

16. Vandamme, M. Nanoindentation investigation of creep properties of calcium silicate hydrates / M. Vandamme, F.J. Ulm // *Cement and Concrete Research*. – 2013. – Vol. 52. – P. 38-52.
17. Pichler, Ch. A multiscale creep model as basis for simulation of early-age concrete behavior / Ch. Pichler, R. Lackner // *Computers and Concrete*. – 2008. – Vol. 5, iss. 4. – P. 295-328.
18. Maekawa, K. *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete* / K. Maekawa, T. Ishida, T. Kishi. – New York; London: CRC Press, 2008. – 658 P.
19. Tennis, P.D. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes / P.D. Tennis, H.M. Jennings // *Cement and Concrete Research*. – 2000. – Vol. 30, iss. 6. – P. 855-863.
20. CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modelling Package: Internal Report (NISTIR) / National Institute of Standards and Technology; D. Bentz. – Gaithersburg, 2005. – 226 P.
21. Филимонова, Н.В. Моделирование структуры и собственных деформаций расширяющихся сульфоалюминатных цементных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Н.В. Филимонова. – Брест, 2006. – 223 с.
22. Papadakis, V.G. Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete / V.G. Papadakis // *Cement and Concrete Research*. – 1999. – Vol. 29, iss. 1. – P. 79-86.
23. Lu, B. Nearest-surface distribution-functions for polydispersed particle-systems / B. Lu, S. Torquato // *Physical Review.A*. – 1992. – Vol. 45, iss. 8. – P. 5530-5544.
24. Aboudi, J. *Mechanics of Composite Materials. A Generalized Multiscale Analysis Approach* / J. Aboudi, S.M. Arnold, B.A. Bednarczyk. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – 984 P.
25. Krajcinovic, D. Chemo-micromechanics of brittle solids / D. Krajcinovic, M. Basista, K. Mallick, D. Sumarac // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1992. – Vol. 40, iss. 5. – P. 965-990.
26. Choktaweekarn, P. A model for predicting the coefficient of thermal expansion of cementitious paste / P. Choktaweekarn, S. Tangtermsirikul // *Science Asia*. – 2009. – Vol. 35, No. 1. – P. 57-63.
27. Xi, Y. Shrinkage of cement paste and concrete modelled by a multiscale effective homogeneous theory / Y. Xi, H.M. Jennings // *Materials and Structures*. – 1997. – Vol. 30. – P. 329-339.
28. Coussy, O. *Poromechanics* / O. Coussy. – Chichester: John Wiley & Sons, 2004. – 312 P.
29. Garboczi, E.J. Elastic moduli of a material containing composite inclusions: Effective medium theory and finite element computations / E.J. Garboczi, J.G. Berryman // *Mechanics of Materials*. – 2001. – Vol. 33, iss. 8. – P. 455-470.
30. Bazant, Z.P. Comparison of Approximate Linear Methods for Concrete Creep / Z.P. Bazant, L.J. Najjar // *Journal of the Structural Division*. – 1973. – Vol. 99, iss. 9. – P. 1851-1874.
31. The fib Model Code for Concrete Structures 2010 / J. Walraven [et al.]; ed.: P. Beverly. – Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2013. – 434 P.
32. Ito, H. Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete / H. Ito, I. Maruyama, M. Tanimura, R. Sato // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2004. – Vol. 2, iss. 2. – P. 155-174.
33. Semianiuk, V. Early age strains and self-stresses of expansive concrete members under uniaxial restraint conditions / V. Semianiuk, V. Tur, M.F. Herradora, M.G. Paredes // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 131. – P. 39-49.
34. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
35. Tazawa, E. Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials / E. Tazawa, S. Miyazawa // *Magazine of Concrete Research*. – 1997. – Vol. 49, iss. 178. – P. 15-22.
36. Lee, H.K. Autogenous shrinkage of high-performance concrete containing fly ash / H.K. Lee, K.M. Lee, B. G. Kimy // *Magazine of Concrete Research*. – 2003. – Vol. 55, iss. 6. – P. 507-515.
37. Lee, K.M. Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag / K.M. Lee, H.K. Lee, S.H. Lee, G.Y. Kim // *Cement and Concrete Research*. – 2006. – Vol. 36, iss. 7. – P. 1279-1285.
38. Wei, Y. Modeling of autogenous deformation in cementitious materials, restraining effect from aggregate, and moisture warping in slabs on grade: diss. ... Doctor of Philosophy / Y. Wei. – University of Michigan, 2008. – 160 P.
39. Lura, P. *Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete* / P. Lura. – Delft: Delft University Press, 2003. – 180 P.
40. Akcay, B. Optimization of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concrete / B. Akcay, M.A. Tasdemir // *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23, iss. 1. – P. 353-363.
41. Bogue, R.H. *Calculation of the Compounds in Portland Cement* / R.H. Bogue // *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*. – 1929. – Vol. 1, iss. 4. – P. 192-197.

