

**Заключение.** Из выше изложенных сведений вытекает вывод о том, что проницаемость бетона напрямую зависит от следующих факторов:

- типа структуры на макроуровне (контактная либо плавающая);
- концентрации крупного заполнителя;
- качества сцепления зерен заполнителя с цементной матрицей;
- перколяции зон контакта;
- характера сформировавшейся пористости в микроструктуре цементного камня (как в транзитной зоне, так и в остальном объеме).

С целью прогнозирования проницаемости бетонного композита поровое пространство цементного камня, соответствующие расчетные параметры, а также разновидности моделей пор и способы их идеализации подлежат более детальному анализу в дальнейшем.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Powers, T.C. Physical Properties of Cement Paste. Proc. 4. Int. Symposium on the Chemistries of Cement. – Washington. – Vol. II. – 1960. – S. 577.
2. Горчаков, Г.И. Строительные материалы. – М.: Высш. школа, 1981. – 412 с.
3. Домокеев, А.Г. Строительные материалы. – М.: Высш. школа, 1989. – 495 с.

4. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.
5. Красильников, К.Г. Физико-химия собственных деформаций цементного камня / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская – Москва: Стройиздат, 1980. – 255 с.
6. Feldmann, R.F., Sereda, P.J. A Model for Hydrated Portland Cement Paste as deduced from Sorption length Change and mechanical Properties (1968), Materials and Structures 1, 509.
7. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер – М., 1979. – 344 с., ил.
8. Bentz D.P., Lura P., Roberts J.W.. Mixture Proportioning for Internal Curing. Reprinted from the Concrete International, Vol. 27, No. 2, pp. 35-40, February 2005.
9. Михайлов, В.В. Расширяющие и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер – М.: Стройиздат, 1974.– 389 с.
10. Michael A. Caldarone. High-Strength Concrete. A practical guide. - USA, 2009. – 273 p.
11. Павлова, И.П. Параметрические исследования процесса расширения напрягающего бетона с использованием структурной модели расширяющегося композита / И.П. Павлова, В.В. Тур – Вестник БрГТУ. – 2004. – № 1.
12. Lars Meyer, Zum Einfluss der Kontaktzone bei der Modellierung des Elastizitätsmoduls von Beton: Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation/D 82 (Diss. RWTH Aachen), 2007.

Материал поступил в редакцию 28.02.11

#### PROTASEVICH A.A., FILIMONOVA N.V. The analysis of modern representations about structure concrete from positions of his permeability

Are considered micro- and macrostructure of a concrete composite. The various kinds por are described. The characteristic of a zone of contact of grains заполнителя with цементной by a matrix is given. The possible ways of a filtration of a moisture in concrete marked.

УДК 691.544

**Филимонова Н.В., Протасевич А.А.**

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРОНИЦАЕМОСТИ БЕТОНА

**Введение.** Опыт применения современных высокоэффективных бетонов показал: какими бы выдающимися ни были технологические или физико-механические свойства бетона, истинную ценность они приобретают только тогда, когда одновременно обеспечена высокая долговечность материала. В этой связи прогноз долговечности бетона, особенно на стадии проектирования, имеет большое значение.

В большинстве случаев решающей характеристикой долговечности бетона является его проницаемость. Традиционно способность бетона длительно сохранять заданные свойства на требуемом уровне связывают с его плотностью, а точнее, с параметрами пористости и транспортными процессами, способствующими, например, распространению коррозии в структуре бетона или его морозной деструкции.

Долгое время пористость бетона оценивали преимущественно экспериментальными методами. Постепенно процесс исследования и оптимизации свойств бетона сместился к поиску общих или частных аналитических решений. Для этого структура бетона схематизировалась и упрощалась сообразно с требованиями решаемой задачи. Причем моделированию подвергались не только геометрические или физико-механические параметры бетона как композитного материала, но и процессы, сопровождающие его твердение или имеющие место в уже сформировавшейся структуре. А в последнее время моделирование структуры бетона становится одним из наиболее популярных методов исследования, поскольку именно модели позволяют разрабатывать научно обоснованные методы расчета и прогнозирования свойств материала. Поэтому в данной работе, кратко рассмотрев основные показатели пористости реальной структуры бетона, особое внимание уделим современным методам моделирования пористости.

**Особенности проектирования состава бетона с требуемой проницаемостью.** Водонепроницаемость бетона – способность не пропускать воду под давлением - зависит от следующих факторов:

- в/ц (при его снижении уменьшается макропористость);
- вида вяжущего (более высокую непроницаемость имеют бетоны на глиноземистом, расширяющемся, напрягающем, высокопрочном цементе, которые при гидратации присоединяют большее количество воды и образуют более плотный цементный камень);
- содержания добавок: уплотняющих, пластифицирующих, воздухововлекающих;
- температурно-влажностных условий твердения;
- способов уплотнения: вибрирования, центрифугирования, пресования, вакуумирования;
- характера пористости: размера, формы, замкнутости;
- возраста бетона: с течением времени растет количество гидратных новообразований, заполняющих поры.

Водонепроницаемость бетона функционально связана с его фильтрационной способностью. В учебных пособиях проницаемость бетона предлагается оценивать с помощью коэффициента фильтрации [1]:

$$K_{\phi} = \eta \cdot Q \cdot \delta / (S \cdot t \cdot p), \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий вязкость воды при различной температуре;  $Q$  – вес фильтрата, Н;  $\delta$  – толщина образца, см;  $S$  – площадь образца, см<sup>2</sup>;  $t$  – время испытания образца, в течение которого измеряют вес фильтрата, с;  $p$  – избыточное давление, МПа.

