

В. П. ПОПОВ, С. Ф. КОРЕНЬКОВА, Д. В. ПОПОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Самарский государственный архитектурно-строительный университет»

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕСТРУКЦИИ БЕТОНА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА БАЗЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

*Анализируются методы контроля водопроницаемости гидротехнического бетона по способности противостоять гидростатическому давлению. Разработана математическая модель разрушения бетона гидростатическим давлением посредством аппарата энергетической концепции механики разрушения. Определены параметры, влияющие на водопроницаемость бетона гидротехнических сооружений.*

*Гидротехнические сооружения, гидротехнический бетон, гидростатическое давление, водопроницаемость, математическая модель.*

*Control methods of durable concrete permeability are analyzed on the capacity to resist hydrostatic pressure. Mathematical model of concrete disintegration by hydrostatic pressure has been developed by means of the apparatus of energetic conception of fracture mechanics. Parameters are determined which influence concrete permeability of hydraulic structures.*

*Hydraulic structures, durable concrete, hydrostatic pressure, water permeability, mathematical model.*

Все подводные элементы гидротехнических сооружений работают в условиях постоянного действия на них одностороннего гидростатического давления. От способности бетона противостоять такому виду нагрузки зависит долговечность всего сооружения в целом. При этом деструкция материала наступает, как правило, не вследствие исчерпания прочностных свойств материала, а из-за процесса фильтрации воды через его структуру. Известно, что процесс фильтрации воды сквозь бетонный элемент вымывает из его структуры составляющие цементной матрицы, вследствие чего в материале появляются дефекты [1]. В начальный период разрушения размеры дефектов невелики, но со временем последние достигают таких параметров, что наступает полная деструкция материала, при которой вода свободно проникает через материал гидротехнического сооружения, а сама структура бетона теряет свою целостность и способность противостоять силовым нагрузкам.

Для классификации бетонов по способности противостоять гидростатическому давлению используют несколько критериев, одним из них является водопроницаемость.

Чтобы контролировать этот критерий, используют восемь групп методов [1–4].

С помощью *первой группы* методов определяют максимальное давление, при котором через бетонный образец не просачивается вода (отсутствуют капли влаги или мокрые пятна на поверхности образца).

*Вторая группа* методов позволяет замерить количество атмосферо-часов до начала просачивания воды в условиях ступенчатого увеличения давления.

Благодаря *третьей группе* можно измерить время просачивания определенного количества воды при нормированном гидростатическом давлении.

*Четвертая группа* методов используется для замеров количества воды, профильтровавшейся через бетонный элемент в течение определенного времени при фиксированном гидростатическом давлении.

В *пятой группе* методов в качестве критерия используют коэффициент фильтрации – отношение количества фильтрата ко времени его фильтрации в условиях заданного гидростатического давления.

С помощью *шестой группы* методов фиксируется скорость падения давления

внутри определенного резервуара, из которого вода под давлением подается на испытываемый бетонный образец.

*Седьмая группа* методов позволяет определить количество воды, проникающей через структуру бетонного образца за строго фиксированное время при переменной величине гидростатического давления.

*Восьмая группа* методов служит для определения глубины проникновения жидкости в бетонный образец в условиях постоянного гидростатического давления.

Определение водопроницаемости по перечисленным методикам может быть осуществлено как на образцах, так и непосредственно на конструкциях гидротехнических сооружений. По действующим в нашей стране нормативным документам стойкость бетона к действию гидростатического давления определяется по двум параметрам: водопроницаемости и коэффициенту фильтрации [3, 4].

Водопроницаемость по стандартной методике характеризуется наибольшим давлением, при котором не наблюдается просачивания воды через бетонный образец определенной формы и размеров. Испытания начинают с величины давления 0,1 МПа, повышая его каждые 8 ч на 0,1 МПа. При проведении таких испытаний применяют специально изготовленные материало- и энергоемкие установки. Процесс занимает достаточно много времени.

Авторами разработана математическая модель разрушения бетона гидростатическим давлением, определены физико-механические характеристики материала, по которым можно было бы оперативно подсчитывать значения водопроницаемости бетона.

Как показали ранее выполненные исследования, процесс фильтрации воды через структуру бетона вызывает образование в последнем сети дефектов в виде микротрещин, развивающихся в макротрещины под действием гидростатического давления воды [1, 2]. Этот процесс достигает завершения в тот момент, когда развивающиеся дефекты выходят на поверхность бетонного элемента, противоположной той поверхности, к которой приложено давление.

Физическая картина такого процесса представлена в следующем виде.

При передаче давления на поверхность бетонного элемента наблюдаются два явления, протекающие одновременно: а) сдавливание воды в поры и микротрещины; б) капиллярный подсос.

Первое характерно для достаточно крупных дефектов: больших пор и микротрещин, которыми изобилует структура бетона. Второе характерно для мелких пор. Здесь следует отметить, что последние практически не влияют на водопроницаемость бетона, поскольку разрушение последнего осуществляется в соответствии с действующим в природе принципом минимума энергетических затрат на любые физические процессы.

Под действием гидростатического давления, передающегося как на стенки пор и микротрещин, так и на их устья, в последних возникают растягивающие напряжения, по величине значительно превышающие прочность структуры материала на растяжение. Это влечет за собой увеличение размеров дефектов, т. е. рост их длины и ширины раскрытия. Последующее возрастание гидростатического давления, обусловленное методикой испытания, приводит к дальнейшему росту дефектов и превращению их в макротрещины. При выходе макротрещин на противоположную поверхность бетонного элемента складываются все условия для свободной фильтрации воды через структуру последнего. Здесь следует отметить, что процесс разрушения структуры бетона начинается в наиболее слабом ее месте – либо там, где наблюдается скопление большого числа дефектов, либо там, где имеется один значительный по размерам дефект в виде крупной поры или технологической макротрещины.

Для математического описания приведенной физической картины был использован аппарат энергетической концепции механики разрушения, хорошо зарекомендовавший себя при использовании его для описания процессов разрушения бетона другими видами внешних воздействий [5].

Поскольку гидротехнический бетон представляет собой материал с иррегулярной структурой, представленной многокомпонентной смесью составляющих, связанных между собой физическим и химическим взаимодействием, и имеется большое количество дефектов, образованных в структуре при ее изготовлении, а аппарат механики разрушения оперирует со структурами, имеющими более или менее регулярное строение и единичные дефекты в виде трещин, то появилась необходимость принятия ряда допущений, которые позволили бы применить основы механики разрушения к рассматриваемым процессам деструкции материала. Авторами были приняты следующие допущения.

Имеющиеся в бетоне включения неоднородностей и участки с различной плотностью распределения прочностных параметров по объему бетонного элемента распределены статистически устойчиво и однородно. При описании процесса разрушения бетона это допущение позволяет оперировать его интегральными характеристиками. Второе допущение позволило объединить все имеющиеся в бетонном элементе дефекты в виде пор и микротрещин в единый дефект, называемый «приведенная трещина», параметры которого представлены суммой длин всех дефектов при единичной их ширине.

При обосновании возможности использования энергетической концепции механики разрушения для описания процессов деструкции бетона, которая, как известно, применима только для хрупких материалов, авторы опирались на результаты ранее выполненных исследований, доказавших хрупкий характер разрушения структуры бетона [5].

Уравнение энергетического баланса бетонного элемента, подверженного загрузению односторонним гидростатическим давлением на любой стадии испытания, по А. А. Гриффитсу [6], запишется в следующем виде:

$$\frac{\pi \sigma^2 l^2 (1 - \mu^2)}{2E} = 2\gamma l, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – величина гидростатического давления, действующего на бетонный элемент, Па;  $l$  – длина приведенной трещины, образовавшейся в элементе, м;  $E$  – модуль упругости бетона, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\gamma$  – поверхностная энергия бетона, Дж/м<sup>2</sup>.

В процессе испытания бетонного образца по мере роста значений гидростатического давления длина приведенной трещины будет стремиться к достижению значения, равного толщине испытываемого бетонного элемента. В момент достижения приведенной трещиной противоположенной поверхности образца на ней появится вода, а величина гидростатического давления достигнет значения водопроницаемости бетона для испытываемого образца. При этом  $l = a$  и  $\sigma = w$ .

Энергетический баланс бетонного элемента в момент прекращения испытания будет равен:

$$\frac{\pi w^2 a^2 (1 - \mu^2)}{2E} = 2\gamma a, \quad (2)$$

где  $a$  – толщина испытываемого бетонного элемента, м;  $w$  – водопроницаемость бетона испытываемого образца, Па.

Из уравнения (2) легко вычислить значения водостойкости:

$$w = 1,128c \sqrt{\frac{E\gamma}{a(1 - \mu^2)}}, \quad (3)$$

где  $c$  – коэффициент, учитывающий скорость приложения гидростатической нагрузки к бетонному образцу, величина безразмерная.

Коэффициент  $c$  в формуле (3) учитывает особенности загрузки бетонного образца при выполнении как стандартных, так и специфических условий проведения испытаний.

#### Вывод

Полученная математическая модель разрушения бетона гидростатическим давлением показывает, что водопроницаемость бетона гидротехнических сооружений зависит от двух видов параметров: а) начальных физико-механических характеристик материала – поверхностной энергии, модуля упругости, коэффициента Пуассона, размеров образца и б) скорости приложения гидростатической нагрузки.

1. Кириллов А. П. О механизме фильтрации воды через бетон // Гидротехническое строительство. – 1968. – № 5. – С. 21–24.

2. Чеховских Ю. В. Повышение проницаемости бетона. – М.: Стройиздат, 1968. – 120 с.

3. Бетоны. Метод определения водопроницаемости: ГОСТ 12730.5–78. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 11 с.

4. Бетоны. Метод определения коэффициента фильтрации воды: ГОСТ 19426–74. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 9 с.

5. Комохов П. Г., Попов В. П. Энергетические и кинетические аспекты механики разрушения бетона. – Самара: Изд-во РИА, – 111 с.

6. Griffith A. A / The phenomenon of rupture and flow in solids // Phil. Trans. Roy. Soc. – 1920. – № 221. – Ser. A. – P. 163–198.

Материал поступил в редакцию 08.06.12.

**Попов Валерий Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и организация строительного производства»

Тел. 8 (846) 242-14-18

**Коренькова Софья Федоровна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные материалы»

Тел. 8 (846) 242-37-02

**Попов Дмитрий Валерьевич**, ассистент кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты»

Тел. 8 (846) 339-14-69