Материал поступил в редакцию 29.01.2018

KRAVCHENKO V.V. Modeling of volumetrical deformations of the cement-based composite with internal curing

The basic provisions of the internal curing, the main causes of autogenous shrinkage in cement paste are presented. The theoretical aspects of the proposed model for the volume shrinkage and expansion deformations of cement-based composite prediction with internal curing using presoaked lightweight aggregates are described, including verification of the proposed model based on the test method.

УДК 691.32 (043.3)

Беломесова К.Ю., Павлова И.П.

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЫ БЕТОНОВ

Невзирая на то, что бетон сегодня является основным строительным материалом как по объемам выпуска, так и по тем архитектурно-конструктивным возможностям, которые он позволяет реализовать, большинство существующих подходов к прогнозированию основных свойств этого композита базируется на феноменологических подходах и эмпирических зависимостях. Перманентный прогресс в технологии бетонов и появление многокомпонентных сложных иерархических

композитных систем, по-прежнему объединенных весьма глобальным определением «бетон», требуют новых подходов к прогнозированию свойств. Одним из перспективных направлений является концепция «управляемого структурообразования».

В основе теории управляемого структурообразования лежат положения физико-химической механики дисперсных систем, сформулированные П.А. Ребиндером, и принцип соответствия О.П. Мчедлова-

Беломесова К.Ю., магистр, аспирант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Павлова Инесса Павловна, к.т.н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

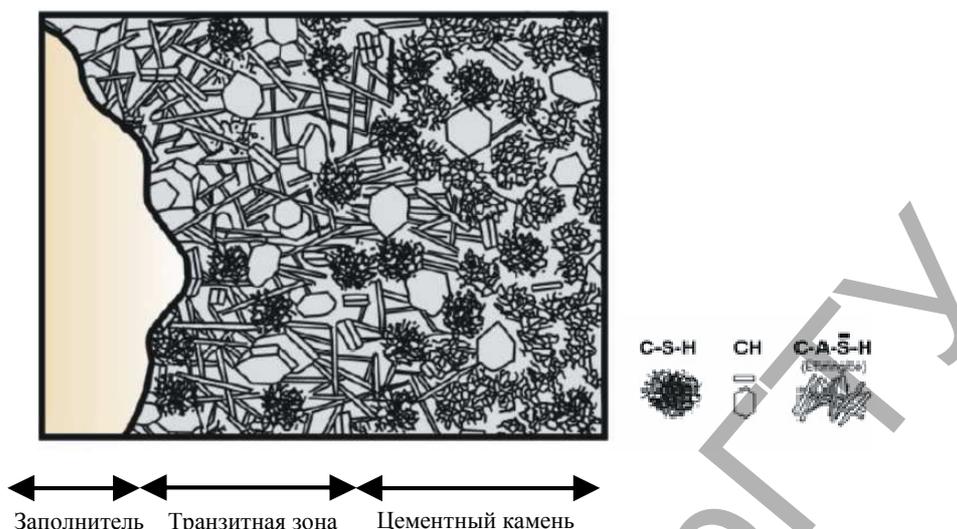


Рисунок 1 – Схематическое изображение микроструктуры бетона как трехкомпонентного композита согласно [5]

Петросяна. Бетон – композиционный материал, свойства которого зависят от множества факторов. Его структурообразование – это комплекс сложнейших процессов, происходящих на различных уровнях, от атомно-молекулярного (гидратация цемента) до макроуровня (усадка, седиментация и пр.).

