

УДК 666.972.522

**ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕОРИИ ПЕРКОЛЯЦИИ  
ПРИ ПОДБОРЕ СОСТАВА ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОГО БЕТОНА**

**Д.С. ЗЕЛЕНКЕВИЧ, А.Н. ЯГУБКИН,  
канд. техн. наук, доц. В.В. БОЗЫЛЕВ  
(Полоцкий государственный университет)**

*Представлены результаты исследований по повышению водонепроницаемости бетона, задачей которых было экспериментальное определение порогов перколяции для бетонов с разными марками по водонепроницаемости. Водонепроницаемость объясняется специфической структурой бетона и обусловлена наличием в нем большого количества воздушных пор. Показано, что водонепроницаемость зависит не только от числа пор в бетоне, но и от их формы, а также от соотношения исходных материалов, подбора состава бетонной смеси и способа ее укладки. Рассмотрена теория перколяции (протекания), которая определяет поведение большого числа элементов, связанных между собой. Определены пороги перколяции для бетонов с разными марками по водонепроницаемости, что позволит при подборе состава бетона определить пористость и, следовательно, установить, выполняются ли требования по водонепроницаемости.*

Теория перколяции (протекания) определяет поведение большого числа элементов, связанных между собой. При этом размер и вид связей элементов носит случайный характер [1]. Применение законов теории перколяции при подборе состава водонепроницаемого бетона поможет улучшить его структуру, снизить вероятность ошибок при определении расхода основных компонентов бетонной смеси.

Водонепроницаемость объясняется специфической структурой бетона, который, как известно, состоит из цементного камня, песка и гравия (щебня). Наличие в нем большого количества воздушных пор обуславливает его водопроницаемость, которая зависит не только от числа пор, но в большей степени от их формы и характера, а также соотношения исходных материалов, подбора состава бетонной смеси и способа ее укладки.

**Основная часть.** Профессором Б.Г. Скрамтаевым при подборе бетонной смеси водонепроницаемых сооружений предложено увеличение содержания песка, что способствует повышению плотности бетона. В этом случае повышается связность (нерасслаиваемость) бетонной смеси, наблюдаются малое водоотделение и хорошая удобоукладываемость. Согласно его исследованиям, рекомендуется состав смеси заполнителей с большим содержанием песка (45...55 %). Наибольшая прочность бетона достигается при содержании песка в количестве 35 % в смеси заполнителей [2].

Необходимо знать о том, что песок должен быть средней крупности. Мелкий песок имеет большую общую площадь поверхности, следовательно, потребуется большее количество воды для затворения бетонной смеси. Крупный же песок создаст большие по размерам поры в структуре бетона, что тоже негативно скажется на его водонепроницаемости. Также фактором, влияющим на плотность структуры бетона, а соответственно, и водонепроницаемость, является водоцементное отношение. С увеличением количества цемента уменьшается расслоение бетонной смеси, повышается плотность, а значит, и водонепроницаемость бетона. С увеличением воды снижается прочность и водонепроницаемость бетона, поэтому для затворения бетонной смеси следует брать наименьшее количество воды.

Согласно исследованиям по определению оптимального водоцементного отношения, проведенным профессором М.Г. Давидсоном, для получения водонепроницаемости бетонная смесь должна иметь водоцементное отношение 0,40...0,45 [3].

Вид цемента оказывает существенное влияние на водонепроницаемость бетона. Применяются цементы более тонкого помола. В этом случае цементное тесто будет обладать более высокой водонепроницаемостью, что обуславливается малым водоотделением (седиментацией), малыми и более равномерно распределенными порами и большой степенью гидратации [4].

Сложность задач проектирования составов водонепроницаемого бетона заключается в необходимости увязки водоцементного отношения и расхода воды, определяющих расход цемента, а также вида применяемого цемента и добавок с требованиями обеспечить необходимые прочностные свойства.

