

энергии солнца и ветра примерно 18 % и, кроме того, использование их в Республике Беларусь очень затруднительно. Использование же сегнетоэлектриков в альтернативной энергетике не зависит от погодных условий.

Технологические задачи – это получение многокомпонентных систем твёрдых растворов сегнетоэлектриков с нужными электрофизическими характеристиками. Инженерно-физические задачи сводятся к способу возбуждения колебаний сегнетоэлектрических элементов с высоким КПД использованию высокоэффективных способов преобразования механической энергии и сегнетоэлектрических фазовых переходов с низким диэлектрическим гистерезисом и др.

### Литература

1. Зубцов, В.И. Математическое моделирование процессов колебаний пьезопластины с целью разработки преобразователей / В.И. Зубцов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С Фундаментальные науки. – 2004. – № 12. – С. 111 – 120.
2. Зубцов, В.И. Организация и планирование испытаний пьезопреобразователей механических напряжений / В.И. Зубцов // Приборы и средства автоматизации. – 2002. – № 12. – С. 61 – 67.
3. Трофимов, А.И. Измерительные преобразователи механических величин / А.И. Трофимов. – Томск: «ТПИ», 1979.
4. Зубцов, В.И. Преобразователи для контроля механических напряжений внутри деформируемых сред II контроль. Диагностика / В.И. Зубцов, Е.В. Зубцова. – 2012. – № 6 – С. 51 – 57.

УДК 691.327

**Парфенова Л.М., канд. техн. наук, доц.; Куликова Ю.В.**  
(ПГУ, г. Новополоцк)

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ КАВИТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ БЕТОНОВ

Программой развития энергетической отрасли в 2011 – 2015 годах предусматривается строительство ГЭС мощностью около 120 МВт, в том числе двух ГЭС на реке Западная Двина суммарной мощностью 63 МВт (Полоцкая и Витебская) и двух – на реке Неман суммарной мощностью 7 МВт (Гродненская и Немановская) [1].

Актуальной задачей для гидротехнических сооружений остается обеспечение кавитационной безопасности. Натурные наблюдения показывают, что многие гидротехнические сооружения в процессе эксплуатации выходят из строя раньше установленного срока из-за недостаточной стойкости бетонных и железобетонных конструкций к агрессивной среде.

Кавитация – вид разрушения бетона в зонах высоких вакуумов и значительных скоростей течения воды, когда поверхность бетона подвергается «бомбардировке» многократными ударами кавитационных пузырьков, создающих значительные давления [2].

Одним из основных параметров, характеризующих кавитацию, является число кавитации  $K$ , равное

$$K = \frac{P_{хар} - P_{кр}}{\rho v_{хар}^2 / 2}, \quad (1)$$

где  $P_{хар}$  – характерное абсолютное давление (как правило, осредненное по времени) вблизи обтекаемого элемента – возбудителя кавитации без учета вызванных им возмущений, причем  $P_{хар} = P_a + P_{изб}$ ,  $P_{изб}$  – избыточное давление;  $P_a$  – атмосферное давление, определяемое в зависимости от высоты местности над уровнем моря;  $P_{кр}$  – абсолютное давление, соответствующее давлению водяных паров;  $v_{хар}$  – характерная скорость течения вблизи обтекаемого участка поверхности;

$\rho$  – плотность воды.

С уменьшением коэффициента  $K$  кавитация становится более развитой. Показано [3], что кавитационная эрозия может возникнуть, если соблюдается условие:

$$K < K_{кр.эр} \cong 0,85 K_{кр}. \quad (2)$$

где  $K_{кр}$  – критический параметр кавитации для различных элементов или форм неровностей бетонной поверхности.

Повреждение бетона вследствие кавитации довольно легко отличить от обычного размыва. На поверхности, разрушенной кавитацией, имеются зазубрины, в то время как поверхность, поврежденная водой и крупным песком или каменной мелочью, довольно гладкая. Начинается кавитационное разрушение бетона с разрушения его менее прочной составляющей – цементного камня. Затем уносятся потоком обнаженные зерна песка и крупного заполнителя, и эрозия становится более интенсивной, распро-

страняясь на все большую глубину. На практике в таких конструкциях, как водосбросы, при кавитации могут вырываться большие куски бетона.

Воробьевым Г.А. [4] предложено работу материала в зоне кавитации рассматривать как процесс образования, накопления и перемещения дислокаций, которые, сливаясь, образуют полосы скольжения. Выходы дислокаций на поверхность материала приводят к возникновению ступеней, надразов, что в конечном итоге приводит к образованию и развитию микротрещин, образующих мозаичную структуру, состоящую из отдельных микроблоков. В инкубационный период резко возрастает количество дислокаций, сеть микротрещин становится более мелкой. Размеры блоков микроструктуры тоже заметно уменьшаются. Дальнейшее кавитационное воздействие способствует развитию микротрещин в макротрещины, что и приводит к разрушению поверхностного слоя бетона с выпадением отдельных блоков микроструктуры и к началу «тотального» разрушения.

Сильное влияние на интенсивность кавитационной эрозии оказывает скорость потока. Согласно экспериментальным данным [4] интенсивность эрозии пропорциональна скорости потока  $v$  в степени  $m$ . Для бетона показатель степени  $m$  может быть рассчитан по формуле:

$$m = 1 + \frac{5,94 + 10^{6ldv-a}}{1 + 10^{6ldv-a}}, \quad (3)$$

где  $a$  – коэффициент, значение которого принимается равным  $10^{-7} - 10^{-8}$ ;  
 $v$  – скорость потока, м/с.

Согласно рекомендациям по контролю за состоянием водосбросных сооружений [3] возможно возникновение кавитационной эрозии бетона при скоростях течения, превышающих 15 м/с, в следующих местах:

- перегибы в профиле при увеличении уклона водопроводящего тракта;
- поворот ограждающих водосброс бортов при расширении водовода;
- выпуклый участок стены при общем повороте водовода;
- места окончания облицовок или обделок водовода;
- гасители энергии (пирсы, шашки, водобойные стенки и т. п.);
- участки водобоя в районе расположения дренажных колодцев, стыки плит и блоков бетонирования и прочие местные неровности (дефекты производства строительных работ).

Проведенный в работе [2] анализ показал, что на кавитационную стойкость бетона оказывают влияние следующие факторы: водоцементное отношение бетонной смеси и содержание вовлеченного воздуха, возраст бетона, качество поверхности бетона, циклическое замораживание бетона и его структура, заполнители, добавки и другие. При этом отмечается [2],

что кавитационную стойкость бетона нельзя однозначно связать с каким-либо одним параметром, хотя наблюдается определенная зависимость между стойкостью и прочностью бетона на сжатие.

Величина водоцементного отношения, качество применяемых материалов напрямую влияют на прочность бетона. Поэтому можно считать, что именно этот показатель является основным в оценке кавитационной стойкости бетона. Так, в работе Г.А. Воробьева [4] утверждается, что зависимость между кавитационной стойкостью бетона и прочностью на сжатие носит линейный характер.

Требования к бетонам для гидротехнического строительства по прочности, водонепроницаемости, морозостойкости, водопоглощению, истираемости и другим показателям представлены в стандарте СТБ 2221-2011 [5]. Нормативным документом для получения необходимых характеристик бетона рекомендуется использовать соответствующие цементы и их расход, мелкий и крупный заполнители, подобранные по зерновому составу, а в качестве модификаторов – пластифицирующие добавки.

Однако в последнее время внимание специалистов обращается на возможность использования в гидротехническом строительстве современных строительных композитов, в частности дисперсно-армированных бетонов (фибробетонов), в которых воедино собраны лучшие качества отдельных составляющих. При этом именно гидротехническое строительство является той областью, в которой достоинства фибробетона (высокие прочность и трещиностойкость, износостойкость, непроницаемость и др.) могут быть реализованы с наибольшей эффективностью.

В Республике Беларусь сталефибробетон имеет пока ограниченное применение. Используется, в основном, при возведении монолитных полов и дорожных покрытий, а также отдельных сборных изделий. Выпуск стальной фибры в республике организован на предприятиях РУП «БМЗ» и ОАО «Танис». Проектирование и изготовление сталефибробетонных конструкций осуществляется в Республике Беларусь по «Рекомендациям по проектированию и изготовлению строительных сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением стальной фибры БМЗ» [6] при научно-техническом сопровождении РУП «Институт БелНИИС». Кроме стальной фибры РУП «БМЗ» в республике также активно применяется фрезерованная фибра ЗАО «Курганстальмост» по Рекомендациям [7].

Гидротехнические бетоны подвергаются значительному химическому воздействию воды, которое приводит к выщелачиванию бетона и коррозии арматуры. Если в железобетонных элементах значительные по объему продукты коррозии арматуры вызывают появление радиальных растяги-

вающих напряжений, которые приводят к разрыву бетона и к появлению продольных трещин в защитном слое бетона, то небольшие по объему продукты коррозии стальной фибры не приводят к появлению трещин в структуре бетона, а наоборот, кальматируют поры, и процесс коррозии носит затухающий характер.

Во избежание коррозии бетонных гидротехнических конструкций, целесообразно использовать в качестве фибр синтетические волокна, которые стойки к химическому воздействию агрессивных сред.

Практически все виды синтетических волокон (нейлоновые, капроновые, полипропиленовые и др.) обладают химической стойкостью к воздействию щелочной среды. Известно, что введение синтетических волокон в бетон не приводит обычно к заметному повышению прочности бетона на растяжение, сжатие и изгиб при действии статических нагрузок, так как бетон не в состоянии передать статические усилия на волокна, которые обладают более низким по сравнению с бетоном значением модуля упругости.

При отношении  $E_f / E_c < 1$  ( $E_f$  – модуль упругости волокна;  $E_c$  – модуль упругости бетона) повышается ударная прочность и сопротивляемость материала истираемости. Это важные параметры для гидротехнического бетона, подверженного воздействию движущейся воды.

Введение в сталефибробетон полипропиленового волокна обеспечивает однородность распределения стальных фибр по объему, снижает пористость сталефибробетона и увеличивает ударостойкость. Отмечается [8], что совместное введение в бетонную смесь стальной и синтетической фибры привело к 5 – 10 кратному увеличению ударной выносливости по сравнению с исходным тяжелым бетоном.

Успешное решение вопросов массового применения фибробетонов в гидротехническом строительстве связано с наличием дешевых и недефицитных волокон отечественного производства.

Исследования, выполненные в работе [9], показали эффективность применения в качестве фибры отбракованных полиакрилонитрильных волокон «Нитрон» завода «Полимир» ОАО «Нафтан». Определено, что оптимальными критериями армирования бетона волокном нитрон являются длина волокна 60 мм и расход 5 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона. Истираемость бетона, армированного волокном нитрон, снижается при увеличении содержания волокон. При оптимальном расходе волокна нитрон 5 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона истираемость уменьшилась на 21,7 %. Армирование волокном нитрон меняет характер деформирования бетона, обеспечивает более высокую вязкость и более высокую энергоемкость процесса разрушения, что в целом увеличивает ударную выносливость бетона в 1,5 раза по сравнению с неармированным бетоном.

Дальнейшее углубление знаний о процессах формирования структуры и свойств фибробетонов, о взаимосвязи интенсивности кавитационной эрозии с составами и технологическими процессами приготовления позволит расширить области применения фибробетонов при строительстве и ремонте гидротехнических объектов различного назначения.

### Литература

1. Становление энергетики Беларуси. Путь длиною в жизнь // Энергетическая стратегия. – 2011. – № 2. – С. 20 – 29.
2. Витер, В.К. Разработка техники и технологии исследования кавитационных явлений в гидравлических системах: дис...канд. техн. наук: 05.02.02 / В.К. Витер. – Красноярск, 2003. – 191 с.
3. Рекомендации по анализу данных и контролю состояния водосбросных сооружений и нижних бьефов гидроузлов: П 75-2000. Введ. III кв. 2000 г. – Санкт-Петербург: ВНИИГ, 2000. – 33 с.
4. Воробьев, Г.А. Кавитационная безопасность гидротехнических сооружений: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.07 / Г.А.Воробьев. – М., 1989. – 36 с.
5. Бетоны конструкционные тяжелые для транспортного и гидротехнического строительства. Технические условия: СТБ 2221-2011. – Введ. 30.09.2011. – Минск: Госстандарт, 2012. – 20 с.
6. Рекомендации по проектированию и изготовлению строительных сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением стальной фибры БМЗ: Р1.03.054-2009. – Минск: РУП «Институт БелНИИС», 2009. – 106 с.
7. Рекомендации по проектированию строительных сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением фрезированной фибры ЗАО «Курганстальмост»: Р5.03.084.11. – Минск: РУП «Институт БелНИИС», 2011. – 87 с.
8. Парфенов, А.В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры: автореф. дис...канд.техн.наук: 05.23.05 / А.В. Парфенов. – Уфа, 2004. – 19 с.
9. Парфенова, Л.М. Эффективность армирования бетонов волокнами нитрона / Л.М.Парфенова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – С. 84–86.