетоны с добавками побочных продуктов биосинтеза: автореф. канд. техн. наук: 05.23.05: [Место защиты: Саратовский политех. институт]. – Саратов, 1993. – 17 с.
6. Романенко И.И. Модифицированные шлакощелочные бетоны с добавками побочных продуктов биосинтеза: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05: [Место защиты: Саратовский политех. институт]. – Саратов, 1993. – 167 с.
7. Романенко И.И. Коррозионная стойкость шлакощелочных бетонов на основе Новолипецкого металлургического шлама в органических средах / И.И. Романенко С.В. Михайлина // Эффективные строительные конструкции: сб. науч. работ. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, 2005. – С. 310–312.
8. Романенко И.И. Модифицированные шлакощелочные бетоны, используемые для производства плит по литейной технологии / И.И. Романенко, С.В. Михайлина // Строительные материалы. – 2006. – № 9. – С. 51–53.
9. Brennan J.K., Dong W. Molecular simulation of the vapour-liquid phase behavior of lennard-Jones mixtures in porous solids // Physical review E67. – 2003. – № 031503. – P. 1–6.
10. Marty N.S., Chen H. Simulation multi-component fluids in complex three- dimensional geometries by the lattice Boltzmann method // Physical review. – 1996. – E 53 1. – P. 743–750.
11. Per Gunnar Burstrom, Byggnadsmaterial. – Sweden, Sudentlitteratur 2001. – 546 p.
12. Kaufman J., Studer W., and Schenker K. Study of water suction of concrete with magnetic resonance imaging methods. Magazine of concrete research 49. – 1997. – № 180. – P. 157–165.
13. Hung, Nguyen T.; Frank, Melandso; Stefan, Jacobsen (2009): Analytical and numerical solution for capillary suction velocity and hight in pores with multiple sizes. Paper part 1, submitted together with this paper.
14. W.D.; Hall, C. Water transport in brick, stone and concrete. – Sponpress London and New York, 2002. – 318 p.
15. Lockingston D.A., and Parlange J.Y. A new equation for macroscopic description of capillary rise in porous media // Colloid and Interface Science. – 2004. – Vol. 278. – Pp. 404–409.
2. Kalashnikov V.I. Terminologiya nauki o betone novogo pokoleniya // Stroitelnye materialy. 2011. no. 3. pp. 103–106.
3. Kalashnikov, V.I. Rol dispersnykh i tonkozernistykh napolniteley v betonakh novogo pokoleniya / V.I. Kalashnikov, O.V. Suzdaltsev, R.A. Dryanin, G.P. Sekhposyan // Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. 2014. no. 7. pp. 11–21.
4. Polishchuk N.V., Panchenko I.M., Panchenko M.S., Karpovich I.N. Effekty vozdeystviya i posledeystviya elektricheskikh poley na podnyatie vody v mikrokapillyarakh // Elektronaya obrabotka materialov. 2002. no. 4. pp. 54–67.
5. Romanenko I.I. Modifitsirovannye shlakoshchelochnye betony s dobavkami pobochnykh produktov biosinteza: Avtoreferat na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. Nauk: 05.23.05: [Mesto zashchity: Saratovskiy polit. institut]. Saratov, 1993. 17 p.
6. Romanenko I.I. Modifitsirovannye shlakoshchelochnye betony s dobavkami pobochnykh produktov biosinteza: Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. Nauk: 05.23.05: [Mesto zashchity: Saratovskiy polit. institut]. Saratov, 1993. 167 p.
7. Romanenko I.I. Korrozionnaya stoykost shlakoshchelochnykh betonov na osnove Novolipetskogo metallurgicheskogo shlaka v organicheskikh sredakh / I.I. Romanenko S.V. Mikhaylina, // Effektivnye stroitelnye konstruktzii: sb. nauch. rabot. Penza: Izdatelstvo Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta arkhitektury i stroitelstva, 2005. pp. 310–312.
8. Romanenko I.I. Modifitsirovannye shlakoshchelochnye betony, ispolzuemye dlya proizvodstva plit po litevoy tekhnologii / I.I. Romanenko, S.V. Mikhaylina // Stroitelnye materialy. 2006. no. 9. pp. 51–53.
9. Brennan J.K., Dong W. (2003): Molecular simulation of the vapour-liquid phase behavior of lennard-Jones mixtures in porous solids. Physical review E67, 031503, 1–6.
10. Marty N.S., and Chen H. (1996): Simulation multi-component fluids in complex three- dimensional geometries by the lattice Boltzmann method. Physical review, E 53 1, 743–750.
11. Per Gunnar Burstrom, Byggnadsmaterial, Sweden, Sudentlitteratur 2001. 546 p.
12. Kaufman J., Studer W., and Schenker K. (1997): Study of water suction of concrete with magnetic resonance imaging methods. Magazine of concrete research 49, no. 180, pp. 157–165.
13. Hung, Nguyen T.; Frank, Melandso; Stefan, Jacobsen (2009): Analytical and numerical solution for capillary suction velocity and hight in pores with multiple sizes. Paper part 1, submitted together with this paper.
14. W.D.; Hall, C. (2002): Water transport in brick, stone and concrete. Sponpress London and New York, 318p.
15. Lockingston D.A., and Parlange J.Y. (2004): A new equation for macroscopic description of capillary rise in porous media. Colloid and Interface Science, Vol. 278, pp. 404–409.

## References

1. Bernatskiy A.F., Tselebrovskiy Yu.V., Chunchin V.A. Elektricheskie svoystva betona / Pod red. doktora tekhn. nauk, prof. Yu.N. Vereshchagina. M.: Energiya, 1980. 280 p.