Поскольку бетон представляет собой капиллярно-пористое тело, то его основные свойства будут определяться характером генезиса пористости. Изучение структуры порового пространства и его взаимосвязей с прочностью, морозостойкостью, проницаемостью и рядом других свойств – один из наиболее перспективных путей получения бетонов с заданными свойствами. Формирование поровой структуры бетона обусловлено, в первую очередь, характером взаимодействия цемента с водой, влиянием технологических и природных факторов, наличием химических и минеральных добавок. При этом, весьма существенна роль заполнителей, особенно при рассмотрении «геометрии» и «механики» структурообразования. Таким образом, структура бетона должна рассматриваться на разных уровнях иерархии, начиная с первого уровня «раствор – крупный заполнитель», заканчивая «микробетоном» Юнга. При этом, учитывая весь комплекс сложных физико-химических явлений, происходящих при твердении, следует выделить отдельно т. н. транзитную зону бетона.

Благодаря многочисленным исследованиям контактной зоны системы «заполнитель – цементный камень» [1–4], стало возможным утверждать о наличии некоторой области цементного камня толщиной около 50–60 мкм, прилегающей к зерну заполнителя. При этом, несмотря на то, что данная область является частью цементной матрицы, по своим свойствам она отличается, как от заполнителя, так и от цементного камня. Данную область принято называть «транзитной зоной» (далее ТЗ) (рисунок 1).

Транзитная зона представляет собой область толщиной около 50 мкм с пониженным количеством негидратировавших зерен цемента, с повышенной пористостью и большими размерами кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по сравнению с остальным объемом цементного камня. Важным является тот факт, что транзитная зона, а именно её микроструктура, влияет на деформативно-прочностные характеристики, проницаемость, коррозионную стойкость, усадочные деформации бетона, являющимися важнейшими свойствами композита.

Транзитная зона является самым важным и в то же время самым «слабым» звеном в системе «заполнитель – цементная матрица», что является толчком для более детального исследования данной области, а также поиска способов совершенствования микроструктуры ТЗ. В традиционном бетоне на основе портландцемента ТЗ представляет собой микрообъем цементного камня вокруг заполнителя толщиной примерно 35–50 мкм, характеризующийся повышенной пористостью (примерно на 10% выше пористости остальной матрицы), при этом поры ТЗ несколько крупнее, чем в остальном

объеме. Так же для ТЗ характерно пониженное содержание CSH, более высокое В/Ц, и преобладание укрупненных кристаллов CH (все в сравнении с остальным объемом цементной матрицы бетона).

Сам процесс формирования транзитной зоны является временной функцией и обуславливается двумя параллельно протекающими эффектами – т. н. «эффектом стены» [6] и «эффектом одностороннего роста» [7]. Так как средний диаметр заполнителя значительно больше среднего диаметра частицы цемента (300..500 мкм к 10..20 мкм), то заполнитель можно представить в виде плоской пластины, по отношению к которой происходит упаковка цементных частиц. «Эффект стены» обуславливает беспорядочную упаковку цементных зерен у поверхности заполнителя и, как следствие, меньшее количество цементных частиц и большее количество капиллярных пор, заполненных водой, чем в остальной цементной матрице. Снижение количества зерен цемента в ТЗ приводит к повышению В/Ц отношения.

В процессе гидратации поры цементной системы заполняются продуктами новообразований, которые поступают со всех направлений. Однако у поверхности заполнителя рост новообразований осуществляется с одной стороны, что также способствует повышению пористости транзитной зоны. Ионы со значительно большей подвижностью, такие как Ca^{2+} , Al^{3+} и SO_4^{2-} имеют возможность проникнуть в более пористую транзитную зону, и, как результат, преобладание в ТЗ кристаллов гидроксида кальция (CH) и этtringита. Кроме того, ионы Si^{2+} обладают низкой подвижностью и образуют продукты гидратации вблизи источников растворения, а так как в ТЗ содержится изначально меньшее количество цементных зерен, то в результате транзитная зона характеризуется низким содержанием CSH (рисунок 2).

Необходимо напомнить, что, помимо требований по прочностным характеристикам, к высококачественным бетонам предъявляется ряд требований по долговечности. И если прочность во многом зависит непосредственно от микроструктуры ТЗ, то долговечность бетона в значительной степени определяется транспортными свойствами (диффузионной способностью, проницаемостью), которые напрямую связаны с явлением перколяции ТЗ в бетоне.

Говоря об оптимизации свойств ТЗ для получения высококачественных бетонов, необходимо понимать, что оптимизация подразумевает под собой комплекс мероприятий, направленных как непосредственно на улучшение микроструктуры ТЗ, так и на снижение количества перколяционных зон. Если последнее достигается путем рационального подбора заполнителей с определенным гранулометрическим составом и назначения оптимального расхода вяжущего, то улучшение микроструктуры может быть достигнуто различными путями: – применением активного заполнителя; – применением ультрадисперсных наполнителей; – применением эффективных суперпластификаторов; – применением специальных вяжущих.

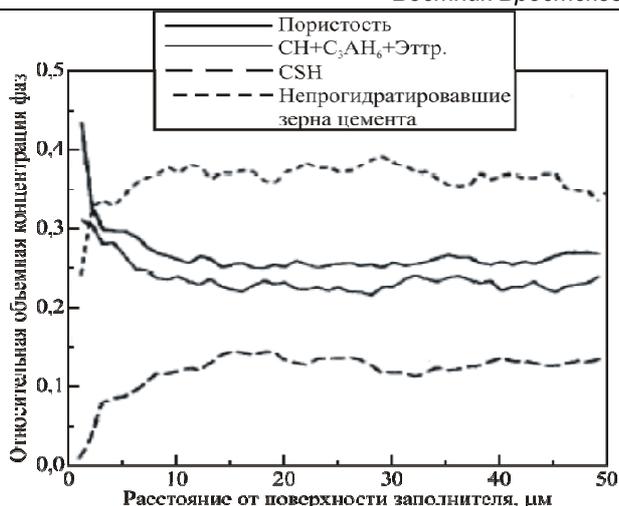


Рисунок 2 – Распределение основных фаз цементной системы в ТЗ в зависимости от расстояния от поверхности заполнителя, В/Ц=0,45, степень гидратации $\alpha=70\%$ [5]

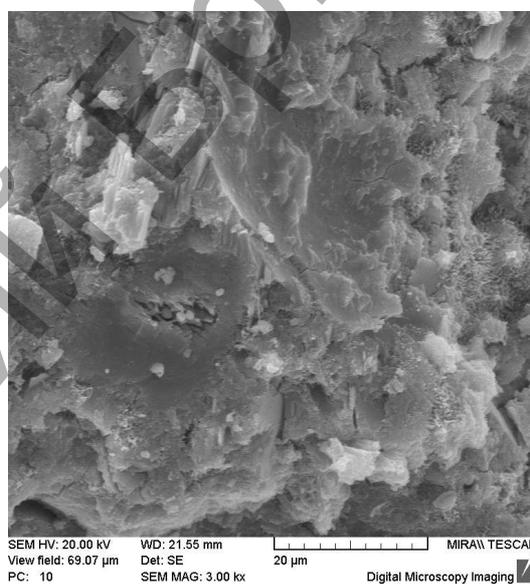
Рассматривая обобщенную классификацию структурных элементов цементного камня и бетона (рис. 3) с учетом уровней структуры, дисперсности твердых частиц, энергии и формы связи влаги, механизма образования и размеров пор, можно выделить три характерных диапазона: $10^{-10}..10^{-8}$; $10^{-8}..10^{-6}$; $10^{-6}..10^{-2}$ м. Первый из них характеризует гидросиликатный гель как основную часть цементного камня, отвечающую за его свойства. Он включает частицы C-S-H фазы, гелевые поры и адсорбированную влагу. Гелевая пористость может изменяться от 24% до 37% от объема гидросиликатного геля. Второй диапазон представлен частицами гидратных новообразований (портландит, АFm, АFt – фазы), капиллярными порами, частично или полностью заполненными структурированной водой. Транзитная зона «цементный камень – заполнитель» также является представителем второго диапазона.

К третьему диапазону относятся исходные частицы цемента, мелкий и крупный заполнитель, микрортрещины, раковины и воздухововлеченные поры, которые заполнены паргазовой смесью или частично водой. Наиболее исследованы структурные компоненты третьего диапазона, что обусловлено, в первую очередь, доступностью методов исследования. Наименее исследован первый диапазон. Однако с развитием технологии современных бетонов, повыше-

нием дисперсности их компонентов исследование данного диапазона становится все более актуальным. Особенно это касается вопросов генезиса пор цементного камня и свойств жидкой фазы.

Генезис пористости цементного камня зависит от целого ряда факторов, которые и могут являться своеобразными «рычагами» для управления структурообразованием. При этом необходимо определить их положительное и отрицательное влияние на структуру. Исходя из вышеизложенного, следует считать, что снижение количества и размеров капиллярных пор является положительным фактором с точки зрения структурообразования.