Водопроницаемость бетона зависит от одноименных характеристик цементного камня, заполнителя, а также зоны контакта между ними. Основными путями фильтрации воды через бетон могут быть транзитная зона, микротрещины в цементном камне, дефекты в обла-

сти сцепления бетона с арматурой. Бетоны и растворы характеризуются более высокой водопроницаемостью, чем цементный камень, что объясняется их меньшей однородностью, наличием крупных неплотностей, трещин и пор, возникающих в местах контакта заполнителя и цементной матрицы, различием их физических показателей [2].

Бетон впитывает воду через систему капилляров в зоне контактов с заполнителем цементного камня, и именно в ней образуются очаги разрушения при всех видах агрессии. Исследованиями установлено [3], что развитие капилляров в транзитной зоне предопределяется величиной исходного относительного водосодержания  $X$  (отношение В/Ц к показателю нормальной густоты цементного теста). При  $X$  менее 1,3 в цементном тесте не наблюдается отслаивания воды. Первые признаки водоотделения замечены при  $X=1,3$ . С его увеличением водоотделение возрастает. Отделившаяся вода перемещается к поверхности заполнителей и образует при затвердевании бетона седиментационные капилляры и полости. Об изменении проницаемости бетона в зависимости от величины относительного водосодержания можно судить по значениям коэффициента фильтрации  $K_{\phi}$ . В таблице 1 приведены некоторые значения  $K_{\phi}$  виброуплотненного бетона на гранитном щебне в зависимости от величины  $X$ . По значениям коэффициентов фильтрации и пористости цементного камня определены коэффициенты скорости движения воды для бетонов с относительным водосодержанием в пределах 1-1,65. Если принять во внимание значения коэффициентов скорости движения воды, соответствующие маркам бетонов по водонепроницаемости, окажется возможным предсказывать марку бетона по водонепроницаемости  $W$ , назначая при проектировании состава бетона определенную величину относительного водосодержания  $X$  цементного теста в бетоне. При  $X$  выше 1,3 виброуплотненные бетоны в большинстве случаев не удовлетворяют условиям самой низкой марки  $W_2$ , поэтому не могут применяться в конструкциях. Назначая  $X$  в пределах от 1 до 1,3 можно варьировать марки по водонепроницаемости от  $W_8$  до  $W_2$  [3], см. таблицу 1.

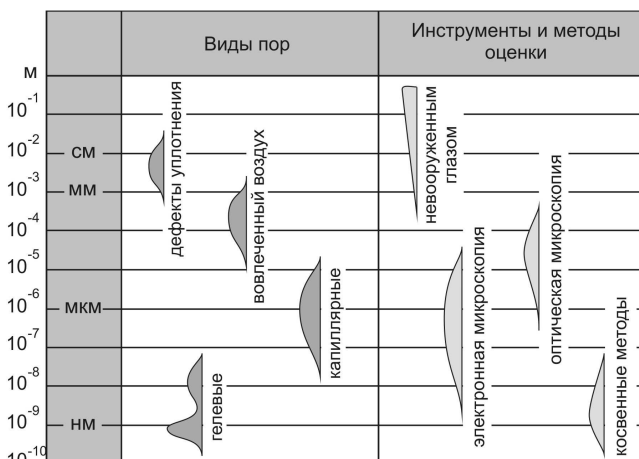
**Таблица 1.** Влияние параметра  $X$  на коэффициент фильтрации бетона и марку по водонепроницаемости, по данным [3]

Относительное водосодержание, $X$	Марка по водонепроницаемости	Коэффициент фильтрации, $K_{\phi}$ , см/с
1	$W_8$	$2 \cdot 10^{-8}$
1,05	$W_6$	–
1,1	$W_4$	–
1,2	$W_2$	–
1,3	$W_2$	$4 \cdot 10^{-7}$
1,65	–	$1 \cdot 10^{-6}$

В настоящее время в Республике Беларусь отсутствует технический нормативно-правовой акт, регламентирующий проектирование состава бетона на основании заданной водонепроницаемости  $W$ , что становится более значимым с учетом стремления к гармонизации национальных стандартов с европейскими. Расчет расхода компонентов смеси осуществляется при наличии условной зависимости  $W$  от водоцементного отношения, установленной эмпирическим путем, поэтому являющейся переменной, быстро стареющей величиной, не адаптированной к разнообразным условиям производства, что не дает надежных гарантий и не позволяет осуществить прогноз, достичь четко обозначенного уровня предполагаемой проницаемости. Необходимость создания соответствующего метода подбора состава очевидна, особенно в условиях активного роста объемов отечественного строительства и темпов возведения различного рода сооружений на территории РБ: ледовых дворцов, бассейнов, подземных паркингов, резервуаров, гидроэлектростанций; а также усиления действующих метрополитенов и мостовых конструкций; внедрения технологий бетонов нового поколения. Поскольку методы, основанные на эмпирическом подходе, представляют собой длительную, трудоёмкую процедуру, которая в добавок не раскрывает сути физико-химических явлений, то наиболее продуктивным в процессе движения к поставленной задаче видится поиск теоретических решений, т.е. создание математической модели пористости и прогнозирование на её основе параметров долговечности с целью обеспечения возможности управления свойствами и оптимизации состава композиций.

**Виды и параметры пор в структуре бетона.** Пористость сформированной структуры бетона предопределяет его основные физико-механические и эксплуатационные свойства: прочность, деформативность, проницаемость, морозостойкость и пр. Пores в бетоне весьма разнообразны, и подразделяются на несколько видов по размеру, конфигурации и происхождению [4].

Один из примеров общей классификации пор цементного камня и бетона представлен на рис. 1 [5]. Здесь приведены в соответствие основные классификационные признаки – размер и происхождение пор, а также соответствующие методы экспериментальных исследований пористости.



