

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ ПОВЫШЕННОЙ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Гапоненко Е.А.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Тонкостенные железобетонные конструкции широко применяются в современном гидротехническом строительстве. При очевидных преимуществах тонкостенных конструкций (низкая материалоемкость и вес, простота монтажа и пр.) актуальной проблемой в сложных условиях эксплуатации можно назвать обеспечение долговечности бетона подобных конструкций.

Одними из основных показателей качества, обеспечивающих долговечность конструкций гидротехнических, в том числе и водопропускных сооружений, являются водонепроницаемость и морозостойкость бетона. Также для тонкостенных конструкций выдвигаются требования высокой подвижности смеси. Поскольку в процессе эксплуатации большая часть гидротехнических сооружений подвергаются динамическим воздействиям (ударам льда, волн, плавущих предметов, вибрациям от проходящего транспорта и пр.), не менее актуальным показателем качества можно считать ударостойкость бетона.

Для повышения эксплуатационных свойств и долговечности бетона применяются модификаторы разной природы: пластификаторы, кольматирующие добавки и наполнители. Помимо того, для ответственных тонкостенных конструкций все шире применяется дисперсное армирование фиброй. В гидротехнических сооружениях ввиду эксплуатации в водной среде следует применять полимерную фибру, которая не подвержена коррозии.

Изучалось влияние двух видов полимерной фибры и соответственно изготавливались две серии образцов. В серии А использовалась фибра Fibermesh диаметром 200 мкм и длиной 13 мм, в серии В – фибра Ваукоп с диаметром 19 мкм и длиной 12 мм.

Варьировались следующие факторы состава:

X_1 – количества сульфатостойкого портландцемента, от 500 до 700 кг/м³ ;

X_2 – соотношения щебень/песок, от 1,6 до 2,2. Данный фактор влияет на «защемление» волокон фибры;

X_3 – количества наполнителя (молотого песка дисперсностью 3000 см²/гр), от 0 до 8 % от массы цемента.

В серии А: X_4 – дозировка полипропиленовой фибры Fibermesh, от 0 до 5 кг/м³.

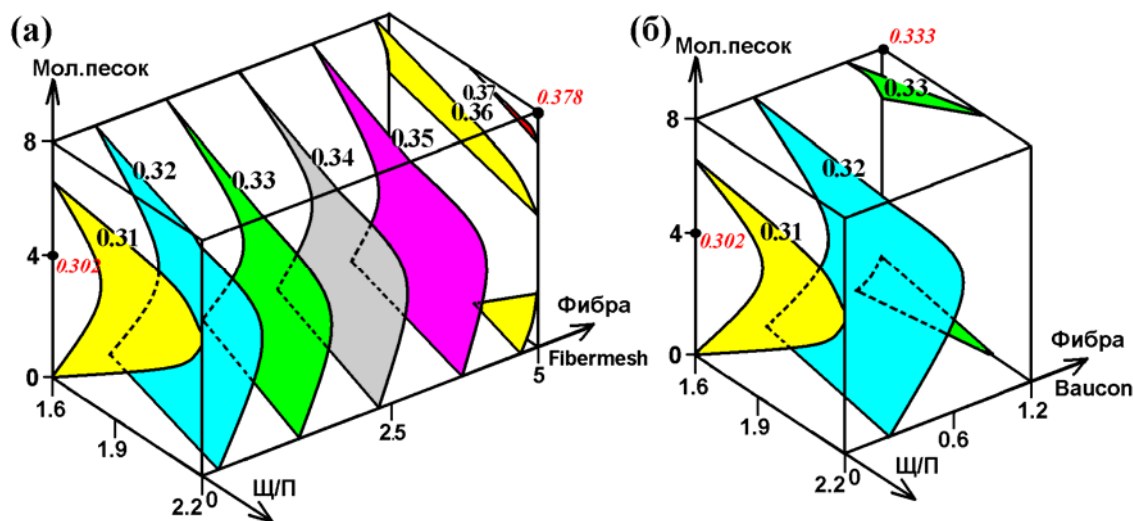
В серии В: X_5 – дозировка полипропиленовой фибры Ваукоп, от 0 до 1,2 кг/м³.

Во все смеси вводилась комплексная добавка Пенетрон А + С-3, соответственно 2% и 0,8% от массы цемента, что выбрано с учетом результатов, достигнутых в более ранних исследованиях нашего научного коллектива [1, 2]. Эксперименты проводятся по 18 точечным планам.

Все смеси имели равную подвижность ОК от 16 до 18 см. По результатам определения водопотребности были построены следующие экспериментально-статистические (ЭС) модели (переход к нормализованным переменным выполнен по типовой формуле [3]):

$$\begin{aligned}
 B/\Omega_A = & 0,331 - 0,033x_1 & \bullet & & - 0,005x_1x_2 & + 0,004x_1x_3 & - 0,008x_1x_4 \\
 & + 0,004x_2 & \bullet & & & & \bullet \\
 & + 0,005x_3 & + 0,010x_3^2 & & & & + 0,003x_3x_4 \\
 & + 0,025x_4 & \bullet & & & &
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 B/\Omega_B = & 0,316 - 0,028x_1 & \bullet & & - 0,003x_1x_2 & + 0,005x_1x_3 & - 0,004x_1x_5 \\
 & & \bullet & & & & - 0,002x_2x_5 \\
 & & \bullet & + 0,007x_3^2 & & & \bullet \\
 & + 0,008x_5 & \bullet & & & &
 \end{aligned} \tag{2}$$



а-смеси с фиброй FiberMesh; б- смеси с фиброй Baucon.

Рис. 1. Влияние варьируемых факторов состава на В/Ц смеси равной подвижности

По этим моделям были построены показанные на рис. 1 диаграммы влияния факторов состава на В/Ц смесями равной подвижности, рис. 1, а – для бетона с фиброй FiberMesh и рис. 1, б – бетон с фиброй Baucon. При построении диаграмм фактор x_1 был зафиксирован на среднем уровне, то есть отображены свойства бетонов с количеством портландцемента 600 кг/м^3 . Оси, показывающие влияние количества фибры имеют различную длину ввиду разной максимальной дозировки фибры, FiberMesh и Baucon.

Анализ диаграмм позволяет утверждать, что существенно на В/Ц смесями влияет только количество полимерной фибры, а большие колебания водопотребности в серии А объясняются большим количеством фибры. Введение молотого песка в значительной части факторного пространства требует некоторого повышения В/Ц смеси для сохранения ее подвижности.

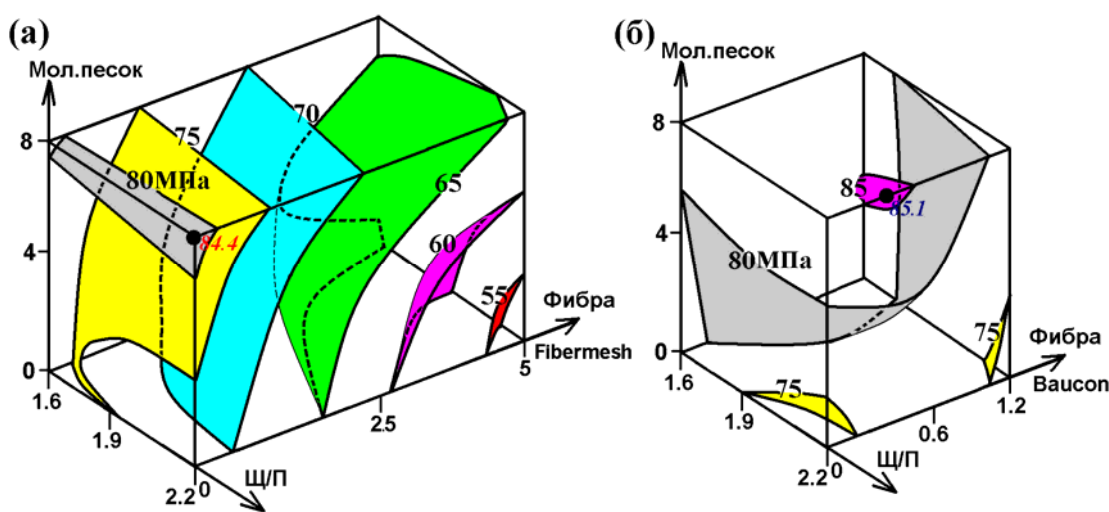
По ЭС-моделям, аналогичным (1) и (2), были построены диаграммы, показанные на рис. 2 и отображающие влияние количества молотого песка (наполнителя), фибры и Щ/П на прочность бетона при сжатии в водонасыщенном состоянии. Количество цемента при этом аналогично рис.1 зафиксировано на уровне 600 кг/м^3 .

Свойства бетона гидротехнических сооружений следует рассматривать именно в водонасыщенном состоянии, как в большей мере соответствующем его условиям эксплуатации.

Анализ диаграммы на рис. 2, а (составы с фиброй FiberMesh) позволяет сказать, что наиболее существенно на прочность бетона при сжатии влияет количество полимерной фибры, при этом значительное ее количество может негативно сказываться на уровне $R_{b,A}$. Однако при введении

до 1.2 кг волокон на м³ бетона их влияние на прочность при сжатии практически не ощутимо. Для составов с фиброй Ваусон (рис. 2, б) введение в смесь полимерных волокон несущественно влияет на $R_{b,B}$. Следует отметить, что основная цель применения дисперсного армирования состоит не в повышении прочности на сжатие композита, а в увеличении его долговечности за счет повышения трещино-, ударо- и морозостойкости.

Введение 8% наполнителя (молотого песка) повышает уровень прочности при сжатии бетона в водонасыщенном состоянии на 5...12 МПа. Данный эффект можно объяснить положительным влиянием тонкодисперсных частиц на структуру композита. Наполнитель выполняет роль мельчайшего компонента, увеличивая сплошность среды и уменьшая межзерновое расстояние в бетоне [4]. Косвенным подтверждением последнего служит то, что наибольшая эффективность от введения молотого песка наблюдается в зоне составов с максимальным Ц/П и количеством фибры, т. е. у составов с некоторым «дефицитом» мелких частиц. Следует также отметить, что при проведении экспериментов и щебень и песок мылись, что способствовало практически полному вытеснению из заполнителей пылевидных фракций. Помимо того, мелкодисперсные частицы наполнителя могут выполнять роль центров кристаллизации при твердении цемента [4].



а- смеси с фиброй Fibermesh; б- смеси с фиброй Ваусон (МПа).

Рис. 2. Влияние варьируемых факторов состава на прочность бетона при сжатии в водонасыщенном состоянии

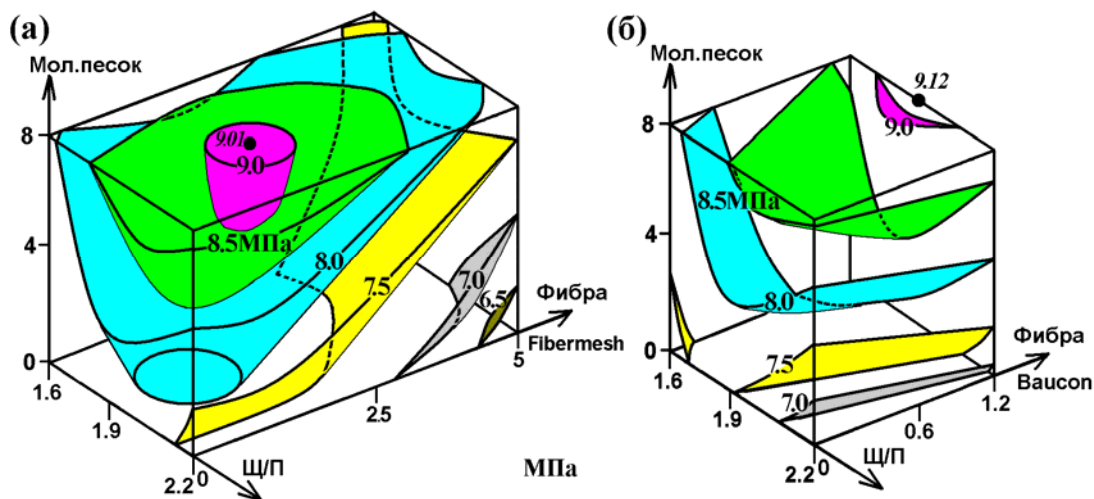
На рис.3 показаны диаграммы, отображающие влияние состава бетона на его прочность на растяжение при изгибе в водонасыщенном состоянии. Из диаграммы на рис. 3, а (составы с фиброй Fibermesh) видно, что за счет введения 0,9..1,6 кг фибры на м³ бетона его прочность на растяжение возрастает примерно на 0,5 МПа. Данный эффект объясняется армирующим действием волокон фибры, способствующим увеличению сопротивления растягивающим напряжениям. Дальнейшее увеличение количества фибры уже негативно сказывается на величине $R_{bt,A}$, что объясняется снижением Ц/В смеси равной подвижности. Величина $R_{bt,B}$ плавно возрастает при введении до 1,2 кг волокон Ваусон во всем факторном пространстве эксперимента (рис. 3, б).

Наибольшие значения прочности на растяжение при изгибе достигаются при «средней» (около 1,9) величине Ц/П, что можно объяснить наилучшим защемлением волокон при соответствующем соотношении крупного и мелкого заполнителя. Введение наполнителя положительно сказывается на величине прочности на растяжение при изгибе во всем диапазоне варьирования факторов – при введении 8 % молотого песка величина как $R_{bt,w,A}$, так и $R_{bt,w,B}$

возрастает в среднем на 1 МПа. Данный эффект объясняется улучшением структуры цементного композита при введении наполнителя.

Определение водонепроницаемости проводилось методом мокрого пятна на приборе ВНИИСТ на образцах-дисках толщиной 4 см и контролировалось по воздухопроницаемости на образцах 15×15×5 см прибором АГАМА-2. Хотя стандарт предусматривают лишь классы *W2*, *W4* и так далее, для анализа использовались и промежуточные значения водонепроницаемости. Одна ступень марки (две атмосферы) соответствует давлению в 2×10^5 Па.

При использовании фибры Fibermesh (серия А) влияние варьируемых факторов состава на водонепроницаемость бетона описывается моделью:



а- смеси с фиброй Fibermesh, б- смеси с фиброй Vaucop (МПа)

Рис. 3. Влияние варьируемых факторов состава на прочность бетона на растяжение при изгибе в водонасыщенном состоянии

$$\begin{aligned}
 W_A (10^5 \text{ Па}) = & 14,97 + 1,33x_1 \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad - 0,42x_1x_4 \\
 & - 0,45x_2 \quad - 1,11x_2^2 \quad \bullet \quad \bullet \\
 & + 1,31x_3 \quad + 0,93x_3^2 \quad \bullet \\
 & - 1,94x_4 \quad \bullet
 \end{aligned} \tag{3}$$

при использовании фибры Vaucop, серия В:

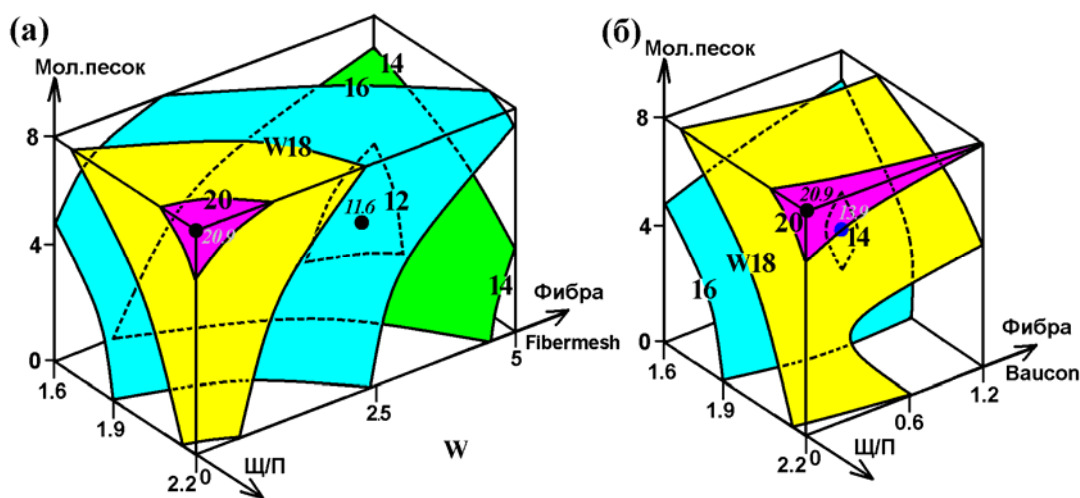
$$\begin{aligned}
 W_B (10^5 \text{ Па}) = & 16,28 + 1,66x_1 \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \\
 & \bullet \quad - 1,06x_2^2 \quad \bullet \quad + 0,62x_2x_5 \\
 & + 1,18x_3 \quad + 1,34x_3^2 \quad \bullet \\
 & - 0,36x_5 \quad \bullet
 \end{aligned} \tag{4}$$

Диаграммы, отображающие влияние Щ/П отношения, количества фибры и наполнителя на водонепроницаемость показаны на рис. 4 (рис. 4, а – составы с фиброй Fibermesh, рис. 4, б – составы с фиброй Vaucop). Дозировка цемента аналогично дозировке на рисунках 1-3 зафиксирована на уровне 600 кг/м^3 ($x_1 = 0$).

Можно сделать вывод о том, что все исследованные составы имели достаточно высокий уровень *W*, что обеспечивалось наличием в их составе комплексной добавки Пенетрон + С-3. Наивысшую водонепроницаемость, до *W20*, в обеих сериях показали составы с максимальным количеством наполнителя, Щ/П отношением около 2,2 и без фибры. За счет введения

наполнителя водонепроницаемость бетона растет в среднем на 2×10^5 Па. Это объясняется улучшением капиллярно-поровой структуры композита. Армирование полимерной фиброй несущественно снижает водонепроницаемость бетона что, по нашему мнению, объясняется формированием направленных капилляров вдоль волокон.

При применении до $1,2 \text{ кг/м}^3$ фибры как Fibermesh, так и Ваусон водонепроницаемость снижается не более, чем на одну марку. Введение же наполнителя, как отмечалось выше, в свою очередь позволяет повысить W не менее, чем на одну марку. Таким образом, возможно использование дисперсного армирования полимерной фиброй в тонкостенных конструкциях ГТС, подвергаемых динамическим воздействиям. Влияние волокон на водонепроницаемость можно признать несущественным, при этом они ощутимо повышают основной показатель сопротивления динамическим нагрузкам – ударостойкость, что показано ниже.



а- смеси с фиброй Fibermesh; б- смеси с фиброй Ваусон (10^5 Па).

Рис. 4. Влияние варьируемых факторов состава на водонепроницаемость бетона

Влияние варьируемых факторов состава бетона на его ударостойкость описывается моделями для серии А и В соответственно:

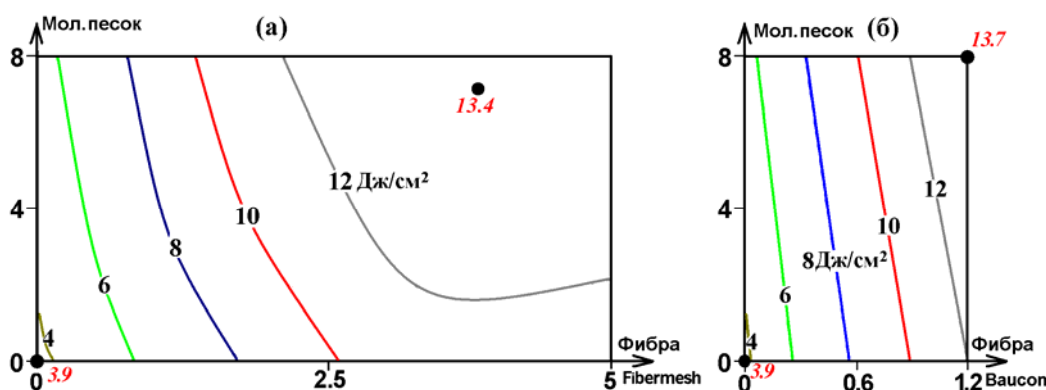
$$T_A \text{ (Дж/см}^2\text{)} = 11,99 \begin{matrix} \bullet & - & 0,67x_1^2 & \bullet & + & 0,29x_1x_3 & \bullet \\ & \bullet & + & 0,73x_2^2 & & \bullet & \bullet \\ & + & 0,79x_3 & - & 0,67x_3^2 & & + & 0,32x_3x_4 \\ & + & 3,67x_4 & - & 3,32x_4^2 & & & \end{matrix} \quad (5)$$

$$T_B \text{ (Дж/см}^2\text{)} = 8,85 \begin{matrix} + & 0,38x_1 & - & 0,74x_1^2 & \bullet & + & 0,28x_1x_3 & + & 0,31x_1x_4 \\ & \bullet & + & 0,39x_2^2 & & \bullet & & \bullet & \\ + & 0,63x_3 & & \bullet & & & & + & 0,21x_3x_4 \\ + & 4,00x_4 & & \bullet & & & & & \end{matrix} \quad (6)$$

Анализ моделей позволяет утверждать, что количество цемента и Щ/П отношение не оказывают существенного влияния на стойкость композита к удару. Малое влияние дозировки цемента на уровень T объясняется тем, что по мере увеличения количества вяжущего композит становится прочнее, но и параллельно с тем более «хрупким», что особенно заметно на бетонах высокой прочности.

На рис. 5 показаны диаграммы в виде квадратов, отображающие влияние на ударостойкость количества наполнителя и полимерной фибры (рис. 5, а – фибра Fibermesh, рис. 5, б – Ваузон). При построении диаграмм факторы x_1 и x_2 как малозначимые для анализа зафиксированы на средних значениях – количество цемента 600 кг/м^3 , Щ/П= 1,9.

Можно сделать вывод о том, что наиболее ощутимо повышается уровень ударостойкости при введении фибры. Волокна, обладающие хорошей дисперсией, образуют в бетоне трехмерную решетку, которая значительно повышает силы сцепления. Наполнитель способствует дополнительному росту данного показателя качества. Всего за счет применения фибры любого из видов и молотого песка уровень ударостойкости бетона повышается более чем в три раза, что говорит об эффективности данного вида модификации для испытывающих динамическое воздействие тонкостенных конструкций.



а- смеси с фиброй Fibermesh, б- смеси с фиброй Ваузон (Дж/см²).

Рис. 5. Влияние количества фибры и молотого песка на ударостойкость бетона

Таким образом, для повышения долговечности бетона тонкостенных гидротехнических сооружений можно рекомендовать вводить в его состав комплексный модификатор, состоящий из оптимального количества суперпластификатора С-3, кольматирующей добавки Пенетрон А и наполнителя (молотого песка), а также применять дисперсное армирование полимерными фибрами.

По результатам исследований был разработан «Регламент по технологии приготовления и применения модифицированного бетона для гидротехнических сооружений мелиорации, водопропускных сооружений и автодорог с применением полимерной фибры».

Литература

1. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Романов О.А. Вплив комплексної добавки суперпластифікатор С 3 + Пенетрон на властивості дрібнозернистого бетону // Дороги і мости. Випуск 6: Збірка наукових статей – Київ, 2006. – С. 257-266.
2. Застосування бетонів, модифікованих системою суперпластифікатор С-3 + Пенетрон для відновлення гідротехнічних та гідромеліоративних споруд / А.В. Мішутін, С.О. Кровяков, О.А. Романов, М.В. Заволока // Меліорація і водне господарство. Вип. 93-94. К.: Аграрна наука. – С. 203-209.
3. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. – К.: Вища школа, 1989. – 327 с.
4. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, С.М. Чудновский: Под. Ред. Л.И. Дворкина. – К.: Будивельник, 1991. – 136 с.