

Поровая структура дорожного бетона

Канд. техн. наук М. К. Пшембаев¹⁾, магистрант В. В. Гиринский¹⁾,
докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾, докт. хим. наук, проф. В. Н. Яглов¹⁾,
канд. техн. наук С. С. Будниченко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Из многочисленных классификаций структур бетона выделяются три основных типа: микроструктура – структура цементного камня; мезоструктура – структура цементно-песчаного раствора в бетоне; макроструктура – двухкомпонентная система, состоящая из раствора и крупного заполнителя. Для каждой из перечисленных структур характерны свои особенности, связанные с условиями их образования. Так, микроструктура цементного камня может быть охарактеризована такими структурными составляющими, как кристаллический сросток, тоберморитовый гель, не до конца гидратированные зерна цемента и поровое пространство. Наиболее важные технологические факторы, влияющие на формирование микроструктуры цементного камня, – химико-минералогический состав цемента, тонкость его помола, водоцементное отношение и условия твердения. В зависимости от соотношения этих факторов формируется конкретная микроструктура цементного камня. Цементный камень – капиллярно-пористое тело, состоящее из различных твердых фаз, представленных преимущественно субмикроструктурами коллоидной степени дисперсности, способными адсорбционно, осмотически и структурно удерживать (связывать) некоторое количество влаги. Защита дорожного бетона как капиллярно-пористого тела – одна из актуальных задач. Она решается методами первичной и вторичной защиты. Методы первичной защиты используются на стадии проектирования, приготовления и укладки бетона. Методы вторичной защиты – на стадии эксплуатации бетонного дорожного покрытия. В статье рассмотрены структуры твердой фазы бетона и характеристики его порового пространства. Приведены причины возникновения пор, а также их форма, размеры и расположение в объеме бетона. Наибольшую опасность для дорожного бетона представляют проникновение в него агрессивной жидкости и влагоперенос в затвердевшем бетоне. Водопроницаемость бетона характеризует его коэффициент фильтрации, который зависит от времени и условий твердения, а также от условий эксплуатации.

Ключевые слова: структура бетона, цементный камень, поровое пространство, влагоперенос, проницаемость

Для цитирования: Поровая структура дорожного бетона / М. К. Пшембаев [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 298–307

Porous Structure of Road Concrete

M. K. Pshembaev¹⁾, V. V. Girinsky¹⁾, Ya. N. Kovalev¹⁾, V. N. Yaglov¹⁾, S. S. Budnichenko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Having a great number of concrete structure classifications it is recommended to specify the following three principal types: microstructure – cement stone structure; mesostructure – structure of cement-sand mortar in concrete; macrostructure – two-component system that consists of mortar and coarse aggregate. Every mentioned-above structure has its own specific features which are related to the conditions of their formation. Thus, microstructure of cement stone can be characterized by such structural components as crystal intergrowth, tobermorite gel, incompletely hydrated cement grains and porous space.

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

The most important technological factors that influence on formation of cement stone microstructure are chemical and mineralogical cement composition, its grinding fineness, water-cement ratio and curing condition. Specific cement stone microstructure is formed due to interrelation of these factors. Cement stone is a capillary-porous body that consists of various solid phases represented predominantly by sub-microcrystals of colloidal dispersion. The sub-microcrystals are able adsorptively, osmotically and structurally to withhold (to bind) some amount of moisture. Protection of road concrete as a capillary-porous body is considered as one of the topical issues. The problem is solved with the help of primary and secondary protection methods. Methods of primary protection are used at the stage of designing, preparation and placing of concrete. Methods of secondary protection are applied at the operational stage of road concrete pavement. The paper considers structures of concrete solid phase and characteristics of its porous space. Causes of pore initiation, their shapes, dimensions and arrangement in the concrete are presented in the paper. The highest hazard for road concrete lies in penetration of aggressive liquid in it and moisture transfer in the cured concrete. Water permeability of concrete characterizes its filtration factor which depends on curing time and conditions and operational conditions as well.

Keywords: concrete structure, cement stone, porous space, moisture transfer, permeability

For citation: Pshembaev M. K., Girinsky V. V., Kovalev Ya. N., Yaglov V. N., Budnichenko S. S. (2016) Porous Structure of Road Concrete. *Science & Technique*. 15 (4), 298–307 (in Russian)

Введение

Области применения тяжелого бетона в настоящее время непрерывно расширяются. Наиболее объемная – отрасль дорожного строительства. Автомобильные дороги и мосты эксплуатируются в условиях интенсивного механического воздействия, ультрафиолетового излучения, воды, знакопеременных температур с замораживанием и высушиванием, химической агрессии и др. Сохранение стабильных эксплуатационных свойств на весь установленный период жизни дорожного бетона является чрезвычайно актуальным. Защиту от коррозии автомобильных дорог и мостов осуществляют способами первичной и вторичной защиты. К способам первичной защиты относятся:

- проектирование эффективных составов бетонов;
- применение химических добавок, повышающих качество бетона в процессе его получения и укладки;
- снижение проницаемости бетона технологическими методами;
- устранение усадочных трещин.