В лаборатории самоупроченных конструкций БрГТУ на протяжении ряда лет ведутся исследования напрягающих бетонов на основе сульфоалюминатных комплексов. Ряд накопленных данных, включая собственные исследования, позволяет говорить о более высоких эксплуатационных характеристиках таких бетонов. Не последнюю роль в этом играет улучшение структуры транзитной зоны за счет «армирования» порового пространства «иголками» этtringита. Благодаря сотрудничеству с кафедрой вяжущих веществ БГТУ, были проведены микроскопические исследования образцов бетона на основе сульфоалюминатных расширяющихся добавок (см. рис. 4).



а)

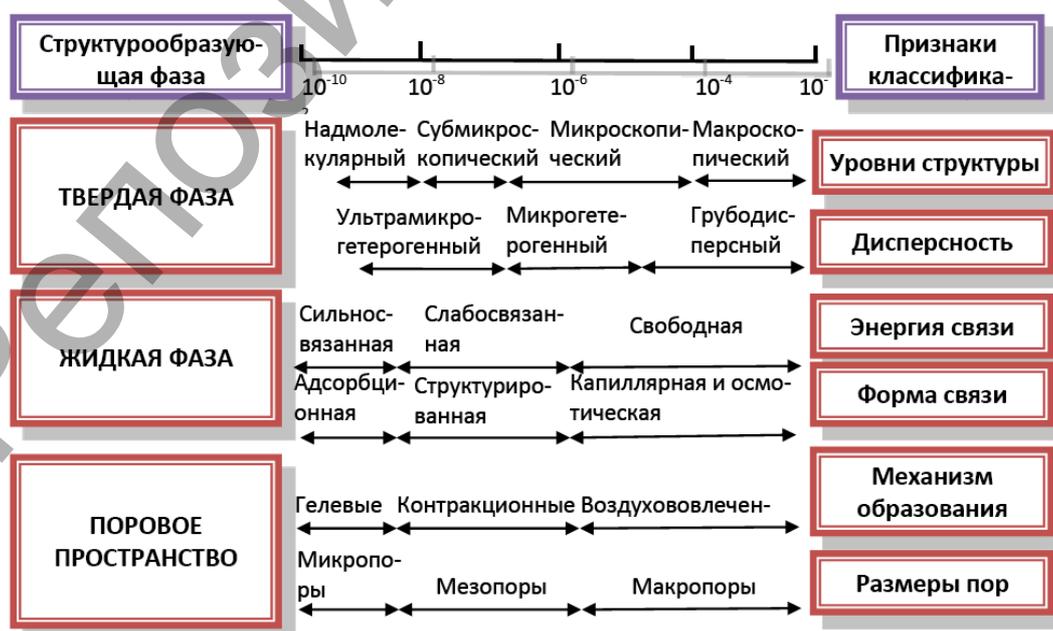
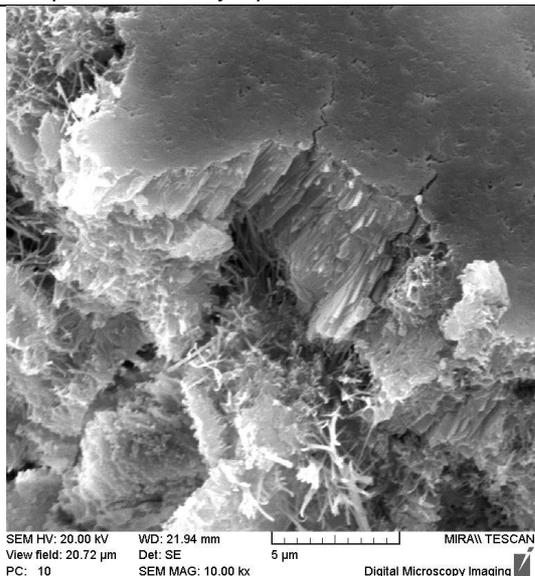


Рисунок 3 – Классификация структурных элементов бетона



а) «обычный» бетон, б) напрягающий бетон

Рисунок 4 – Микроструктура транзитной зоны

Как видно из представленных рисунков, транзитная зона обычного бетона представлена достаточно «рыхлой» структурой, сформированной гексагональными кластерами $\text{Ca}(\text{OH})_2$, в то время как в структуре напрягающего бетона хорошо видно «ветвистые кристаллы» этtringита, которые играют роль своего рода «стяжек» или «мостиков» в поровом пространстве.

Применяя расширяющиеся добавки, в состав которых входит метакаолин, можно наблюдать следующие эффекты: эффект наполнения благодаря колоссальной удельной поверхности (более 200 000 $\text{см}^2/\text{г}$), пуццолановый эффект благодаря высокому содержанию SiO_2 (около 60%), и эффект 3-D армирования благодаря высокому содержанию алюминатов (около 40%). Данные эффекты протекают параллельно, накладываясь и усиливая друг друга, в результате чего возникает синергетический эффект.

Улучшение микроструктуры и компенсация усадочных явлений позволяет применять модифицированные вяжущие как для получения высококачественных самоуплотняющихся бетонов, так и для получения бетонов повышенной непроницаемости для эксплуатации в различных агрессивных средах.

Заключение

- Технология получения бетонов высокой эксплуатационной надежности должна базироваться на современных подходах к прогнозированию свойств композитов, включая моделирование и концепцию «управляемого структурообразования».
- Рассмотрение бетона как сложной иерархической структуры позволяет, улучшая либо изменяя свойства на каждом из уровней, в итоге получать композит с заданными характеристиками.
- Применение расширяющихся вяжущих (в данном случае метакаолиновых комплексов) позволит улучшить свойства транзитной зоны путем достижения эффекта наполнения, пуццоланового эффекта и эффекта 3-D.
- Применение бетонов с «улучшенной» транзитной зоной позволит решить ряд сложных технологических задач, в т. ч. в сфере ремонтов и гидроизоляции.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Monteiro P.J.M., Mehta P.K. Interaction between Carbonate Rock and Cement Paste / P.J.M. Monteiro, P.K. Mehta // *Cem. and Concr. Res.* – 1986. – № 2. – P. 127–134.
2. Prasad, M. Acoustic Microscopy of Portland Cement Mortar / M. Prasad, Y. Wang R.A. Livingstone // *Aggregate Interfaces.* – 1999. – P. 1–21.
3. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1998. – 768 с.
4. Hogan, F.J. Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag / F.J. Hogan, J.W. Meusel // *Cements, Concrete and Aggregates.* – 1981. – V 3. – № 1. – P. 40–52.
5. Barnes, B.D. The Contact Zone between Portland Cement Paste and Glass “Aggregate” Surfaces / B.D. Barnes, Diamond Sindy, W.L. Dolch // *Cem. and Concr. Res.* – 1978. – № 2. – P. 233–243.
6. Bradley, G. Water Soluble Polymers: the Relationship Between Structure, Dispersing Action, and Rate of Cement Hydration / G. Bradley, I.M. Howarth // *Cement, Concrete and Aggregates.* – 1986. – Vol. 8. – P. 68–75.
7. Структура, прочность и деформации бетонов / Под ред. А.Е. Десова. – Госстройиздат, 1966.
8. Rocha, J. Solid-state NMR studies of the structure and reactivity of metakaoline / J. Rocha, J. Klinowski // *Angewandte Chemie*, 1990. – Vol. 29. – № 5. – P. 553–554.

Материал поступил в редакцию 02.02.2018

BELOMESOVA K. Yu., PAVLOVA I.P. Concrete Interfacial Transition Zone Structure Optimization Approach

In article main approach for concrete interfacial transition zone structure adjustment are presented. In the capacity of one of the optimal choice to improvement expansive binders on the basis of sulpho-aluminate complex are proposed. Due to this a whole number of effects may be realized, such as filling and pozzolanic effects, and, of course, 3-D reinforcement effect. Consideration of concrete such as complex hierarchical structure and changing properties on each level allow to obtain in the end composite with specified characteristics.

УДК 624.012.45

Павлова И.П.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ САМОНАПРЯЖЕНИЯ НАПРЯГАЮЩЕГО ФИБРОБЕТОНА

Введение. При проектировании составов напрягающего бетона наряду с прочностными показателями проектной характеристикой также является величина самонапряжения как показатель энергетического потенциала материала [1–5]. Далее для определения величины самонапряжения бетона использована трехкомпонентная пространственная модель композита, состоящего из заполнителя, цементной матрицы, и расположенной между ними транзитной зоны.

Основные положения модели. При построении модели приняты следующие предпосылки:

- расширяющийся композит представлен в виде непрерывной активной матрицы (цементный камень), в теле которой дискретно расположен пассивный заполнитель;
 - моделируемая система расширяется равномерно по объему без нарушения сплошности контактов.
- При прогнозировании процесса расширения для упрощения расчетов в модели был использован ряд допущений, не искажающих физический смысл рассматриваемого явления: