

Выбор оптимальной методики испытания бетонов при объемном нагружении

Д.Е. Капустин, Н. Соному

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Усовершенствование расчетных моделей бетона на основе экспериментальных данных, особенно при исследовании объемного напряженно-деформированного состояния, является актуальной задачей. На этапе расчета защитных оболочек АЭС при воздействии запроектных аварий, категорически важно учитывать имеющиеся запасы прочности используемых материалов. При объемном нагружении за счет работы бетона в стесненных условиях, его прочностные и деформационные характеристики улучшаются, что не в достаточном объеме отображено в действующей в РФ нормативной документации. С учетом анализа существующих методов испытания, на основании трудоемкости и достоверности полученных результатов, был выявлен оптимальный метод испытания на объемное нагружение. Статья содержит результаты апробирования выбранного метода испытаний с учетом усовершенствования системы измерения деформаций. Мы подтвердили эффективность применения предложенной методики с позиции достоверности данных и относительно низкой трудоемкости работ.

Ключевые слова: бетон, испытание при объемном нагружении, объемные тензорозетки, диаграмма деформирования.

При проектировании зданий и сооружений повышенного уровня ответственности, в том числе сооружений АЭС, на этапе расчета, направленном на определение сечений и материалов с требуемыми физико-механическими характеристиками, деятельность проектировщиков регламентируется действующими нормативными документами. При этом качество проектирования зависит от полноты нормативов и обоснованности используемых в расчетах характеристик прочности и деформативности материалов, в том числе при объемных напряжениях в бетоне [1, 2]. С учетом интенсивности напряжений от проектных и запроектных аварийных воздействий (например, расчет защитной оболочки АЭС на избыточное внутреннее давление или падение самолета) при расчетах необходимо максимально эффективно использовать запасы прочности сечений. Одним из направлений развития указанного подхода является учет в расчетной модели изменения прочностных и деформационных характеристик бетонов,

возникающих в результате их работы в условиях объемного нагружения (также актуально для массивных и/или преднапряженных конструкций).

Способы учета изменения характеристик бетона в условиях объемного нагружения в малой степени отражены в основных нормативных документах. Так, например, в СП 63.13330.2018 (Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения) указано, что расчет необходимо выполнять с учетом критерия, выражающего предельные значения напряжений, действующих в трех перпендикулярных плоскостях. При этом расчетная диаграмма деформирования бетона дана только для одноосного однородного напряжения. В СП 41.13330.2012 (Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений) учет изменения расчетных характеристик для бетонных конструкций осуществили за счет определения коэффициента условия работы (γ_{b5}), зависящего от параметров обжатия и коэффициента эффективной пористости, определяемого экспериментально.

В 2019 году было издано Методическое пособие [3], которое дополняет существующую нормативную базу. Здесь за основу принят критерий прочности, разработанный Н.И. Карпенко [4]. В то же время показано, что по результатам сравнения существующих критериев прочности с результатами испытаний бетонов [5], наиболее точным критерием прочности бетона для общего случая объемного напряженного состояния является условие прочности J. Willam - E.P. Warnke. Данная модель заложена в основные программные комплексы для расчета железобетонных конструкций (Ansys, Abaqus, Midas) и успешно себя зарекомендовала при сравнении результатов с экспериментальными данными [6, 7].

Однако большинство исследований показывают, что критерии разрушения бетона зависят от множества факторов, в том числе от структуры самого бетона [8-10] и требуют уточнения по результатам экспериментальных исследований. Для современных бетонов, используемых

при сооружении АЭС, где зачастую используются самоуплотняющиеся бетонные смеси, отличающиеся применением крупного заполнителя малой фракции и большим содержанием цементного теста по сравнению с обычными тяжелыми бетонами, данные уточнения особенно важны. Это подтверждается результатами исследований физико-механических характеристик подобных бетонов при одноосном нагружении, где верхняя и нижняя границы трещинообразования приближаются к прочности бетона [7].

В настоящее время отсутствует стандартизированная методика проведения испытаний бетонов в условиях трехосного нагружения, что приводит к сложностям в объединении результатов различных авторов в единую совокупность. Соответственно, представленное исследование, направленное на выбор оптимальной методики проведения испытаний, является актуальным и практически значимым для развития существующих теорий и критериев прочности бетонов в условиях объемного нагружения и будет использовано в дальнейшем.

Для выбора оптимальной методики экспериментальных исследований прочности бетонов в условиях объемного нагружения был выполнен анализ существующих исследований и определены четыре основных метода проведения испытаний.

К первому методу испытаний относятся испытания образцов кубов [4], помещенных в специальную установку, позволяющую с использованием двух гидравлических домкратов через стальные штампы передавать усилия бокового обжатия (σ_2 , σ_3). Использование двух домкратов позволяет производить различные уровни нагружения в направлениях σ_2 и σ_3 . Продольное нагружение производят с использованием стандартного гидравлического пресса. Для предотвращения сил трения между образцом и штампом устанавливали слоистые прокладки, состоящие из слоев фольги (алюминий, медь) и антифрикционного материала (смазка). Измерение

деформаций осуществляли по тензорезисторам, установленным в заранее подготовленные пазы (глубина около 3 мм) на поверхности образца, которые в последующем заполняли заподлицо с поверхностью специальными составами. Дополнительно производили измерения деформаций по индикаторам перемещения, установленным через специальные приспособления по всем граням образца куба. К положительным сторонам данной методики можно отнести относительную простоту подготовки образца с высокой степенью достоверности результатов измерения деформаций при нагружении (производят измерение по двум независимым каналам – тензорезисторы и индикаторы), а также широкая номенклатура соотношения напряжений. Но высокая сложность изготовления оснастки, ее монтаж и требования к нагружающим приспособлениям значительно ограничивают возможность применения данной методики.

Ко второму методу испытаний относится испытание призм или цилиндров продольным нагружением при ограничении поперечных деформаций за счет использования внешнего или внутреннего армирования [11]. В этом случае интенсивность бокового обжатия зависит от жесткости поперечного армирования, чаще всего обоймы в виде трубы. Нагружение производят через специальный поршень, который передает нагрузку на тело бетона внутри стальной облицовки. Увеличение продольных деформаций за счет коэффициента Пуассона приводит к расширению бетона. При этом стальная облицовка препятствует этому расширению, создавая боковое обжатие. Измерение деформаций в этом случае производят с использованием индикаторов перемещения в продольном направлении и тензорезисторов, установленных на стальную облицовку в поперечном направлении. Достоинствами данного метода является относительная простота подготовки образцов. К недостаткам следует отнести вопросы устранения сил трения между бетоном и облицовкой и невозможность регулирования уровня

обжатия вне зависимости от продольной нагрузки. Данный метод применим при моделировании работы трубобетонных конструкций.

К третьему методу отнесем гидромеханические установки для проведения испытаний типа «цилиндр-поршень» [9]. Для испытаний используют образцы цилиндры, помещенные в камеры высокого давления, где боковые нагрузки прикладывают за счет увеличения давления масла внутри камеры, при этом $\sigma_2 = \sigma_3$. Продольные нагрузки прикладывают за счет установки образца в пресс. Применение данной методики требует изготовления материалоемкого и массивного приспособления для создания бокового обжатия, но применение давления масла исключает силы трения при деформировании бетона, а также образование различных концентраторов напряжений при приложении бокового обжатия. Измерение продольных и поперечных деформаций осуществляют с использованием тензорезисторов, установленных на поверхность образца в продольном и поперечном направлении. Для предотвращения воздействия масла на бетон и тензорезисторы, образец покрывали полиэтиленовой пленкой в несколько слоев.

К четвертому методу относится модернизированная версия гидромеханической установки, в которой боковое давление передается через мембраны за счет увеличения в них давления масла [2, 8]. Испытания производят на стандартных образцах призмах. Приложение нагрузки через гидравлические мембраны позволяет выровнять поля напряжения, по аналогии с третьим методом. При этом нет прямого контакта образца с маслом, а сама установка имеет более компактные размеры. Измерение деформаций производят с использованием тензорезисторов установленным в продольном и поперечном направлении. Для защиты тензорезисторов от бокового давления мембран, а также для исключения сил трения образец призму покрывают слоем парафина, толщиной около 1 мм, а затем на образец

через смазывающее вещество (литол) устанавливают чехол из бензомаслостойкой резины. Данная установка также может быть использована для испытаний на осевое растяжение, ползучесть и приложения динамической продольной нагрузки. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.

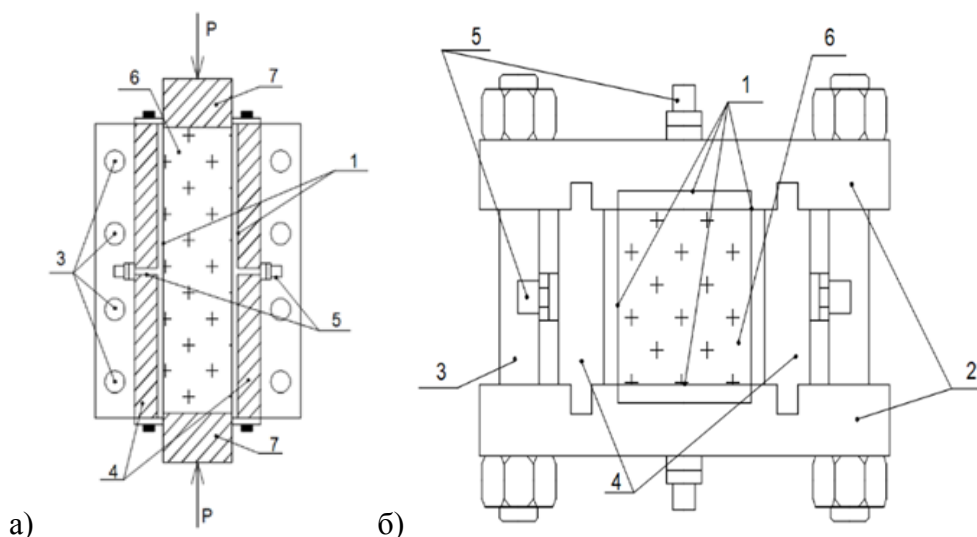


Рис. 1. – Установка для проведения испытаний на объемное нагружение

а) общий вид; б) поперечный разрез

(1 – гидростатическая камера; 2 – основные несущие боковые стенки; 3 – силовые болты; 4- боковые несущие плиты; 5 – штуцер; 6 - бетонный образец; 7 – система осевого нагружения)

Для выбора оптимальном методики испытаний была выполнена их экспертная оценка по 10-ти бальной шкале на основании четырех основных параметров, представленным на рисунке 2. С учетом предоставленной информации на основании анализа трудоемкости проведения испытаний и достоверности получаемых данных, было решено за основу принять четвертый метод с некоторыми изменениями системы измерения деформаций.

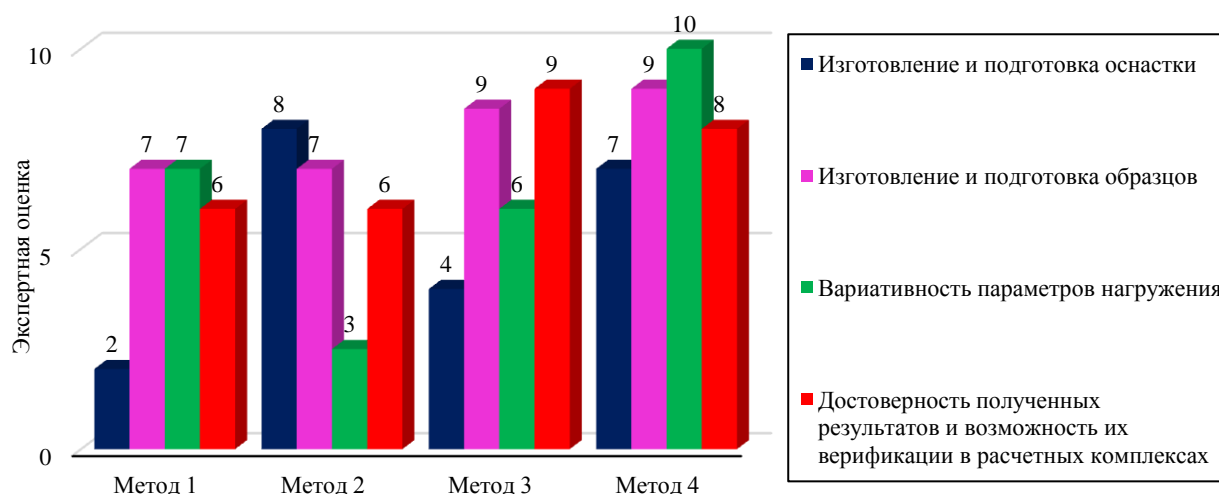


Рис. 2. – Результаты экспертной оценки методов испытаний

Для отработки методики экспериментальных исследований была принята самоуплотняющаяся бетонная смесь, позволяющая получить бетон классом по прочности на сжатие В60, используемый при возведении защитной оболочки АЭС. Испытания проводили на стандартных образцах призмах, размером $100 \times 100 \times 400$ мм. Для измерения деформаций использовали тензорезисторы, укладываемые внутрь бетонных образцов на стадии изготовления. Данный способ измерения деформаций был апробирован ранее [12] и хорошо себя зарекомендовал при проведении лабораторных и натурных испытаний железобетонных конструкций. Тензорезисторы базой 40 мм устанавливали на предварительно подготовленные пластинки толщиной 2 мм, выполненные из эпоксидной смолы и песка с соотношением 1:4. После наклейки тензорезистор сверху покрывали тем же составом для защиты от влаги бетонной смеси. Три пластинки объединяли в объемную тензорозетку с использованием цианакрилатного клея, которую при изготовлении призмы укладывали по направлению главных сжимающих напряжений (рис.3 а). Дополнительно на поверхность каждой грани образца в заранее подготовленные пазы были установлены тензорезисторы в продольном и поперечном направлении (рис.3

б). После установки пазы заделывали эпоксидно-песчаным составом заподлицо. Затем выполняли парафинирование образца и установку резинового чехла, как было принято в стандартной методике. Общий вид образца в установке представлен на рисунке 3 в.

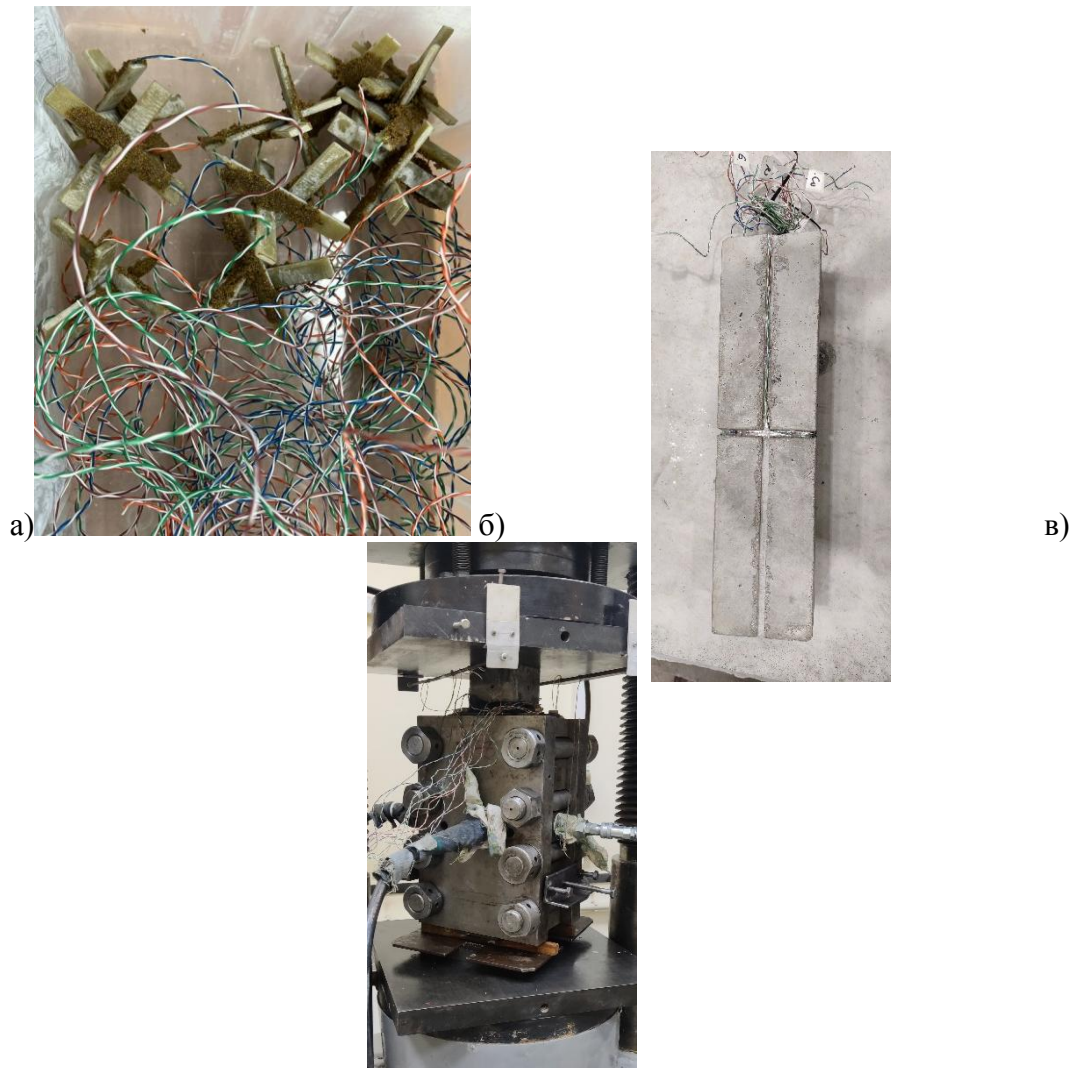


Рис. 3. – Подготовка образца к проведению испытаний

а) объемные тензорозетки; б) установка тензорезисторов; в) общий вид образца при нагружении

Для выбора характеристик испытательного оборудования прогнозируемую прочность бетона при трехосном сжатии при $\sigma_2 = \sigma_3$ можно оценить на основании исследований [4, 8] по формуле:

$$R_{3с} = R_{пр} + \alpha \cdot \sigma_3, \quad (1)$$

где R_{3c} – прочность бетона при трехосном сжатии.

α - эмпирический коэффициент (для первого приближения принимаем приближённо равным 4).

Испытание проводили при величине бокового обжатия $\sigma_2 = \sigma_3 = 15$ МПа. Согласно формуле (1), ожидаемая разрушающая продольная нагрузка при трехосном сжатии будет составлять 121 тс (при значении призмочной прочности 61 МПа).

Нагружение образца производили по следующей методике с учетом требований ГОСТ 24452-80 (Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона). Первоначально создали боковое обжатие интенсивностью 15 МПа. Нагрузку прикладывали поэтапно с шагом 5 МПа с выдержкой на каждом этапе по 3 минуты для регистрации деформаций быстронатекающей ползучести. После достижения требуемой величины бокового обжатия с шагом 10 тс (около 10 МПа), начали увеличивать продольную нагрузку. На каждом шаге также обеспечивали выдержку под нагрузкой в течение 3 минут.

В результате испытаний трех образцов близнецов установлено, что разрушающая продольная нагрузка составляет 115...122 тс, что соответствует $\sigma_1 = 115 \dots 122$ МПа. Разрушение образцов происходило внутри устройства для обжатия и характеризовалось неспособностью образца воспринимать продольную нагрузку - нагрузка снижалась при увеличении скорости подачи масла в поршень цилиндра. При этом в момент разрушения фиксировали кратковременное повышение давления в мембранах установки для обжатия, связанное с увеличением объема бетона в образце в результате трещинообразования. Фактическая разрушающая нагрузка при трехосном нагружении соответствует ожидаемой, полученной по формуле (1).

Результаты измерения продольных и поперечных деформаций, полученных по поверхностным тензорезисторам (п) и глубинным

тензорозеткам (в) представлены на рисунке 4. Установлено, что результаты поперечных деформаций имеют сходимость $\pm 10\%$. Продольные деформации показывают аналогичную сходимость при напряжениях ниже 60 МПа. При более высоком значении напряжения, величины деформаций по внутренним датчикам начинают прирастать значительно интенсивней, чем по поверхностным, что может быть связано с влиянием подготовленных для установки поверхностных тензорезисторов пазов.

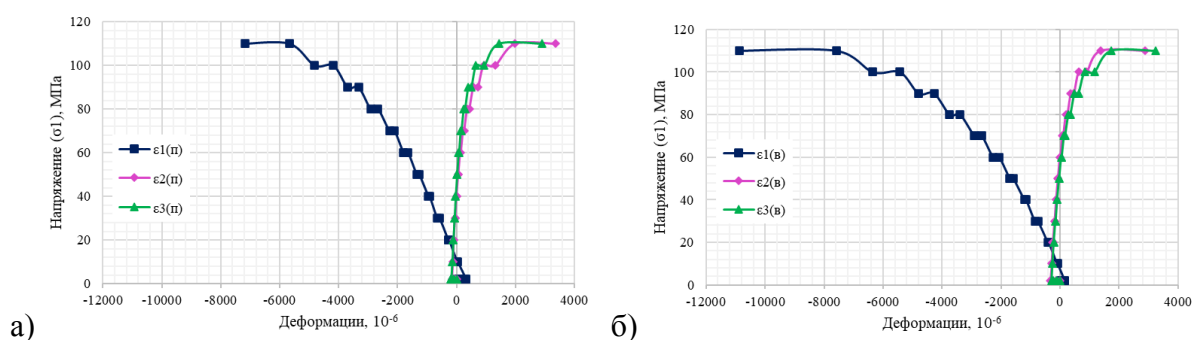


Рис. 4. – Результаты измерения деформаций

а) по поверхностным тензорезисторам; б) по глубинным тензорезисторам

Результаты определения объемных деформаций (θ_v – по глубинным тензодатчикам; θ_n – по поверхностным тензодатчикам) представлены на рисунке 5. Здесь диаграмма θ_n изменяет направление при относительном уровне нагружения 0,9, что свидетельствует о достижении границы трещинообразования, т.е. дилатации материала (в результате образования микротрещин в структуре бетона, его объемные деформации начинают увеличиваться). При этом по глубинным тензорезисторам подобная картина не наблюдается – происходит уменьшение объема материала вплоть до разрушения. Полученные результаты можно объяснить началом трещинообразования бетона с поверхностных слоев, в то время, как ядро бетона остается целым.

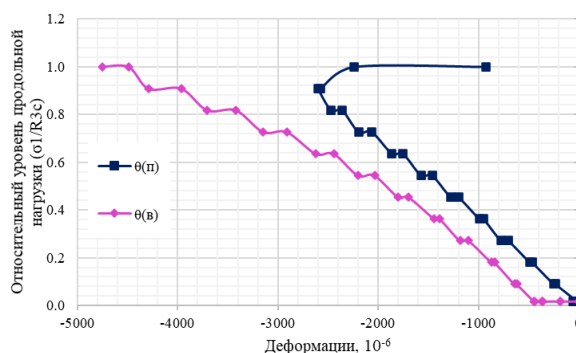


Рис. 5. – Результаты измерения объемных деформаций

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы.

Проделан анализ существующих методов испытания бетонов в режиме объемного нагружения. Установлено, что наиболее оптимальным является метод с использованием установок, обеспечивающих боковое обжатие за счет мембран с маслом (Рис.1). Данная установка позволяет проводить испытания не только при продольном сжатии, но и растяжении, а также при длительно-действующей и динамической нагрузках.

Даны предложения по усовершенствованию способа измерения деформаций при проведении испытаний, когда внутрь бетона при изготовлении образца устанавливают объемные тензорозетки. Для дополнительного контроля деформаций следует также устанавливать тензорезисторы на поверхность образца, защищая их от внешнего воздействия за счет покрытия слоем парафина. В то же время парафин защищает контактные провода тензорезисторов. Устройства пазов для тензорезисторов не рекомендуется, т.к. возникает неоднородное напряженно-деформированное состояние на поверхности образца. При этом измерение деформаций следует проводить в трех сечениях по высоте образца призмы для возможности исследования большего объема материала.

В результате экспериментальных исследований показана эффективность предложенного способа усовершенствования методики испытаний на объемное нагружение. Ожидаемую разрушающую нагрузку

рекомендуется определять по формуле (1). Определение объемных деформаций в процессе проведения исследований позволяет оценить границы трещинообразования. Установлено, что для исследуемого бетона уровень нагрузки, соответствующий первой и второй границам трещинообразования, практически совпадает и равен около 0,9 от прочности при боковом обжатии. Аналогичные результаты получены для данного бетона при испытании одноосной нагрузкой.

Литература

1. Тябликов Б.В. Прочность и деформативность бетона массивных конструкций при одноосном сжатии. Дис. ... канд. технические науки: 05.23.01. - М.: РГБ, 2007. 306с.
2. Малашкин Ю. Н., Безгодов И.М. Оценка предельных состояний бетона при двухосном сжатии // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике «Предельные состояния бетонных и железобетонных конструкций энергетических сооружений» Л.: 1982. С. 183-188.
3. Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии. Методическое пособие. М.: 2019. 137 с
4. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
5. Недорезов А.В. Деформации и прочность железобетонных элементов при сложных режимах объемного напряженного состояния. Дис. ... канд. технические науки: 05.23.01. - Макеевка: РГБ, 2018. 229 с.
6. Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Зейд Килани Л.З. Верификация расчетной модели железобетонных конструкций с комбинированным армированием при работе на осевое сжатие // Инженерный вестник Дона. №12. 2022. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8061

7. Красновский Р.О. Капустин Д.Е., Зейд Килани Л.З. Напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента с несъемной сталефибробетонной опалубкой // Известия вузов. Строительство. 2021. №2. С. 41-51.

8. Безгодов И.М. Критерии длительной прочности и физически нелинейные уравнения деформирования бетона при сложных напряженных состояниях. Бетон и железобетон - пути развития. Научные труды 2-й Всероссийской (международной) конференции по бетону и железобетону. М.:2005. Т.2., С.334-341

9. Жиренков А.Н. Деформирование и прочность обычного тяжелого бетона при сложном напряженном состоянии. Автореферат канд. дис. М.: 2009. 28с.

10. Korsun V. Y. Kalmykov, A. Niedoriezov, A. Korsun. The Influence of the Initial Concrete Strength on its Deformation under Triaxial Compression // Procedia Engineering. 2015. 117. pp. 959-969.

11. Арленинов П. Д., Крылов С.Б., Донов А.В. Экспериментальное моделирование трехосного сжатия бетона при проведении испытаний на ползучесть // Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии: Доклады и выступления. – Санкт-Петербург: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2018. – С. 103-109.

12. Ермаков В.А., Капустин Д.Е., Федоров М.В. Контроль напряженно-деформированного состояния внутри железобетонных конструкций // Журнал "БСТ". №1. 2019. С. 62-64

References

1. Tjablikov B.V. Prochnost' i deformativnost' betona massivnyh konstrukcij pri neodnoosnom szhatii [Strength and deformability of concrete of massive

structures under non-uniaxial compression]. Dis. ... kand. tehicheskie nauki: 05.23.01. M.: RGB, 2007. 306 p.

2. Malashkin Ju. N., Bezgodov I.M. Materialy konferencij i soveshhanij po gidrotehnike «Predel'nye sostojanija betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij jenergeticheskikh sooruzhenij» [Materials of conferences and meetings on hydraulic engineering “Limit states of concrete and reinforced concrete structures of power structures”]. L. 1982. Pp. 183-188.

3. Avtomatizirovannye metody rascheta massivnyh zhelezobetonnyh konstrukcij pri ob#emnom naprjazhennom sostojanii [Automated methods for calculating massive reinforced concrete structures under volumetric stress state]. Metodicheskoe posobie. M.: 2019. 137 p.

4. Karpenko N.I. Obshhie modeli mehaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. M.: Strojizdat, 1996. 416 p.

5. Nedorezov A.V. Deformacii i prochnost' zhelezobetonnyh jelementov pri slozhnyh rezhimah ob#emnogo naprjazhennogo sotsojanija [Deformations and strength of reinforced concrete elements under complex volumetric stress conditions]. Dis. ... kand. tehicheskie nauki: 05.23.01. - Makeevka: RGB, 2018. 229p.

6. Krasnovskij R.O., Kapustin D.E., Zejd Kilani L.Z. Inzhenernyj vestnik Dona 2022. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8061

7. Krasnovskij R.O. Kapustin D.E., Zejd Kilani L.Z. Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. 2021. №2. Pp. 41-51.

8. Bezgodov I.M. Beton i zhelezobeton - puti razvitija. Nauchnye trudy 2-j Vserossijskoj (mezhdunarodnoj) konferencii po betonu i zhelezobetonu [Concrete and reinforced concrete - ways of development. Scientific proceedings of the 2nd All-Russian (international) conference on concrete and reinforced concrete]. M.:2005. T.2., Pp. 334-341



9. Zhirenkov A.N. Deformirovanie i prochnost' obychnogo tjazhelogo betona pri slozhnom naprjazhennom sostojanii [Deformation and strength of ordinary heavy concrete under complex stress state]. Avtoreferat kand. dis. M.: 2009. 28 p.

10. Korsun V. Y., Kalmykov, A., Niedoriezov, A., Korsun. Procedia Engineering. 2015, 117. Pp. 959-969.

11. Arleninov P. D., Krylov S.B., Donovan A.V. Hidrojenergetika. Gidrotehnika. Novye razrabotki i tehnologii: Doklady i vystuplenija. – Sankt-Peterburg: Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut gidrotehniki im. B.E. Vedeneeva [Hydropower. Hydraulic engineering. New developments and technologies: Reports and speeches. St. Petersburg: All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after. B.E. Vedeneeva]. 2018. Pp. 103-109.

12. Ermakov V.A., Kapustin D.E., Fedorov M.V. Zhurnal "BST". №1. 2019. Pp. 62-64.

Дата поступления: 11.11.2023

Дата публикации: 3.01.2024