Вторичная защита – это мероприятия по защите поверхности бетонных изделий от воздействия агрессивной среды путем нанесения пропиточных составов, а также ряд других мероприятий [1]. Для использования различных методов защиты бетона необходимо рассматривать его структуру и поведение как капиллярно-пористого тела.

Общая характеристика твердой фазы бетона

Из многочисленных классификаций структур бетона выделяют три основных типа [2–5]: микроструктура – структура цементного камня;

мезоструктура – структура цементно-песчаного раствора в бетоне; макроструктура – двухкомпонентная система, состоящая из раствора и крупного заполнителя. Для каждой из перечисленных структур характерны свои особенности, связанные с условиями их образования. Так, микроструктура цементного камня может быть охарактеризована такими структурными составляющими, как кристаллический сросток, тоберморитовый гель, не до конца гидратированные зерна цемента и поровое пространство. Наиболее важные технологические факторы, влияющие на формирование микроструктуры цементного камня, – химико-минералогический состав цемента, тонкость его помола, водоцементное отношение и условия твердения. В зависимости от соотношения этих факторов формируется конкретная микроструктура цементного камня [2]. Цементный камень – капиллярно-пористое тело, состоящее из различных твердых фаз, представленных преимущественно субмикроструктурами коллоидной степени дисперсности, способными адсорбционно, осмотически и структурно удерживать (связывать) некоторое количество влаги.

В [6, 7] все продукты гидратации обычно называются цементным гелем. Однако такое представление о строении продуктов гидратации цемента весьма условное и не позволяет раскрыть природу аномальных свойств цементного камня, например усадки и ползучести. Сами авторы термина «цементный гель» признают его условность и неопределенность из-за физической и химической неоднородности продуктов гидратации цемента.

Для мезоструктуры цементно-песчаного раствора, кроме перечисленных факторов, опре-

деляющих микроструктуру цементного камня, важными управляемыми факторами являются состав раствора, гранулометрический и минералогический составы песка, форма его зерен, характер поверхности частиц и их загрязненность. Мезоструктуру цементно-песчаного раствора можно рассматривать как конгломератную структуру, в которой матрица – это цементный камень. Такая модель является наиболее общей для подобных двухкомпонентных систем, однако теория этих структур разработана еще недостаточно полно. Макроструктура бетона имеет много общего с мезоструктурой, поскольку в данном случае в качестве матрицы может быть рассмотрен цементно-песчаный раствор, в котором распределен крупный заполнитель. Для конгломератных мезо- и макро-структур кроме свойств матрицы и самого заполнителя (мелкого или крупного) большое значение имеет и распределение заполнителя в объеме бетона.

Предложено классифицировать новообразования по степени их дисперсности [8] на три группы:

- а) коллоидные;
- б) субмикроструктурные;
- в) макроструктурные.

Обоснованность подобной классификации новообразований полностью подтверждается данными о продуктах гидратации цемента. Ниже приведены сведения о степени дисперсности новообразований, образующихся при реакциях гидратации портландцемента нормального твердения. При этом в [8] новообразования подразделяются по степени их дисперсности на группы:

- коллоидные (менее 100 Å) – тоберморитовый гель;
- субмикроструктурные (100–1000 Å) – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и различные фазы, содержащие Al^{3+} , Fe^{3+} и SO_4^{2-} ;
- микроструктурные (более 1000 Å) – $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

В [9] А. Е. Шейкиным для твердеющего цементного камня предлагаются три основные структурные составляющие:

1) кристаллический сросток, образованный сросшимися друг с другом кристаллами гидроалюминатов кальция, гидрата окиси кальция, а также гидросульфалюмината и гидросульфферрита кальция;

2) тоберморитовый гель, в котором дисперсной фазой являются субмикроструктурные гидросиликаты кальция;

3) не до конца гидратированные зерна цемента.

Кристаллизационная структура (кристаллический сросток) цементного камня возникает в результате кристаллизации из жидкой фазы смешанных кристаллов и их последующего срастания друг с другом. При этом смешанные кристаллы образуются как путем замены в кристаллических решетках ионов одинаковой валентности (например, образование твердых растворов гидроалюминатов и гидроферритов кальция), т. е. путем изовалентного изоморфизма и в результате гетеровалентного изоморфизма, когда в кристаллической решетке происходит замена ионов разной валентности. Причем электростатический баланс восстанавливается изменением числа ионов в решетке, например по схеме $3\text{Ca}^{2+} - 2\text{Al}^{3+}$. Возможность взаимного замещения определяется не только свойствами ионов, типом соединения и геометрическим подобием структуры решетки, но и концентрацией ионов в жидкой фазе цементно-водной суспензии. При образовании кристаллического сростка цементного камня в кристаллические решетки отдельных новообразований включаются слои и блоки субмикроструктурных других новых фаз, возникающих в процессе гидратации цемента. Кристаллический сросток цементного камня образуется из микроскопических кристаллических сростков, которые или объединяются в единый каркас, или остаются в структуре цементного камня в виде микроскопических включений, разоб- щенных тоберморитовым гелем. В тоберморитовом геле дисперсной фазой являются субмикроструктурные гидросиликаты кальция, образующиеся при гидратации силикатных фаз портландцементного клинкера (трехкальциевого и двухкальциевого силикатов). Тоберморитовый гель – основной структурный компонент цементного камня, занимающий примерно 75 % его объема.

Происхождение пор в бетоне

Одна из важнейших характеристик структуры бетона – параметры его порового пространства. Это связано с тем, что цементный камень и соответственно раствор и бетон по

своей природе капиллярно-пористые материалы. Известно, что даже незначительное по объему количество пустот в материалах приводит к резкому изменению их свойств. Поэтому все важные для практики свойства бетона в той или иной степени связаны с объемом и характером структуры его порового пространства.

Рассматривая классификацию пор по их происхождению, следует отметить, что образование основного объема пор в бетоне связано с избыточным количеством воды, которое вводится в бетонную смесь для придания ей необходимой подвижности. Объем такой воды зависит от водоцементного отношения, степени гидратации цемента и других факторов. В пределах колебаний расхода воды от 160 до 240 л/м³ и цемента от 300 до 600 кг/м³ объем свободной воды в затвердевшем бетоне в среднем составляет 5–20 % от его объема. Эти поры образуют в цементном камне и бетоне систему сообщающихся капилляров, поэтому их называют капиллярными. Размер капиллярных пор колеблется от 0,1–1,0 до 20,0–50,0 мкм и более. В отличие от пор цементного геля, которые характеризуются непрерывностью, капиллярные поры могут иметь прерывистую структуру, что положительно влияет на снижение проницаемости бетона и повышение его долговечности. В зависимости от условий твердения бетона гелевые, контракционные и капиллярные поры могут быть заполнены либо водой, либо воздухом [10].

Образование в бетоне воздушных пор может быть вызвано несколькими причинами. В бетонной смеси всегда содержится некоторое количество воздуха, который был вначале адсорбирован на поверхности зерен цемента и заполнителей и при перемешивании не был удален вследствие неполного смачивания поверхности зерен либо введения специальных (воздухововлекающих) добавок. Эти воздушные поры обычно имеют сферическую форму и размеры от 25 до 500 мкм и более. Объем воздушных пор редко превышает 5 % от объема бетона. Кроме того, в бетонных смесях при их уплотнении возможно защемление дополнительного количества воздуха, распределенного в бетоне случайно, поэтому эти пустоты также снижают однородность материала и ухудшают его свойства. Таким образом, в результате различных деструктивных процессов возможны

разрыхление структуры бетона и образование дополнительного порового пространства, которое обычно заполняется воздухом.

К дефектам структуры бетона относятся также седиментационные поры, образуемые в результате наружного и внутреннего водоотделения. При наружном водоотделении часть воды затвердения, обтекая крупный заполнитель, выходит наверх, образуя систему направленных сообщающихся капиллярных пор. Другая часть воды скапливается под крупным заполнителем, насыщая зоны контакта (внутреннее водоотделение). Седиментационные поры имеют размер 50–100 мкм. Установлено, что чем тоньше прослойка раствора вокруг крупного заполнителя, тем меньше наружное и тем больше внутреннее водоотделение в бетоне. По мнению многих исследователей, седиментационные полости являются основными путями проникания в бетон воды, так как в отличие от капилляров в седиментационных порах размером более 50 мкм вода находится в свободном состоянии и может перемещаться под действием силы тяжести или незначительного гидростатического давления. Поэтому седиментационные поры часто играют в бетоне решающую роль в процессах фильтрации и оказывают большое влияние на его долговечность.

В цементном камне имеются также контракционные поры, образующиеся вследствие проявления контракции системы «цемент – вода» при твердении цементного камня. Существует предположение, что контракционные поры имеют размеры, характерные для капиллярных, и являются их разновидностью. Для выяснения природы таких пор проведем следующий анализ.

Если принять объем цемента 1 см³, то при полной его гидратации объем новообразований составляет 2,2 см³. Плотность алитового портландцементного клинкера примерно 3,15 г/см³, т. е. масса 1,00 см³ цемента 3,15 г. Известно, что на химическое взаимодействие расходуется около 25 % воды от массы цемента. Расход воды на гидратацию составит $3,15 - 0,25 = 0,788$ г, а ее объем при плотности 1,000 г/см³ – 0,788 см³. Тогда объем твердой фазы цементного камня выразится суммой объемов цемента и связанной воды, т. е. $1,000 + 0,788 = 1,788$ см³. Разность общего объема новообра-

зований и объема твердой фазы цементного камня $2,2 - 1,788 = 0,412 \text{ см}^3$ – это объем свободной воды, не вступающей в химическое взаимодействие с цементом.

При пористости новообразований 28 % объем пор в них $2,2 \cdot 0,28 = 0,616 \text{ см}^3$, а объем твердой фазы $2,200 - 0,616 = 1,584 \text{ см}^3$. Поскольку объем пор в новообразованиях равен $0,616 \text{ см}^3$, а свободной воды $0,412 \text{ см}^3$, она размещается в порах новообразований, и еще остаются свободные поры, объем которых $0,616 - 0,412 = 0,204 \text{ см}^3$. По отношению к объему цементного камня это составит $0,204 : 2,2 = 0,093 \text{ см}^3$. Учитывая, что в 1 см^3 цементного камня объем цемента $1 : 2,2 = 0,455 \text{ см}^3$, а его масса $0,455 \cdot 3,150 = 1,435 \text{ г}$, контракция будет $0,093 : 1,435 = 0,065 \text{ см}^3$ на 1 г цемента, что подтверждено экспериментально.

Контракция зависит от содержания воды в цементном тесте: чем больше В/Ц, тем больше (при одном и том же расходе цемента) объем цементного теста и тем меньше контракция. При неполной гидратации контракция проявляется в меньшей степени. При введении минеральных добавок она также снижается пропорционально их содержанию. На основании изложенного можно видеть, что контракционные поры – это поры в новообразованиях. Кроме указанных выше пор, возможно появление в бетоне и других дефектов в период его эксплуатации. К таким дефектам относятся усадочные, температурные и другие трещины, поры выщелачивания, дефекты, появляющиеся в результате коррозионного воздействия среды и т. д.

Завершая обзор классификации пор по происхождению, необходимо отметить, что, во-первых, параметры поровой структуры цементного камня и бетона постоянно изменяются во времени. Так, по мере гидратации капиллярные поры постепенно замещаются новообразованиями, что ведет к увеличению объема гелевых пор за счет снижения объема капиллярных. При этом снижается как общий суммарный объем порового пространства, так и средний размер пор. Во-вторых, в цементном камне идет и противоположный процесс – процесс «старения», который приводит к увеличению количества крупных капилляров цементного камня.

Форма, размеры и расположение пор в бетоне

По форме и взаимному расположению поры и капилляры цементного камня и бетона классифицируют на несколько групп [11–13]:

а) по форме поперечного сечения: ровные трубчатые, бутылкообразные, клиновидные, щелевые и их комбинации;

б) по протяженности: прямые, извилистые, петлеобразные;

в) по непрерывности: открытые (каналообразующие), тупиковые, условно закрытые.

Одной из важных является также классификация пор цементного камня и бетона по их эффективным радиусам. Хотя в настоящее время и нет общепринятой методики деления пор капиллярно-пористых тел по размерам, все же можно отметить, что наиболее полно этот вопрос разработан А. В. Лыковым [14] и М. М. Дубининым [15]. По их представлениям, капиллярными называются поры, для которых капиллярный потенциал значительно больше потенциала поля тяжести. В капиллярных порах поверхность жидкости принимает форму, обусловленную силами поверхностного натяжения, и мало искажается за счет силы тяжести. Капиллярные поры делят на микро- и макрокапилляры. Основным критерий при этом делении – отношение пор к явлению капиллярной конденсации. В результате адсорбции паров воды из воздуха стенки капилляра покрываются слоем влаги толщиной около $0,1 \text{ мкм}$. Если радиус капилляра меньше этой величины, то такой капилляр может быть полностью заполнен жидкостью в результате сорбции ее паров независимо от того, есть ли у капилляра дно или он сквозной. При радиусе более $0,1 \text{ мкм}$ мениски не смыкаются и капиллярная конденсация может происходить только в несквозных капиллярах. Таким образом, микрокапилляры с радиусами, меньшими $0,1 \text{ мкм}$, могут заполняться за счет сорбции паров воды из окружающей среды и образования пленок на стенках. Макрокапилляры с радиусами, большими $0,1 \text{ мкм}$, могут быть заполнены жидкостью только при непосредственном контакте с ней. Кроме того, особенностью макрокапилляров является то, что они не только не сорбируют влагу из влажного воздуха, а наоборот, могут отдавать первоначально находившуюся в них влагу в атмосферу. Поэтому гигроскопичность бетонов и их равновесная влажность зависят в первую очередь от соотношения в них микро- и макрокапилляров.

Важная закономерность явления капиллярной конденсации состоит в том, что оно качественно не связано со смачиваемостью стенок

капилляра, т. е. гидрофобные микрокапилляры могут сорбировать влагу из воздуха, а гидрофильные макрокапилляры отдавать влагу в насыщенную водяными парами атмосферу. Давление насыщенного пара над вогнутой поверхностью жидкости в капилляре меньше, чем над плоской поверхностью. Для микрокапилляров с радиусами менее 0,1 мкм давление снижается весьма существенно, в то время как для макрокапилляров снижением давления можно пренебречь.

В [16] при изучении пор в адсорбентах была выявлена также группа пор размерами 15–20 Å. Такие поры обнаружены и в цементном камне. Увеличение потенциала адсорбции – причина объемного заполнения этих пор. Для цементного камня и бетона наиболее удобно делить поры на три группы: микрокапилляры ($r < 0,1$ мкм), макрокапилляры ($(1-10) > r > 0,1$ мкм) и некапиллярные поры. Иногда можно дополнительно дифференцировать микропоры на ультрамикропоры ($r < 50$ Å) и переходные микропоры ($50 \text{ Å} < r < 0,1$ мкм).

Методы определения пористости цементного камня и бетона

Наиболее распространенный метод определения общей пористости цементного камня и бетона – основанный на представлении, что объем пор выражается разностью общего объема материала и объема его твердой фазы:

$$P = 1 - \rho_{\text{ср}}/\rho,$$

где P – пористость материала; $\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность материала; ρ – плотность твердой фазы материала [11].

Однако общая пористость не может характеризовать проницаемость цементного камня или бетона, поскольку перенос жидкости в цементном камне или бетоне осуществляется только в крупных порах. В настоящее время для определения характера распределения пор по размерам в цементном камне используется ряд методов: микроскопический, метод капиллярного подсоса, вытеснения воды воздухом, сорбционные методы, методы ртутной порометрии и радиоактивных изотопов. Каждый из этих методов не может дать полную картину дифференциальной пористости цементного камня или бетона. Так, методом микроскопии можно диагностировать пористость материала с размерами пор 2 мкм и более; капиллярного

подсоса – с размерами 0,1–20,0 мкм; вытеснения воды воздухом – при порах диаметрами от 1 мкм до 1 мм. Сорбционные методы, основанные на изучении характера изотерм адсорбции азота или циклогексана, позволяют выявлять поры размерами 0,0003–0,2000 мкм. Методом ртутной порометрии можно обнаружить поры диаметрами от 0,004 мкм до 1,000 мм, а с применением радиоактивных изотопов – 0,01 мкм и более [11].

Поскольку поры в цементном камне имеют размеры от нескольких десятков ангстрем до долей миллиметра, наиболее предпочтительными методами диагностирования пористости являются сорбционные и ртутной порометрии. Однако такие методы позволяют выявлять до 70 % объема пор цементного камня, а основанные на адсорбции циклогексана – до 50 %. Это обусловлено тем, что часть пор цементного камня недоступна для азота и циклогексана. Методом ртутной порометрии истинный характер пористости выявить невозможно вследствие использования высоких давлений (до 350 МПа) при проведении исследования, значительно превышающих пределы прочности цементного камня. Наилучшие результаты получаются при определении дифференциальной пористости одновременно несколькими методами. В этом случае осуществляется контроль точности измерений и повышается достоверность получаемых результатов.

Многочисленные исследования пористости цементного камня показывают, что на непрерывных кривых распределения пор по размерам четко просматриваются два максимума. Первый, ярко выраженный, соответствует размеру пор около 0,0045 мкм, второй – около 0,2000 мкм. В первом случае – это поры в новообразованиях цементного камня. Они формируются при физико-химическом взаимодействии цемента с водой и образовании гидросиликатов, гидроалюминатов и гидроферритов кальция. Как установлено, объем этих пор составляет 28 % от общего объема новообразований. Максимум относится к капиллярным порам, образующимся вследствие присутствия в цементном камне свободной (несвязанной) воды, заземленного воздуха, оставшегося в системе при неполном поглощении воды твердой фазой, а также вовлеченного в процессе перемешивания и не вытесненного при уплотнении цементного теста. Для цементных рас-

творов и бетонов характерны также поры размерами 1–9 мкм (третий максимум на кривой распределения). Эти поры образуются вследствие неполного контакта цементного камня с поверхностью заполнителей. При этом в контактной зоне наблюдаются локальное повышение водоцементного отношения, увеличение объема гидратных новообразований, разрыхление искусственного камня. Поры в новообразованиях имеют размеры 0,0015–0,0030 мкм. В процессе изменения объема цементного камня такие поры, и особенно контракционные, могут укрупняться. Первый максимум на кривых распределения пор по размерам характеризует укрупнение пор в новообразованиях при разрежении газовой среды в порах формирующегося цементного камня. Исследования кинетики контракции твердеющего цементного теста показали полное совпадение с вышеприведенными расчетными характеристиками, отображающими фазовый состав цементного камня. Полученные данные позволяют представить выражение для расчетного определения контракционной пористости цементного камня, т. е. контракцию (см^3) можно выразить как

$$V_{\text{контр}} = 0,065(1 - D)\mu\Pi,$$

где Π – расход цемента (г) на 1 см^3 цементного теста; μ – степень гидратации цемента; D – содержание минеральных добавок в цементе.

Объем цементного камня (см^3) с учетом имеющего место контракционного изменения объема цементного теста к началу схватывания

$$V_{\text{т}} = \varphi(1/\rho_{\text{ц}} + B/\Pi),$$

где φ – коэффициент контракции цементного теста, зависящий от относительного водосодержания цементного теста; $\rho_{\text{ц}}$ – плотность цемента, $\text{г}/\text{см}^3$.

Тогда контракционная пористость цементного камня

$$\Pi_{\text{контр}} = \frac{0,205(1 - D)\mu/\rho_{\text{ц}}}{\varphi(1/\rho_{\text{ц}} + B/\Pi)}.$$

Пористость новообразований, капиллярная и общая пористость цементного камня:

$$\Pi_{\text{н.о}} = \frac{0,616(1 - D)\mu/\rho_{\text{ц}}}{\varphi(1/\rho_{\text{ц}} + B/\Pi)};$$

$$\Pi_{\text{кап}} = 1 - \frac{1/\rho_{\text{ц}}[1 + 1,405\mu(1 - D)]}{\varphi(1/\rho_{\text{ц}} + B/\Pi)};$$

$$\Pi_{\text{общ}} = 1 - \frac{1/\rho_{\text{ц}}[1 + 0,789\mu(1 - D)]}{\varphi(1/\rho_{\text{ц}} + B/\Pi)}.$$

Полученные выражения можно использовать для расчетов структурной пористости цементного камня. Их отличительная особенность заключается в учете контракции твердеющего цементного теста, которая оказывает значительное влияние на объем формирующегося искусственного камня [11]. Структурная пористость бетона определяется пористостью цементного камня. Однако пористость бетона может отличаться от расчетной, поскольку в бетонной смеси возрастает вероятность образования седиментационных полостей в контактной зоне цементного камня с заполнителями и накопления воздушных пузырьков, вовлеченных при перемешивании смеси и при ее уплотнении.

Различные по размерам поры по-разному участвуют в процессах массопереноса. Поры в новообразованиях и контракционные вследствие чрезвычайно малых размеров прочно удерживают воду. Вода в них не содержит растворенных веществ, а фильтрующиеся через такое капиллярно-пористое тело растворы оставляют растворенные продукты в более крупных капиллярных порах. Поры в новообразованиях бетона, находящегося в обычной газовой среде естественной влажности, всегда заполнены водой. Капиллярные поры (0,2 мкм и более) вследствие малого различия давления насыщенного пара над мениском и плоской поверхностью не будут заполняться водой. Вода испаряется из открытых пор или перемещается в новообразования при дальнейшей гидратации цемента. Эти явления положены в основу разделения пор бетона на два различающихся по свойствам вида: микрокапилляры с размерами менее 0,2 мкм, макрокапилляры с размерами 0,2 мкм и более.

Влагоперенос в цементном камне и бетоне

Наибольшую опасность для бетона и железобетона представляют жидкие агрессивные среды. Воздействие на бетон твердых и газообразных сред происходит в основном после рас-

творения их в воде и проникновения в капиллярно-пористое тело бетона. Проникновение в бетон жидких сред зависит от размера поровых каналов и обусловлено природой переноса жидкости в бетон. Возможны три разновидности механизма переноса жидкости: вязкостное течение, подчиняющееся закону Пуазейля; капиллярный поток, объясняемый законом Дарси; диффузионный перенос, подчиняющийся закону Фика.

Молекулярная диффузия наблюдается при максимальных радиусах поровых каналов менее 0,1 мкм, капиллярный поток – при 0,1–10,0 мкм, а вязкостное течение жидкостей при средних давлениях – при радиусе пор более 1,0 мкм. Поскольку перенос жидкости в теле цементного камня и бетона в основном предопределяется вязкостным течением и капиллярным переносом, можно считать, что основными путями движения воды являются капиллярные и седиментационные поры цементного камня и бетона.

Водопроницаемость бетона зависит от водоцементного отношения. Чем меньше В/Ц, тем плотнее бетон и меньше его водопроницаемость. При снижении В/Ц с 0,5 до 0,3 проницаемость его уменьшается в 50 раз. Однако более точно характеризует водопроницаемость бетона не общее значение В/Ц, а относительное водосодержание цементного теста $X = \frac{В/Ц_t}{K_{н.г}}$

($K_{н.г}$ – коэффициент нормальной густоты цементного теста).

Характеристикой водопроницаемости цементного камня и бетона является коэффициент фильтрации

$$k_{\phi} = \frac{Qh}{tAH},$$

где k_{ϕ} – коэффициент фильтрации, м/с; Q – средний расход воды на период фильтрации, м³; h – толщина слоя фильтрующего материала, м; t – продолжительность фильтрации, с; A – площадь фильтрующей поверхности, м²; H – напор воды на испытываемой поверхности (высота столба воды), м.

Результаты исследований показывают, что как в цементном камне, так и в бетоне значение коэффициента фильтрации увеличивается с повышением относительного водосодержания. Коэффициент фильтрации при изменении от-

носительного водосодержания от нижнего до верхнего пределов связности цементного теста увеличивается примерно в 50 раз. При этом изменение k_{ϕ} в зависимости от относительного водосодержания носит почти линейный характер. Установлена идентичность изменений коэффициента фильтрации и капиллярной пористости в зависимости от относительного водосодержания цементного теста. Это показывает, что водопроницаемость цементного камня обуславливается его капиллярной пористостью.

Проницаемость цементного камня и бетона зависит от продолжительности и условий их твердения. Сроки и условия твердения предопределяют степень гидратации цемента. При увеличении степени гидратации цемента на 1,0 % капиллярная пористость изменяется на 0,5 %. Следовательно, для получения цементного камня и бетона с наименьшей водопроницаемостью необходимо создавать условия для полной гидратации используемого вяжущего. Исследования показали, что наилучшие результаты получаются при твердении бетона в воде. Водопроницаемость его при этом снижается в два раза по сравнению с бетоном, твердевшим в нормально-влажностных условиях. Объясняется это в первую очередь тем, что при твердении в воде полнее проходит гидратация цемента. Тепловлажностная обработка бетона обуславливает повышение пористости цементного камня, и в результате проницаемость бетона возрастает в 3–4 раза.

Водопроницаемость бетона зависит и от свойств заполнителей. Система капилляров в зоне контакта цементного камня с заполнителями – основной путь проникновения в бетон воды. Здесь, прежде всего, и образуются очаги разрушения бетона при всех видах коррозии. Седиментация (расслоение) бетонной смеси сопровождается увеличением проницаемости бетона. В бетоне с малым объемом заполнителя внутреннее водоотделение меньше, а наружное больше. Седиментационное водоотделение в бетоне обусловлено явлением водоотделения в цементном тесте, которое проявляется вследствие расслоения твердой фазы цементного теста и контракции системы цемент – вода. Водоотделение возрастает с увеличением В/Ц.

Характер изменения водоотделения свидетельствует о том, что отслаивание воды происходит в результате седиментации цементных флюкул и последующего проявления коагуля-

ционного структурообразования формирующегося скелета искусственного камня. Когда свободная вода находится лишь в структурных ячейках и полостях цементного теста, водоотделение проявляется очень слабо, поскольку седиментация ограничена тесным контактированием зерен цемента. Водоотделение в этом случае может происходить лишь за счет некоторого растворения поверхностных слоев зерен минералов портландцементного клинкера и контракции цементного теста.

При В/Ц более $1,65K_{н.г.}$, когда система цемент – вода представляет собой суспензию взвешенных в воде зерен цемента, свободно протекающий процесс седиментации способствует значительному водоотделению до остаточного В/Ц, равного примерно $1,65K_{н.г.}$. Относительный объем отслаивающейся воды (при В/Ц более $1,65K_{н.г.}$) $B = 26,5 \%$. Поскольку В/Ц теста, соответствующее верхнему пределу связности ($1,65K_{н.г.}$), составляет $0,45-0,50$, а масса воды, физически связываемой заполнителем, примерно $10-15 \%$ от массы цемента, заметное седиментационное водоотделение может иметь место при В/Ц бетона более $0,6$. При В/Ц до $0,6$, когда вся вода в бетоне удерживается заполнителями и цементным тестом, водоотделение незначительно и практически не сказывается на процессе фильтрации воды сквозь бетон.

При твердении бетона его газо- и водопроницаемость уменьшаются. Как показывают результаты исследований, в первые 15 сут. твердения водопроницаемость бетона снижается в два раза, в последующие 15 сут. – еще в два раза. Водопроницаемость бетона в двухмесячном возрасте составляет примерно 50% от соответствующего показателя одномесячного бетона, в трехмесячном – около 37% , в шестимесячном – около 25% , а в возрасте одного года – не более 20% . Снижение проницаемости бетона во времени происходит вследствие продолжающегося процесса твердения. Однако водопроницаемость зависит также и от других факторов.

Фильтрация воды через бетон характеризуется двумя последовательными этапами: первым – с неустановившимся, вторым – с установившимся режимами. Предполагалось, что заметное, а иногда даже резкое увеличение фильтрационного расхода в начале первого этапа обусловлено вытеснением всей свободной воды, занимающей крупные и мелкие

поры. Затем происходит не только вытеснение свободной воды, содержащей сравнительно мало растворенных веществ и продуктов гидролиза, но и перемещение под действием напорной фильтрации мелкодисперсных фракций цемента, которые образуются в процессе адсорбционной и химической пептизации на поверхности цементных частиц. Всякое значительное перемещение мельчайших частиц, отщепившихся при пептизации, неизбежно повлечет закупорку наиболее тонких капилляров и пор в цементном камне, вследствие чего они постепенно выключаются из общего фильтрующего порового пространства. Этот процесс при общем увеличении объема твердой фазы при гидратации, а также набухании цементного камня приводит к постепенному снижению фильтрационного расхода. Свободными для фильтрации остаются лишь сравнительно крупные поры и каналы, не поддающиеся закупорке частицами коллоидных размеров. Площадь фильтрации через эти сравнительно крупные поры и определяет тот постоянный расход воды, который окончательно устанавливается на втором этапе фильтрации. Продолжительность достижения установившегося режима, согласно данным многих исследователей, в зависимости от условий твердения бетона составляет $120-360$ ч.

В настоящее время считается, что самоуплотнение бетона происходит в результате постепенного сужения путей фильтрации жидкости и перехода части капилляров из системы сообщающихся в систему замкнутых пор. Основными причинами сужения капилляров являются: рост объема новообразований при гидролизе и гидратации цемента и набухание гелеобразной составляющей цементного камня; отложение в капиллярах нерастворимых карбонатов кальция, образующихся при реакции свободного гидроксида кальция и уголекислоты из фильтрующейся воды; закупорка капилляров высокодисперсными, взвешенными в воде частицами твердой фазы; закупорка капилляров газовыми пузырьками, выделяющимися из воды.

При снижении давления в процессе фильтрации газовые пузырьки расширяются и заполняют поры, препятствуя продвижению жидкости. При этом скорость фильтрации может снижаться в два и более раз. Это явление носит название эффекта Жамена. С повышени-

ем давления проницаемость бетона возрастает (закон Дарси). Находящийся в порах бетона воздух постепенно растворяется в жидкой фазе бетона, вследствие чего увеличиваются количество и сечение фильтрующих каналов.

Процесс самоуплотнения частично обратим. Например, при высушивании бетона его проницаемость возрастает, однако не достигает первоначального значения, поскольку карбонизация и закупорка капилляров высокодисперсными частицами твердой фазы обуславливают необратимое сужение капиллярных путей движения жидкости. Приведенные характеристики порового пространства бетонной автомобильной дороги являются основой для использования пропитки его верхнего слоя различными материалами.

ВЫВОДЫ

1. Приведены классификации структуры дорожного бетона, используемые как основа для последующей защиты его верхнего слоя.

2. Отмечена решающая роль поровой структуры бетона как основы для пропиточного уплотнения верхнего слоя с целью ликвидации пылеобразования, упрочнения и гидрофобизации поверхностного слоя дорожного бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мосты и трубы. Вторичная защита от коррозии бетонных и железобетонных конструкций. Правила проектирования и устройства: ТКП 576–2015 (33200). Минск: Мин-во транспорта и коммуникаций, 2015. 88 с.
2. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1980. 464 с.
3. Гордон, С. С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях / С. С. Гордон. М.: Стройиздат, 1969. 151 с.
4. Соломатов, В. И. Структурообразование и технология полимербетонов / В. И. Соломатов // Строительные материалы. 1970. № 2. С. 33–34.
5. Шестоперов, С. В. Технология бетона / С. В. Шестоперов. М.: Высш. шк., 1977. 432 с.
6. Баженов, Ю. М. Бетонополимеры / Ю. М. Баженов. М.: Стройиздат, 1983. 472 с.
7. Магдеев, У. Х. Слоистые защитно-декоративные композиты / У. Х. Магдеев. М.: Лиа-Пресс, 1977. 196 с.
8. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. М.: Стройиздат, 1987. 455 с.
9. Шейкин, А. Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня / А. Е. Шейкин. М.: Стройиздат, 1974. 191 с.
10. Чеховский, Ю. В. Понижение проницаемости бетона / Ю. М. Чеховский. М.: Энергия, 1968. 192 с.
11. Шалимо, М. А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии / М. А. Шалимо. Минск: Высш. шк., 1986. 200 с.

12. Соломатов, В. И. Структурообразование и технология полимербетонов / В. И. Соломатов // Строительные материалы. 1970. № 9. С. 33–34.
13. Соломатов, В. И. Технология полимербетонов и армополимербетонных изделий / В. И. Соломатов. М.: Стройиздат, 1984. 142 с.
14. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 471 с.
15. Дубинин, М. М. Исследование пористой структуры твердых тел сорбционными методами / М. М. Дубинин, Г. С. Жук, Е. Д. Заверина // Журнал физической химии. 1957. Т. 3, № 7. С. 32–35.

Поступила 15.04.2016

Подписана в печать 17.06.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. ТКП 576–2015 (33200). Bridges and Pipes. Secondary Protection of Concrete and Reinforced Concrete Structures Against Corrosion. Rules for Design and Installation. Minsk: Ministry of Transport and Communications, 2015. 88 (in Russian).
2. Akhverdov I. N. (1980) *Fundamentals of Concrete Physics*. Moscow, Stroyizdat. 464 (in Russian).
3. Gordon S. S. (1969) *Structure and Properties of Heavy Concrete with Various Aggregates*. Moscow, Stroyizdat. 151 (in Russian).
4. Solomatov V. I. (1970) Structure Formation and Technology of Polymer Concrete. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (2), 33–34 (in Russian).
5. Shestoperov S. V. (1977) *Concrete Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola. 432 (in Russian).
6. Bazhenov Yu. M. (1983) *Concrete Polymers*. Moscow, Stroyizdat. 472 (in Russian).
7. Magdeev U. Kh. (1977) *Layered Protective and Decorative Composites*. Moscow, Lia-Press. 196 (in Russian).
8. Bazhenov Yu. M. (1987) *Concrete Technology*. Moscow, Stroyizdat. 455 (in Russian).
9. Sheykin A. E. (1974) *Structure, Strength and Crack Resistance of Cement Stone*. Moscow, Stroyizdat. 191 (in Russian).
10. Tchekhovskiy Yu. V. (1968) *Reduction of Concrete Permeability*. Moscow, Energia. 192 (in Russian).
11. Shalimo M. A. (1986) *Protection of Concrete and Reinforced Concrete Structures against Corrosion*. Minsk, Vysshaya Shkola. 200 (in Russian).
12. Solomatov V. I. (1970) Structure Formation and Technology of Polymer Concrete. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (9), 33–34 (in Russian).
13. Solomatov V. I. (1984) *Technology of Polymer Concrete and Reinforced Polymer Concrete Products*. Moscow, Stroyizdat. 142 (in Russian).
14. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energia. 471 (in Russian).
15. Dubinin M. M., Zhuk G. S., Zaverina E. D. (1957) Investigations on Porous Structure of Solid Bodies while Using Sorption Method. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii* [Journal of Physical Chemistry], 3 (7), 32–35 (in Russian).

Received: 15.04.2016

Accepted: 17.06.2016

Published online: 28.07.2016