Ученые предлагают множество проверенных в лабораторных и производственных условиях способов повышения водонепроницаемости бетонов. Но представляется, что данная проблема не решена полностью. Исследования в данной области продолжают быть актуальными и сегодня. Дальнейшее совершенствование этой технологии благоприятно скажется на улучшении одного из основных показателей строительства – повышении качества и долговечности сооружений.

Водонепроницаемость бетона назначают исходя из допустимой фильтрационной характеристики бетона и стойкости его к коррозии.

Правильное назначение требований по водонепроницаемости вызывает ряд затруднений. Вместе с тем получение водонепроницаемого бетона часто связано при прочих равных условиях с заметным увеличением расхода цемента, поэтому учет требований по водонепроницаемости бетона при проектировании его состава может быть определяющим.

В практике проектирования состава бетона возможно использование таких нормативных характеристик водонепроницаемости, как:

- 1) наибольшее давление воды (МПа), которое могут выдержать стандартные образцы без появления на их открытой стороне признаков просачивания воды;
- 2) коэффициент фильтрации бетона, характеризующий количество воды, проникающее через единицу сечения в единицу времени, при градиенте (отношении напора в 1 метре водяного столба к толщине конструкции в метрах), равном 1;
- 3) воздухопроницаемость бетона, связанная с водонепроницаемостью бетона градуировочной зависимостью.

По мнению В.В. Стольников, марка бетона по водонепроницаемости носит весьма условный характер. Воспользовавшись уравнением Дарси, ученый рассчитал коэффициент скорости движения воды в бетоне в зависимости от его марки по водонепроницаемости и показал, что при изменении марки бетона по водонепроницаемости с W2 до W4 коэффициент скорости движения воды уменьшается на один порядок. Чтобы уменьшить этот коэффициент еще на один порядок, надо иметь марку W14. Фактические градиенты напора обеспечивают в сооружениях излишний запас, в десятки раз превышающий нормативный [5].

Простейшим способом обеспечения требуемой марки бетона по водонепроницаемости является ограничение водоцементного отношения в соответствии с рекомендациями нормативных документов по разделению бетона на три группы исходя из его плотности. Эти рекомендации не учитывают влияния на водонепроницаемость многих факторов, в том числе и таких значительных, как длительность и условия твердения бетона.

Деление бетона на пять групп по плотности в зависимости от величины пористости в 28-суточном возрасте предложено Н.А. Мощанским [6], который, однако, не связывает показатель плотности с маркой по водонепроницаемости.

Отрицательное влияние на водонепроницаемость минеральных добавок, следующее из номограммы, показано В.П. Сизовым [7].

Исследователь М.А. Шалимо [8] предложил в зависимости от требуемой марки бетона по водонепроницаемости назначать величину  $X$ , т.е. соотношение В/Ц цементного камня в бетоне к величине коэффициента нормальной плотности ( $K_{н.г.}$ ). При известном значении  $X$  находится прочность бетона ( $R_b$ ) и далее расходы заполнителей и цемента.

Из-за сложного механизма переноса воды в бетоне и большого числа влияющих факторов до настоящего времени не разработана количественная теория, связывающая проницаемость бетона и его структуру.

В Полоцком государственном университете проводятся исследования по повышению водонепроницаемости бетона. Водонепроницаемость образцов бетона определялась с помощью метода «мокрого пятна» по ГОСТ 12730.5 [9]. Для определения водонепроницаемости использовались цилиндрические образцы бетона с диаметром 150 мм и высотой 150 мм. Изготовленные образцы хранились в камере нормального твердения при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха не менее 95 %. Для проведения испытаний использовался цемент ПЦ500Д0 («Белорусский цементный завод, г. Костюковичи»); песок с модулем крупности 1,88; щебень с маркой 1200.

Так как содержание пор можно выразить только в объёмных долях, то и содержание остальных компонентов в бетоне будем выражать в объёмных долях. Объёмная доля любого компонента бетона будет выражаться как произведение массовой доли этого компонента на отношение истинной плотности бетона к истинной плотности компонента. Составы бетонных смесей подбирались традиционными способами [4; 10 – 12], представлены в таблице 1.

В принятых для исследований составах варьировались расходы цемента, песка, щебня и воды (составы 1...7); а также вводились добавки: суперпластификаторы с целью снижения расхода воды (составы 8...12) и гиперпластификатор ГП-1 совместно с уплотняющей структуру бетона добавкой кальциевой селитры (состав 13).

Исследователями С.А. Погореловым и С.И. Мирошниченко был определён порог перколяции по узлам, при котором образуется бесконечный кластер из пор. Этот порог составил 0,16 [13]. Состав, используемый С.А. Погореловым и С.И. Мирошниченко, показал марку по водонепроницаемости W4. Для более высоких марок по водонепроницаемости значение порога перколяции будет ещё выше. Задачей данной работы было экспериментальное определение порогов перколяции для бетонов с разными марками

ми по водонепроницаемости. Это позволит при подборе состава бетона определить пористость и таким образом уяснить, выполняются ли требования по водонепроницаемости. Результаты этих исследований представлены в таблице 2.

Таблица 1

Составы бетонных смесей

Шифр состава	Расход материалов, кг на 1 м <sup>3</sup> бетона					Объёмные доли компонентов			
	цемент (Ц)	песок (П)	щебень (Щ)	вода (В)	содержание добавки (Д) и её наименование	цемент (C <sub>ц</sub> )	песок (C <sub>п</sub> )	щебень (C <sub>щ</sub> )	вода (C <sub>в</sub> )
1	400	800	1200	160	–	0,116	0,278	0,401	0,144
2	400	400	1600	160	–	0,116	0,139	0,535	0,144
3	400	1000	1000	200	–	0,115	0,342	0,329	0,178
4	500	500	1400	225	–	0,142	0,169	0,456	0,198
5	500	950	950	225	–	0,142	0,322	0,310	0,198
6	600	600	1200	267	–	0,168	0,200	0,385	0,232
7	600	900	900	267	–	0,168	0,300	0,289	0,232
8	600	600	1200	214	6 (ГП-1)	0,171	0,204	0,393	0,189
9	600	600	1200	214	17,1 (Стахемент)	0,171	0,204	0,393	0,189
10	600	600	1200	214	25,7 (Реламикс)	0,171	0,204	0,393	0,189
11	395	650	1225	165,4	–	0,121	0,237	0,430	0,157
12	395	650	1225	165,4	2,63 (ГП-1)	0,121	0,237	0,431	0,155
13	395	650	1225	138,8	2,63 (ГП-1) + 3,95 (нитрат кальция)	0,122	0,240	0,435	0,133

Таблица 2

Физико-механические свойства исследуемых бетонов

Шифр состава	Характеристики водонепроницаемости				В/Ц	П/Щ	Осадка конуса, см	Прочность на сжатие R <sub>сжс</sub> <sup>28</sup> , МПа
	объёмная доля пор	коэффициент проницаемости, 10 <sup>-12</sup> см/с	марка по водонепроницаемости (W)	порог перколяции				
1	0,137	4,06	6	0,145	0,4	0,67	1	29,20
2	0,132	5,22	8	0,132	0,4	0,25	1	43,14
3	0,127	5,61	8	0,132	0,5	1,00	1	33,46
4	0,138	7,12	6	0,145	0,45	0,36	1	33,13
5	0,131	6,64	8	0,132	0,45	1,00	1	36,04
6	0,135	8,42	6	0,145	0,45	0,5	1	39,60
7	0,131	8,14	6	0,145	0,45	1,00	1	38,43
8	0,145	7,08	6	0,145	0,36	0,5	1	47,41
9	0,155	7,08	4	0,160	0,36	0,5	1	29,36
10	0,145	7,08	6	0,145	0,36	0,5	1	36,41
11	0,131	5,47	8	0,132	0,42	0,53	1	34,54
12	0,128	5,34	10	0,128	0,42	0,53	1	34,00
13	0,122	4,04	12	0,122	0,35	0,53	1	40,52

Как видно из таблицы 2, порог перколяции для марки по водонепроницаемости W6 составляет 0,145. Это означает, что если объёмная доля пор в бетоне не превысит 0,145, то требования по водонепроницаемости W6 будут выполнены. Для марки по водонепроницаемости W8 порог перколяции составляет 0,132. Это означает, что если объёмная доля пор в бетоне не превысит 0,132, то требования по водонепроницаемости W8 будут выполнены. Для марки по водонепроницаемости W10 порог перколяции составляет 0,128. Это означает, что если объёмная доля пор в бетоне не превысит 0,128, то требования по водонепроницаемости W10 будут выполнены. Для марки по водонепроницаемости W12 порог перколяции составляет 0,122. Это означает, что если объёмная доля пор в бетоне не превысит 0,122, то требования по водонепроницаемости W12 будут выполнены.

**Заключение.** В результате работы экспериментальным путем определены пороги перколяции для бетонов с разными марками по водонепроницаемости, что позволит при подборе состава бетона определить пористость и, следовательно, установить, выполняются ли требования по водонепроницаемости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасевич, Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы: учеб. пособие / Ю.Ю. Тарасевич. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
2. Скрамтаев, Б.Г. Крупнопористый бетон и его применение в строительстве / Б.Г. Скрамтаев. – М.: Стройиздат, 1955. – 319 с.
3. Давидсон, М.Г. Водонепроницаемый бетон / М.Г. Давидсон. – Л.: Лениздат, 1965. – 654 с.
4. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учеб. пособие для вузов / Ю.М. Баженов. – М.: АСВ, 2002. – 500 с.
5. Стольников, В.В. Воздухововлекающие добавки в гидротехническом бетоне / В.В. Стольников; под ред. П.А. Ребиндера. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – 168 с.
6. Мощанский, Н.А. Получение плотных и стойких покрытий по бетону на основе конденсационных синтетических смол / Н.А. Мощанский, И.Б. Уварова, В.М. Соломатов. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 114 с.
7. Проектирование состава бетонов: подбор состава бетонной смеси / В.П. Сизов; [Л.А. Кайсер]. – М.: Стройиздат, 1968. – 112 с.
8. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии: учеб. пособие для вузов / М. А. Шалимо. – Минск: Выш. шк., 1986. – 200 с.
9. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости: ГОСТ 12730.5-84. – Введ. 01.07.85. – М.: НИИЖБ, 1984. – 12 с.
10. Бетоны. Правила подбора состава: ГОСТ 27006-86. – Введ. 01.01.87. – М.: НИИЖБ, 1989. – 15 с.
11. Рыбьев, И.А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ: учеб. пособие / И.А. Рыбьев. – М.: Высш. шк., 1978. – 309 с.
12. Дворкин, Л.И. Проектирование составов бетона с заданными свойствами / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Ровно: РГТУ, 1999. – 202 с.
13. Погорелов, С.А. Применение законов перколяции при анализе структуры уплотняемого катками бетона в дорожном строительстве / С.А. Погорелов, С.И. Мирошниченко // Строительные материалы. – 2004. – № 9. – С. 12 – 13.

Поступила 17.06.2013

#### APPLICATION OF THE LAW OF PERCOLATION THEORY IN THE SELECTION OF WATERPROOF CONCRETE STRUCTURE

*D. ZELENKEVICH, A. YAGUBKIN*

*Percolation theory (percolation) determines the behavior of a large number of items related to each other. The size and type of links of elements is random. Waterproofing is explained by the specific structure of concrete, which, as is known, is composed of cement, sand and gravel (crushed). Availability of a large number of air pores causes its permeability, which depends not only on the number of pores, but to a greater extent on their shape and nature, and the ratio of starting materials, the selection of the composition of the concrete mix and a method of installation. Research is conducted to improve the water resistance of concrete. The objective of this work was the experimental determination of the percolation thresholds for concrete with different brands on water resistance. This will allow the selection of concrete to determine the porosity and thus know whether the requirements for water resistance are met.*