**Рис. 1.** Виды пор по размерам и происхождению, соответствующие методы оценки пористости [5]

Для оценки пористости цементного камня и бетона используют ряд параметров:

- **общая (истинная) пористость** – равна отношению объема всех пор в образце к объему образца;
- **открытая (или кажущаяся) пористость** – равна объему пор, заполняемых водой при насыщении (определяется как отношение суммарного объема пор и капилляров, сообщающихся с поверхностью образца и между собой, к объему всего образца);
- кривые распределения пор: интегральные, дифференциальные;
- удельная поверхность порового пространства;
- средний радиус капилляров  $\bar{\lambda}$ ;
- **показатель однородности**  $\alpha$  (если  $\alpha=1$ , все капилляры характеризуются одним радиусом).

Показатели пористости в основном являются результатом идеализированного представления о поровом пространстве бетона. Так, под радиусом поры может подразумеваться радиус сферы как наиболее близкой имитации замкнутых пор, или радиус цилиндра, близкого по форме к капиллярам, или расстояния между стенками щелевидных пор, образуемых слоистыми кристаллами или микротрещинами. Идеализация значительно упрощает алгоритмы расчета и прогнозирования свойств бетона, связанных с пористостью.

Вместе с тем для моделируемых объектов изучение одних сторон осуществляется ценой отказа от рассмотрения других его особенностей. Поэтому любая модель замещает оригинал лишь в строго ограниченном смысле. Этим обусловлено многообразие существующих моделей и подходов к изучению свойств материалов. Например, для расчета жесткостных характеристик пористых материалов достаточно иметь информацию об интегральном объеме пор. Для оценки же проницаемости и моделирования транспортных процессов большое значение имеют не столько интегральные характеристики, сколько параметры формы и размеров пор.

**Общие представления о пористых телах.** Материалы причисляют к пористым по геометрическим и физическим свойствам структуры, а именно по способности поглощать и удерживать в макроскопических количествах различные вещества. Представление о пористой среде теряет смысл, когда размер пустот сопоставим с размером молекул. Пористые материалы в большинстве случаев облада-

ют сложной нерегулярной стохастической структурой. Зачастую разбиение пространства пор на элементарные поры производится весьма произвольно. Отдельные поры, составляющие в совокупности пространство пор, отличаются по форме, размерам, ориентации, шероховатости и кривизне поверхности. Так же можно судить и о частицах, образующих скелет тел корпункулярного строения. Основной характеристикой поры служит размер. В зависимости от конфигурации пор им могут быть такие величины:

- радиус цилиндрического капилляра;
- наибольший радиус вписанного шара в полость поры сложной формы;
- размер «горла» - места соединения соседних пор, т.е. наибольший радиус шара, который можно переместить из полости данной поры в полость близлежащей поры;
- характерное расстояние между частицами, образующими скелет тела, в случае невозможности выделения отдельной поры определенной геометрической конфигурации.

Необозримое многообразие пористых структур обуславливает сложность классификации пористых тел и самих пор. Совершены лишь попытки систематизации материалов по их строению и физико-химическим свойствам. Киселевым А.В. предложено разделение пористых тел следующим образом [6]:

- тела корпункулярного строения, в которых поры образованы промежутками между компактными частицами, составляющими скелет материала (размер и форма пор определяются размером и формой частиц каркаса, а также их взаимным расположением);
- тела губчатого строения, сплошь пронизанные капиллярами и полостями;
- тела смешанного строения, относящиеся к бидисперсным системам, поры в которых можно разбить на две группы, резко отличающиеся по размеру;
- тела пластинчатой (слоистой) структуры, состоящие из пластинок, ширина которых много больше толщины, и имеющие поры щелевидной и клиновидной формы;
- тела волокнистого строения, состоящие из волокон, нитей, полых трубок либо иглообразных частиц.

Можно предположить, что бетон является представителем пористых тел смешанного строения. Его параметры пористости закладываются еще на стадии проектирования назначением определенного водоцементного отношения или введением добавок. Фактически пористость бетона формируется к моменту схватывания и далее, в процессе твердения, претерпевает определенные изменения [4].

**Способы идеализации внутренней структуры пористых материалов.** С целью исследования капиллярных явлений и различных многокомпонентных процессов массопереноса в цементной системе необходимо обратиться к изучению существующих моделей пористых сред.

Многофазными процессами, протекающими внутри цементного камня строительных конструкций при их эксплуатации, управляют капиллярные и поверхностные силы, которые регулируют взаимное распределение фаз в пространстве пор и определяют условия транспортного переноса. Кроме того, механизм миграции влаги внутри бетона обусловлен геометрическими особенностями пористой структуры. Бетонный композит является образцом материала, обладающего нерегулярной структурой, что проявляется в случайном характере распределении пор, фаз, локальных полей концентраций, давлений, скоростей. Что касается описания исследуемых явлений, то обычно прибегают к рассмотрению отдельной поры либо капиллярной системы простейшей формы. Для перехода от подобных упрощений к развитой пористой среде требуются соответствующие структурные модели пористых материалов. В связи с этим имеет смысл систематизировать представления о существующих и наиболее подходящих из них.

По методам описания поровой среды различают следующие модели:

- регулярные, представляющие пористую структуру в виде набора одинаковых элементов (пор либо частичек), которые определенным образом расположены в пространстве;
- стохастические, представляющие пористую структуру в виде статистического ансамбля взаимосвязанных структурных эле-

ментов, свойства и взаимное расположение которых случайны и подчиняются некоторым вероятностным законам.

По предмету описания модели структуры пористых тел делятся на два класса:

- капиллярные модели, заменяющие сложное пространство пор совокупностью характерных элементов – каналов с определенными геометрическими свойствами;
- корпункулярные модели, представляющие структуру скелет материала в виде некоторой укладки твердых частиц простейшей формы, например, шаров (глобул).

Поскольку конечной целью исследований является оценка проницаемости бетона путем моделирования транспортных процессов, протекающих непосредственно в поровом пространстве, более наглядным и предпочтительным в данном случае будет использование моделей именно первого класса. Поэтому капиллярные модели структуры пространства пор попадают в область наших интересов и подлежат более детальному рассмотрению далее.

Обобщая сведения, представленные в [6], капиллярные модели можно классифицировать таким образом:

1. **Одномерные.**

1.1 Простейшие:

- модель системы прямых капилляров (рис. 2а); основными параметрами модели являются число капилляров в единице объема  $n$  и их эквивалентный радиус  $r_3$ ;
- модель системы извилистых капилляров (рис. 2б), дополнительно вводимый параметр – извилистость, представляющая собой отношение длины капилляра к его проекции в рассматриваемом направлении;
- модель капилляра с отходящими тупиковыми порами для учета застойных зон (рис. 2в);
- модель системы параллельных капилляров с идеальной связью для описания массопереноса в каналах с учетом их связи между собой в каждом сечении развитой системой микропор (рис. 2г);

1.2 Серийные, учитывающие переменность сечения пор:

- модель Адзуми (рис. 2д), в которой радиус порового канала меняется скачкообразно;
- модель Фостера-Батта (рис. 2е), построенная из двух (центрально-сужающегося и центрально-расширяющегося) каналов с обменом между ними;
- модель из пересекающихся сферических полостей, представляющих собой элементарные поры (рис. 2ж); эквивалентный радиус при этом определяется как  $r_3 = 3\Pi/S$  (где  $\Pi$  – общая пористость,  $S$  – удельная площадь поверхности стенок пор);

1.3 Модели гофрированных капилляров в виде набора каналов с чередующимися сужениями и расширениями, причем радиус меняется непрерывно:

- модель периодического гофрированного капилляра (рис. 2з), в которой изменение радиуса вдоль оси канала можно рассматривать как реализацию некоторого случайного процесса;
- модель пор с диффузионной гофрировкой (рис. 2и), предусматривающая плавность изменения радиуса капилляра.

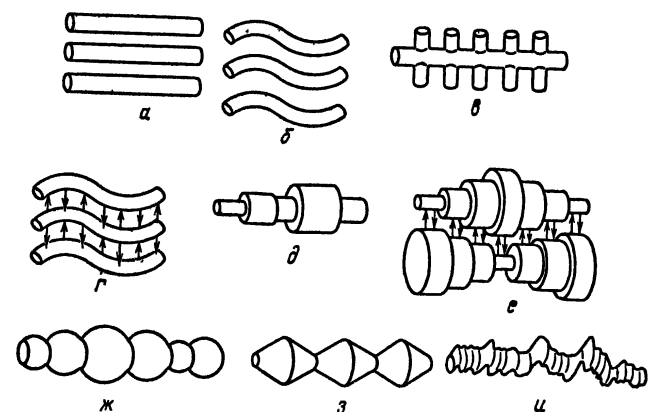


Рис. 2. Одномерные капиллярные модели, согласно [6]

2. **Двумерные (плоские) и пространственные.** В основном это решеточные модели, состоящие из узлов и соединяющих их связей. Узел соответствует пересечению пор, а связь – элементарной поре, которая считается цилиндрическим капилляром постоянного радиуса. Координационное число  $z$  – число связей, сходящихся в узле. Если все узлы характеризуются одним числом  $z$ , то оно называется координационным числом всей решетки.

2.1 **Регулярные решетки, которым свойственна симметрия - периодическая повторяемость определенных сочетаний узлов и связей;** принимаемые допущения: весь объем пространства пор сосредоточен в связях решетки, объемом узлов можно пренебречь, радиус цилиндрических пор – величина случайная, длина поры обратно пропорциональна радиусу, вследствие чего поры должны быть извилистыми, чтобы соединять равно отдаленные узлы решетки; к регулярным решеткам относятся:

- квадратная  $z = 4$  (рис. 3а);
- сотовая  $z = 3$  (рис. 3б);
- тройная гексагональная  $z = 6$  (рис. 3в);
- квадратная, в узлах которой расположены частицы различной формы (рис. 3г);
- бидисперсная модель Вакао-Смита, в узлах которой расположены квадратики, моделирующие микропористые частицы скелета (рис. 3д);
- бидисперсная модель, состоящая из двух взаимно пересекающихся квадратных решеток микро- и макропор (рис. 3е);
- кубическая, узлы которой имеют нулевой объем, радиус капилляров является случайно распределенной величиной (рис. 4а);

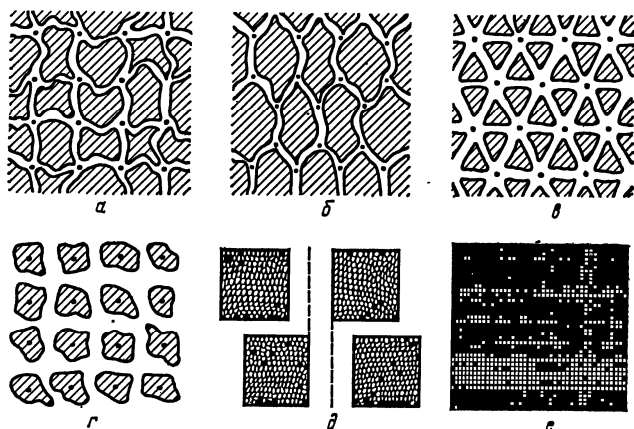


Рис. 3. Двумерные решеточные модели [6]

2.2 **Случайные решетки:**

- случайная с  $z=6$  и равномерной ориентацией пор, под которой подразумевается распределение в пространстве единичных векторов, коллинеарных оси капилляра, чье направление не зависит от направления осей соседних капилляров; из каждого узла выходит 6 капилляров, а объем узлов решетки равен нулю; модель учитывает случайную ориентацию пересекающихся капилля-

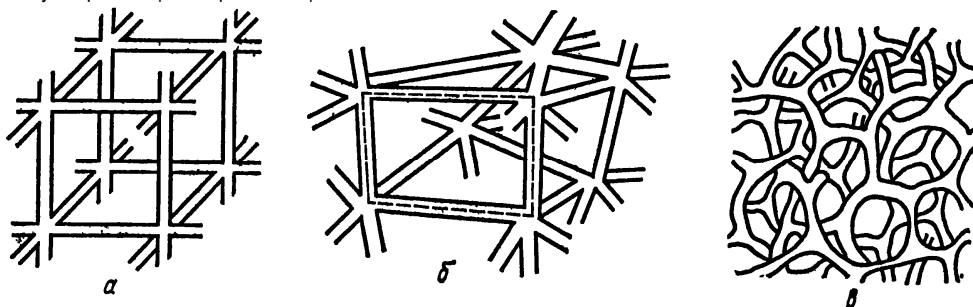


Рис. 4. Пространственные решеточные модели [6]

ров, движение рассматривается как последовательность статистически независимых перемещений из узла в узел, каждое из которых соответствует прохождению одного капилляра; кроме того введено распределение капилляров по длинам и радиусам, все эти характеристики считаются независимыми случайными величинами; в данной модели можно увидеть цикл – последовательность связей, которая, начинаясь в одном узле, в нем же и заканчивается (рис. 4б);

- ветвящаяся (псевдорешетка или деревья Кейлея), не содержащая циклических конфигураций, т.е. сросшихся ветвей, при этом любые два узла можно соединить лишь одной последовательностью связей (рис. 4в). В модели рассматриваются пересекающиеся случайно ориентированные в пространстве цилиндрические каналы с переменным радиусом, образующие псевдорешетку. На малом участке длины поры могут происходить элементарные события: смена радиуса поры (рис. 5а), ветвление на 2 или 3 поры (рис. 5б,в), переход поры в тупик (рис. 5г);
- рандомизированные решетки, полученные путем исключения случайным образом части элементов из решеток с регулярной топологией, которые являются базисными. Долю исключенных элементов называют параметром рандомизации, варьируя который можно получить целый спектр новых решеток с различными свойствами. Координационное число – случайная величина. В реальных пористых материалах часть пор недоступна с внешней поверхности и дает вклад в закрытую пористость. В отличие от регулярных решеток характерной особенностью рандомизированных является существование наряду со связанной системой элементов решеткой различных несвязанных между собой комплексов (кластеров) из конечного числа элементов. При подмене реальной пористой среды рандомизированной решеткой связанная система элементов моделирует связанную систему пор в материале, выходящую на внешнюю поверхность, а изолированные кластеры – закрытые поры, не доступные снаружи. Если базисная решетка соответствует материалу пористостью  $P_б$ , то рандомизированная решетка с параметром рандомизации  $qr$  соответствует материалу с пористостью  $P = (1-qr) \cdot P_б$ .

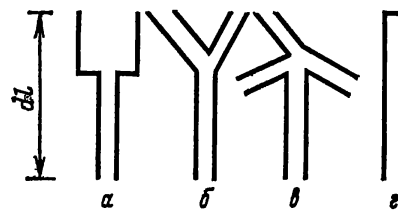


Рис. 5. Элементарные события в ветвящейся модели на малом участке поры  $dl$  [6]

Таким образом, при использовании одномерных моделей поровой среды в результате замены пространства пор системой непересекаю-

щихся каналов возможно учесть извилистость, гофрировку, различные размер и форму, случайный характер их изменения, наличие застойных зон. При этом не учтена пересеченность пространства пор. В связи с этим решетчатые модели наиболее полно отражают реальную пространственную структуру пористых материалов и взаимосвязь составляющих ее элементов. Ветвящаяся модель учитывает многие характерные геометрические свойства пористого пространства реальных материалов, что позволяет произвести достаточно строгий анализ разнообразных физико-химических явлений. Деревья Кэйлея вобрала в себя преимущества серийных моделей и моделей случайных капиллярных решеток. Очевидно, такие модели наилучшим образом соответствуют поровой структуре бетона. Для моделирования транспортных процессов в структуре бетона необходимо также разобраться с масштабом пор, то есть привести модель в соответствие с размерами, критериями перколяции и прочими параметрами пористости реальной структуры. По сути, необходимо не просто определить с типом модели пористости, но и выстроить ее в соответствии с реальным объектом. Эту задачу сегодня успешно решают методами компьютерной симуляции процессов структурообразования бетона.

Следует отметить, что, продвигаясь в этом направлении, моделирование как метод исследования эволюционирует в сторону усложнения моделей. Современные модели все менее тяготеют к упрощению форм ради простоты вычислений. Этому способствует не только развитие компьютерных технологий, но и специфика решаемых задач. Например, пористость бетона в идеале нельзя считать окончательно сформировавшейся. Параметры пористости бетона со временем изменяются, и особенно интенсивно в процессе твердения и набора прочности. Описанные выше модели полезны для качественной оценки, определения конфигурации пор, для установления общих геометрических параметров порового пространства. Что касается решения вопросов проницаемости и долговечности бетона с учетом временного фактора, для этого в последнее время развиваются новые методы моделирования, позволяющие оценивать свойства бетона во времени.

**Методы компьютерного моделирования пористости цементного камня и бетона.** Анализируя существующие методы оценки и моделирования порового пространства цементного камня можно выделить несколько подходов:

1. Компьютерная обработка цифровых изображений реальной структуры с получением дифференциальных характеристик пористости (кривые распределения пор по размерам или площади поверхности).
2. Симуляция структуры цементного камня с получением изображения виртуальной структуры – модели цементного камня, и последующей компьютерной обработкой аналогичной п.1.
3. Моделирование структуры цементного камня без визуализации; все параметры структуры, в том числе и пористость, описываются аналитическими зависимостями.

Прототипом современных методов первой группы можно считать достаточно простую методику оценки состава бетона с помощью образца-шлифа и линейки. Расчертив шлиф прямыми параллельными линиями с некоторым шагом и измеряя суммарную длину отрезков линии, находящихся в сечении зерен заполнителя, можно определить концентрацию песка или щебня в составе бетона. Оптический микроскоп, оснащенный специальным измерительным столиком, позволяющим двигать образец в двух направлениях, дает возможность аналогичным способом выполнять измерения на более высоком масштабном уровне и получать параметры пористости бетона. Несколько модернизированный, этот метод применяется и сегодня. Например, для оценки параметров морозостойкости бетона [16] или первоначального состава затвердевшего бетона. Измерения не затронули принципиальную основу метода, преобразилось лишь техническое оснащение, позволяющее получать более качественные снимки с высоким разрешением, а наличие необходимого программного обеспечения позволило полностью компьютеризировать вычисления. Вместе с тем, расширенные возможности современного

аналитического оборудования явно способствовали прогрессу и в области теоретического моделирования цементных систем.

Так, *E. Garboczi, D. Bentz и др.* активно использовали в своих работах [7-10] сканирующую электронную микроскопию, оценивая таким образом не только геометрические параметры структуры, но и химико-минералогические характеристики. Более того, опираясь на информацию, получаемую при обработке изображений структуры цементного камня, *D. Bentz и др.* разработали модель-симулятор развивающейся цементной системы, решив при этом одну из главных проблем в исследовании цементных систем – проблему наблюдения за процессом структурообразования не по косвенным признакам (тепловыделению, изменению подвижности и пр.) а непосредственно. *D. Bentz и др.* визуализировали процесс гидратации цемента. Работать с моделями-симуляторами оказалось гораздо удобнее, поскольку оценка структуры по единичным снимкам дает весьма статичную, точечную информацию. Изображения реальной структуры при наличии модели необходимы только для ее верификации.

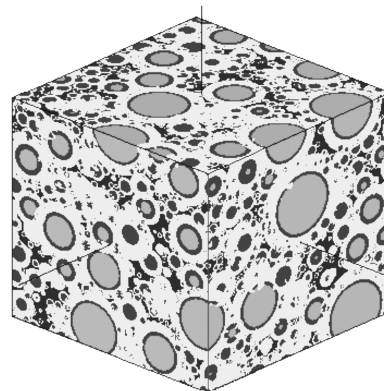
С применением модели симулятора *D. Bentz и др.* исследовали эффект стены в решении задачи проницаемости бетона. Авторам удалось разработать алгоритм для оценки толщины, количества транзитных зон (объемной концентрации), их распределения в структуре бетона, вероятности перколяции и в конечном итоге – для оценки проницаемости бетона.

Следует отметить, что в своих работах *D. Bentz и др.* оперируют в основном объемными характеристиками фазового состава. То есть выводы о сроках схватывания, прочности, проницаемости авторы делают, анализируя степень гидратации, объемное содержание в системе минералов, гидратных фаз, несвязанной воды и воздуха. Опираясь критериями теории перколяции, авторы не задаются вопросами о форме и распределении пор по размерам.

Более детальную оценку пористости дают алгоритмы обработки цифровых изображений реальных или модельных структур, основанные на заполнении видимой области пор эллипсами или дисками максимально возможного размера. Авторы работы [11], отдадут предпочтение дискам и отмечают, что покрытие эллипсами, имитирующими сечение капилляра (условно-цилиндрической поры), расположенного под наклоном к плоскости изображения, может быть весьма неоднозначным, так как произвольный выбор размеров и ориентации эллипсов не всегда отвечает действительности. Кроме того процедура изометрического покрытия поровых сегментов [11] имеет меньшую вычислительную сложность.

В работе *Guang Ye, K. van Breugel и др.* [12] с использованием алгоритма покрытия поровых сегментов дисками выполнено дифференцирование пор не только по размерам, но и по форме. Рассматривая капиллярную пористость, авторы выделяют поры: сквозные, тупиковые и изолированные, рис. 7. Особенностью предлагаемой *Guang Ye и др.* модели является то, что для отладки алгоритма авторы не использовали изображения реальной структуры, а смоделировали виртуальную структуру цементного камня, рис. 6.

а) структура цементного камня



б) структура пористости

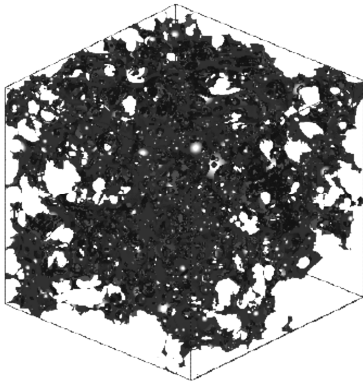
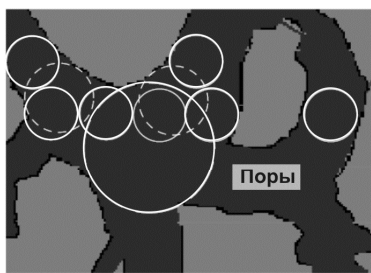


Рис. 6. Моделирование структуры цементного камня и его пористости согласно *Guang Ye, K. van Breugel и др.* [12];  $V/C = 0.4$ , степень гидратации 65%, размер фрагмента структуры  $100 \times 100 \times 100 \text{ мкм}^3$

Компьютерные модели-симуляторы [7–12, 17] "выстраивают" структуру с учетом гранулометрического и минералогического состава цемента, имитируя различные химические реакции, сопровождающие формирование структуры цементного камня. Обобщенным параметром, позволяющим соотносить модель с моделируемым объектом, оценивать адекватность модели, могут служить кривые тепловыделения. Они служат наглядной интегральной характеристикой кинетики и интенсивности процессов гидратации. Для верификации моделей пористости используют экспериментально получаемые дифференциальные кривые пористости. При этом редкий эксперимент позволяет получить столь же полную и наглядную информацию о структуре бетона, как это возможно с использованием моделей.

Вместе с тем, не менее ценны модели, лишенные наглядности, но построенные с упором на точность математической интерпретации физической сути процессов, в результате которых структура формируется или деградирует и разрушается. В этом направлении преуспели японские исследователи *T. Ishida, K. Maekawa и др.* [13–15]. Их модель представляет собой сложный многоуровневый алгоритм, предназначенный для прогнозирования долговечности железобетонных конструкций в условиях различных агрессивных и механических воздействий.



Построение дифференциальных кривых распределения пор по размерам методом покрытия порового пространства дисками

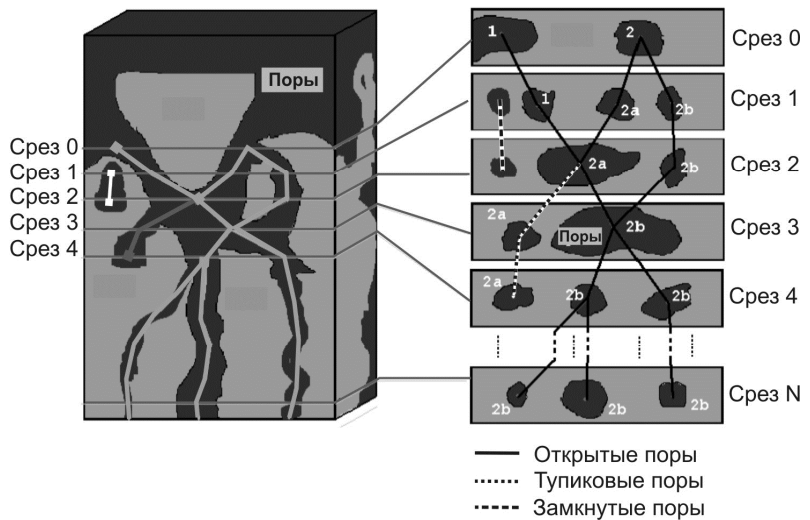


Рис. 7. Оценка дифференциальных характеристик пористости и формы пор в модели цементного камня *Guang Ye, K. van Breugel и др.* [12]

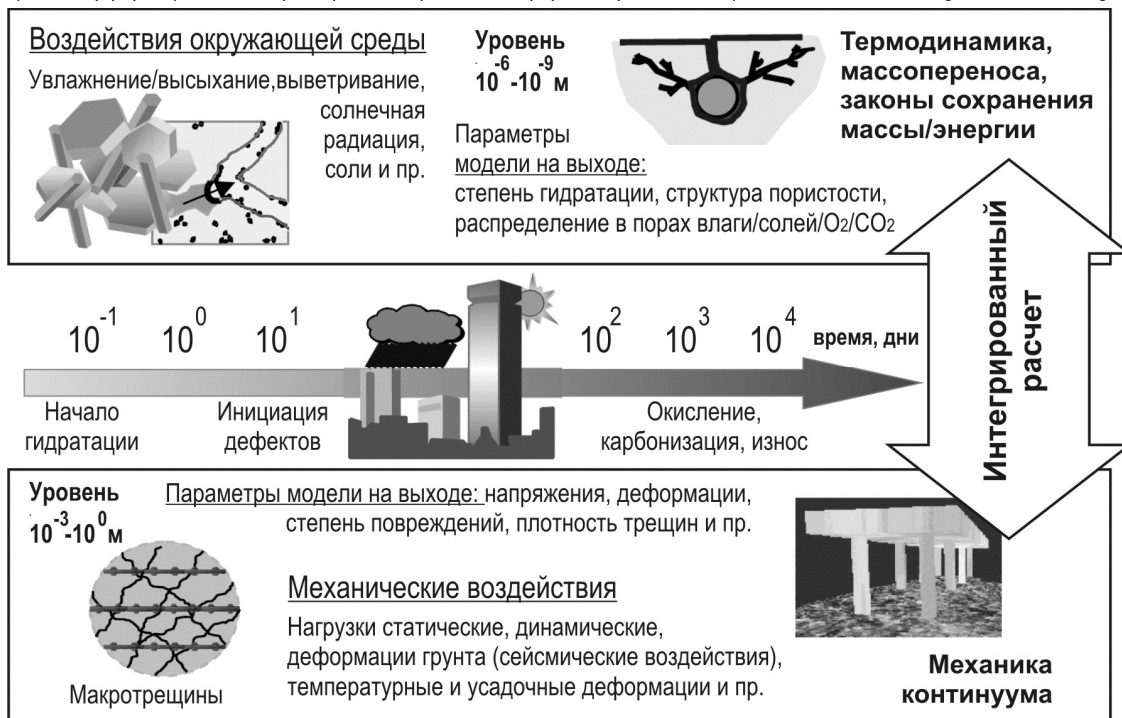


Рис. 8. Моделирование долговечности железобетонных конструкций согласно *K. Maekawa, T. Ishida и др.* [14]

Модель охватывает широкий спектр явлений структурообразования и деструктивных процессов, начиная с внутримолекулярных взаимодействий на уровне частиц размером  $10^9 \dots 10^6$  м, и заканчивая поведением конструкций, рис.8. При этом модель лишена детальной визуализации моделируемого объекта и протекающих в нем процессов. Авторы, принимая некоторые допущения относительно геометрического строения структуры цементного камня, описывают ее основные параметры математически на основании законов термодинамики, механики и пр. И далее, на основе общих представлений о процессах массопереноса в цементном камне и бетоне, моделируют коррозионные и механические повреждения конструкций.

**Заключение.** При всем разнообразии существующих методов моделирования пористых материалов, задача проницаемости бетона – частный случай, имеющий большое практическое значение, на территории постсоветского пространства решается преимущественно экспериментально. Причем информация рекомендательного характера, касающаяся проектирования составов бетона с требуемой водонепроницаемостью, представлена в весьма скудном объеме. Обобщая опыт зарубежных коллег, следует отметить, теоретическое моделирование позволяет существенно продвинуться в решении многих прикладных практических задач. Более того, определенные шаги в этом направлении делаются и отечественными учеными. Так, авторами работ [11,17] разработана и достаточно успешно функционирует модель-симулятор цементной системы с визуализацией структуры и возможностью получать полную информацию о параметрах фазового состава цементного камня в любой момент гидратации. Есть опыт аналитического моделирования структурообразования цементного камня с возможностью прогнозировать собственные деформации структуры [18]. Нет сомнений в том, что эти работы послужат серьезной базой для решения задачи проницаемости и в целом долговечности бетона. Необходимо уточнить, усовершенствовать их с акцентом на поровом пространстве. При этом наряду с общими подходами к моделированию пор важно также рассмотреть механизмы транспортных процессов в структуре бетона. Анализ классических представлений о формах движения газозвдушных и жидких сред в пористых материалах и, собственно, моделированию транспортных процессов в структуре бетона мы намерены посвятить наши следующие работы.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Строительные материалы и изделия: учеб. пособие / В.Н. Чубуков [и др.] – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2003. – 328 с.
2. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.
3. Шалимо, М.А. Лабораторный практикум по технологии бетонных и железобетонных изделий – Мн.: Вышэйшая школа, 1987. – 196 с.

4. Протасевич, А.А. Анализ современных представлений о структуре бетона с позиций его проницаемости / А.А. Протасевич, Н.В. Филимонова // Вестник БрГТУ. Архитектура и строительство. - 2011г. - № 1.
5. Zement: Taschenbuch/ Verein Deutscher Zementwerke e.V. – 49. Ausgabe // Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2000.
6. Хейфец, Л.И. Многофазные процессы в пористых средах / Л.И. Хейфец, А.В. Неймарк - М.: Химия, 1982. -320 с.
7. E.J. Garboczi, D.P. Bentz, and N.S. Martys. Digital images and computer modelling (in Experimental Methods for Porous Media). - Academic Press, New York. - 1999.
8. Bentz, D.P., Haecker, C.J., Feng, X.P. and Stutzman, P.E. Prediction of Cement Physical Properties by Virtual Testing, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International VDZ Congress, September 23-27, 2002, Düsseldorf, Germany, pp 53-63 (2003).
9. E.J. Garboczi and D.P. Bentz. Computer Simulation of the Diffusivity of Cement-Based Materials. - Journal of Materials Science. - 1992.
10. D.P. Bentz, Capillary Porosity Depercolation/Repercolation in Hydrating Cement Pastes via Low Temperature Calorimetry Measurements and CEMHYD3D Modeling (to be submitted to the Journal of the American Ceramic Society) Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg.
11. Разумейчик, В.С. Анализ пористости композиционных материалов на основе процедуры изометрического покрытия поровых сегментов цифрового изображения / В.С. Разумейчик, А.С. Дереченник, С.С. Дереченник // Вестник БрГТУ. – 2006. – № 5. – С. 8–14.
12. Guang Ye, K. van Breugel, Jing Hu. Numerically Simulated Pore Structure and its Potential Application in High Performance Concrete. - Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, the Netherlands
13. Koichi Maekawa, Tetsuya Ishida and Toshiharu Kishi. Multi-scale Modeling of Concrete Performance. - Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 2, 91-126, July 2003. Japan Concrete Institute.
14. Koichi Maekawa and Tetsuya Ishida. Service-life Evaluation of Reinforced Concrete under Coupled Forces and Environmental Actions. University of Tokyo, Japan
15. Koichi Maekawa and Tetsuya Ishida. An Integrated Computational System for Mass/Energy Generation, Transport, and Mechanics of Materials and Structures. - Translation from Proceedings of JSCE, No.627/V-44. - August 1999.
16. Rusin Z. Technologia betonów mrozoodpornych / Krakow: PolskiCement z o.o. – 2002. – 182 s.
17. Разумейчик, В.С. Структурно-химическое моделирование гидратации цементного композита // Вестник БрГТУ. Архитектура и строительство. – 2006 г. – № 1.
18. Тур, В.В. Обобщенная модель собственных деформаций расширяющейся цементной системы / В.В. Тур, Н.В. Филимонова // Строительная наука и техника. – №1. – Мн., 2006.

Материал поступил в редакцию 28.02.11

#### FILIMONOVA N.V., PROTASEVICH A.A. The theoretical preconditions to forecasting permeability of concrete

The basic parameters porosity of concrete are considered. The ways of idealization of structure of porous materials are described. The modern methods of modeling porosity of environment cementstone are submitted.

УДК 624.01

**Матчан В.А., Давыдюк А.И.**

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕЗБАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ

**Введение.** В настоящее время в строительстве, как и во многих других областях техники, актуальной остается задача создания совершенных конструкций, обладающих высокой экономической эффективностью с одной стороны, и высокой надежностью и длительным сроком

службы с другой стороны, и высокой надежностью и длительным сроком

**Матчан Виктор Александрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектурного проектирования Брестского государственного технического университета.

**Давыдюк А.И.**, магистрант технических наук Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура