

## Разработка экспериментальных методов оценки диаграмм деформирования бетона при сжатии

В.А.Рахманов, А.А.Сафонов

Основной целью работы являлась разработка экспериментальных методов оценки полных диаграмм деформирования бетона при сжатии.

В результате проведённых экспериментальных исследований выявлено, что для получения полных диаграмм деформирования бетона с протяжённым участком нисходящей ветви необходимо осуществлять его нагружение с соблюдением определённого режима постоянно затухающей скорости деформирования, при котором на нисходящем участке происходит плавное снижение напряжений на образце.

Разработанная методика экспериментальной оценки диаграмм деформирования позволяет реализовать устойчивое равновесное деформирование опытных образцов на нисходящем участке деформирования и исследовать закономерности влияния различных факторов на основные параметрические точки диаграммы « $\sigma$ – $\epsilon$ ».

*Ключевые слова:* методика испытаний бетона, режимы нагружения, диаграммы деформирования с учётом нисходящей ветви, прочностные и деформационные характеристики бетона.

### Development of Experimental Evaluation Methods for Stress-strain Diagrams of Concrete under Compression.

By V.S.Rahmanov, A.A.Safonov

The main objective of this work was to develop experimental methods for the evaluation of complete diagrams of concrete deformation under compression.

As a result of experimental studies revealed that for a full diagram of deformation of concrete with an extended plot of the descending branch its loading needs to follow a special mode with constantly decaying speed of deformation, in which the descending part is a smooth decrease of exertion on the sample.

The developed technique of experimental estimation of the deformation diagrams allows to implement a stable equilibrium deformation of prototypes on the descending part to the deformation and to investigate the regularities of the influence of different factors on basic parametric point of the diagram " $\sigma$ – $\epsilon$ ".

*Keywords:* methods of testing concrete, the loading modes, the strain diagram considering the descending branch, the strength and deformation characteristics of concrete.

Одной из важнейших задач совершенствования норм проектирования конструкций с целью обеспечения их надёж-

ности является задача создания расчётных моделей, которые позволяют более полно учитывать прочностные и упругопластические характеристики бетона и арматуры. В этой связи приобретает актуальность вопрос описание работы бетона при сжатии и растяжении аналитическими выражениями, максимально близко описывающими физическую нелинейность этого материала.

В свою очередь, для выявления качественных и количественных закономерностей поведения бетона важно экспериментальное исследование природы прочности и деформаций бетона при различных видах напряжённого состояния.

Одной из основных характеристик, дающих интегральную информацию о процессах деформирования и разрушения материала, является диаграмма «напряжение–деформация» (« $\sigma$ – $\epsilon$ »).

В соответствии с положениями норм по проектированию железобетонных конструкций в качестве расчётных диаграмм состояния бетона, определяющих связь между напряжениями и относительными деформациями, могут быть использованы любые виды диаграмм: криволинейные, в том числе с ниспадающей ветвью, кусочно-линейные (двухлинейные и трёхлинейные), отвечающие поведению бетона.

Несмотря на то, что такие диаграммы для бетонов зависят от многих факторов (вида бетона, его состава, степени сцепления между цементным камнем и крупным заполнителем, их деформативных характеристик, скорости нагружения, геометрических параметров опытных образцов и т.д.), общий характер их сохраняется. Следует отметить, что диаграммы, полученные при одноосном сжатии бетонных образцов,

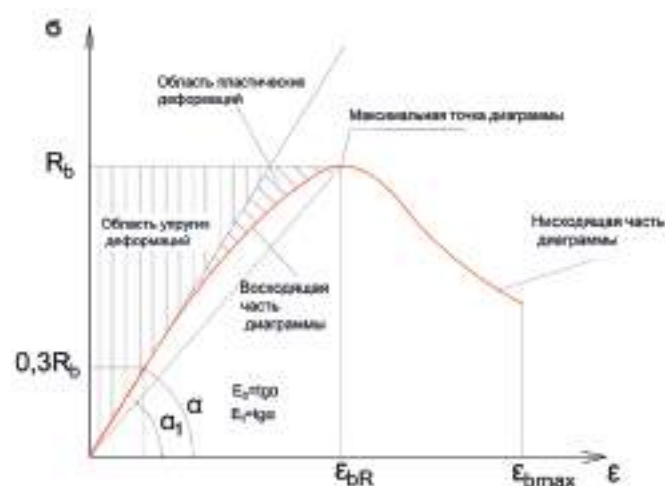


Рис. 1. Диаграмма деформирования « $\sigma$ – $\epsilon$ » бетона при сжатии

близки к форме диаграммы, полученной для сжатой зоны изгибаемых и внецентренно сжатых элементов.

Типичная диаграмма « $\sigma$ – $\varepsilon$ » для бетона при сжатии изображена на рисунке 1.

На диаграмме деформирования « $\sigma$ – $\varepsilon$ » бетона при сжатии можно выделить три основные области:

- 1) область развития упругих деформаций – линейная восходящая ветвь диаграммы (упругая стадия деформирования – уплотнение бетона);
- 2) область развития необратимых пластических деформаций – нелинейная восходящая ветвь диаграммы (упругопластическая стадия деформирования – разуплотнение бетона);
- 3) область неустойчивого развития пластических деформаций – нелинейная ниспадающая ветвь диаграммы (пластическая стадия деформирования бетона до его разрушения).

В первой (начальной) стадии упрочнения возникают упругие деформации и деформации линейной ползучести, при этом сплошность образца не нарушается, структура бетона уплотняется.

При некотором напряжении  $\sigma_{sc}^0 \approx 0,5 \cdot R_b$  в бетоне возникают микротрещины, наступает начало необратимого деформирования. При возрастании напряжений на этой стадии деформирования происходит развитие микротрещин, и начинается процесс разупрочнения бетона. В этой стадии в бетоне начинается процесс интенсивного развития пластических деформаций, связанных с процессами микроразрушений структуры бетона.

После достижения деформациями значений, соответствующих максимальным напряжениям, процесс деформирования перерастает в неустойчивый, сопровождающийся объединением микротрещин в макротрещины до полного разрушения материала.

В настоящее время предложено много аналитических зависимостей для описания диаграммы « $\sigma$ – $\varepsilon$ ». Все они, как правило, носят эмпирический характер и получены либо на основании граничных условий, либо с помощью подбора формул по полученным экспериментальным кривым « $\sigma$ – $\varepsilon$ ». Пределы пригодности эмпирических формул довольно узки, так как характер зависимости « $\sigma$ – $\varepsilon$ » определяется большим количеством различных параметров, в которые входят как технологические факторы, определяющие свойства самого материала, так и факторы, описывающие режим нагружения и геометрические параметры опытных образцов.

В многочисленных научных работах отечественных и зарубежных исследователей имеется большое количество экспериментальных данных, позволяющих достаточно точно описывать восходящую ветвь диаграммы деформирования бетона при сжатии. Вместе с тем представление её ниспадающей части имеет довольно противоречивый характер.

Это объясняется наличием многих факторов, которые влияют на такие диаграммы, а единой методики их экспериментального исследования не предложено, как не предложено и чётко определённых стандартов, регламентирующих

испытания, целью которых являются исследования деформативности бетона.

Проблема заключается в различии экспериментальных данных о деформативности бетона, полученных разными авторами.

Неоднозначная оценка различными авторами предельной деформативности бетона свидетельствует о её сложной зависимости от различных факторов и необходимости поиска методики единой оценки этой величины, которая бы регламентировала испытания, необходимые для получения полных диаграмм деформирования бетона.

Диаграмма деформирования бетона на ниспадающем участке может быть зафиксирована следующими параметрическими точками, соответствующими деформациям  $\varepsilon_{bR}$ ,  $\varepsilon_{bu}$ ,  $\varepsilon_{b \max}$  (рис. 2).

Начальная точка, или вершина нисходящей ветви общей диаграммы « $\sigma_b$ – $\varepsilon_b$ », представлена параметром  $\varepsilon_{bR}$  – предельной деформативностью бетона при осевом сжатии, соответствующей достижению бетоном максимального значения прочности  $R_b$ . Численное значение предельных деформаций  $\varepsilon_{bR}$  зависит от прочности бетона, природы составляющих его компонентов и скорости деформирования и составляет величину  $(1,5–2,5) \cdot 10^{-3}$ .

Конечная точка ниспадающей ветви диаграммы « $\sigma_b$ – $\varepsilon_b$ » фиксируется параметрической точкой  $\varepsilon_{b \max}$  – предельной деформацией, достигающей своего максимума в конце диаграммы « $\sigma_b$ – $\varepsilon_b$ » и соответствующей этой деформации остаточной прочностью бетона  $R_{b \min}$ .

Значения деформаций  $\varepsilon_{b \max}$  можно получать в экспериментах с заданным режимом деформирования образца, при этом скорость деформирования образца на участке ниспадающей ветви должна быть затухающей, что обеспечит его разгрузку и большую протяженность нисходящего участка.

Следует учитывать тот факт, что развитие деформаций бетона при его загрузке и форма диаграммы « $\sigma_b$ – $\varepsilon_b$ » существенно зависят от того, сохраняется или не сохраняется постоянной в экспериментах скорость деформирования.



Рис. 2. Основные параметрические точки диаграммы деформирования « $\sigma$ – $\varepsilon$ » бетона при сжатии

В случае, если скорость деформирования образца сохраняется постоянной или на ниспадающем участке деформирования является затухающей, наблюдается нисходящий участок диаграммы, в пределах которого нарастание деформаций сопровождается падением величины напряжений.

В случае, если испытания проводятся при постоянной скорости нагружения (напряжений), с начала участка развития пластических деформаций в бетоне происходит снижение отпорности бетонного образца, в результате чего для обеспечения постоянной скорости роста напряжений скорость его деформирования возрастает, а после достижения в бетоне максимальных напряжений, особенно для высокопрочных бетонов, стремится к бесконечности, в результате чего происходит одномоментное разрушение опытного образца, и нисходящий участок диаграммы зафиксировать, как правило, не удаётся.

Изменяя режим загрузки опытного образца и поддерживая постоянной или затухающей скоростью его деформирования на участке после достижения максимальных напряжений, можно зафиксировать на кривых « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » нисходящие участки разной протяжённости. При реализации режима нагружения с затухающей скоростью деформирования происходит замедление процесса разрушения бетонного образца, что даёт возможность фиксировать в эксперименте нисходящий участок. Чем меньше скорость деформирования образца после достижения максимальных напряжений в бетоне, тем в большей степени замедляется скорость разрушения и тем большую деформацию  $\varepsilon_{bV \max}$  и меньшее значение напряжения  $R_{b, \min}$  удаётся замерить при испытаниях.

Одной из причин, сдерживающих разработку такой расчётной модели, является отсутствие достоверной методики экспериментальной оценки деформативных свойств бетона, а также достоверных экспериментальных данных о полной диаграмме деформирования бетона, которая является основой деформационной модели расчёта.

При разработке метода получения экспериментальных полных диаграмм деформирования бетона ставилась задача реализовать автоматическое регулирование и поддержание скорости деформирования исследуемого образца, обеспечивая её довольно низкое значение в условиях работы на участке нисходящей ветви диаграммы.

Естественно предположить, что для одинаковых исходных параметров, технологических и физических характеристик материалов, а также при одинаковых условиях испытаний полные диаграммы деформирования бетона должны иметь ярко выраженный идентичный характер.

Анализируя вопросы, связанные с исследованием влияния скорости нагрузки на сопротивление и деформацию бетона исследуемых образцов, необходимо отметить следующее. При увеличении такой скорости можно получать большие значения предельного сопротивления бетона на сжатие. При этом значения критических деформаций  $\varepsilon_{bR}$ , которые отвечают такому сопротивлению для избранной в эксперименте скорости

нагрузки, также будут отличаться. Отмеченные особенности силового деформирования объясняют разный характер диаграмм состояния, полученных в разных экспериментах для одинакового бетона.

При разработке метода получения экспериментальных полных диаграмм деформирования бетона ставилась задача реализовать автоматическое регулирование и поддержание скорости деформирования исследуемого образца, обеспечивая её довольно низкое значение в условиях работы на участке нисходящей ветви диаграммы.

Для реализации усовершенствованной методики исследования физико-механических свойств бетона использовалась сервогидравлическая испытательная система «ШЕНК» с высокоскоростной обратной связью по каналу управления режимом нагружения:

- по нагрузке;
- по деформированию (перемещению активной опоры);
- по деформациям.

Принципиальная схема использованных при проведении испытаний испытательной и измерительной систем представлена на рисунке 3.

За основу был принят режим испытания образца с заданной скоростью перемещения активной опоры по синусоидальному закону  $S(t) = 2,4 \cdot \sin 5 \cdot 10^{-4} \cdot \pi$  (рисунок 3), составляющей на начальном этапе деформации 0,01 мм/с и затухающей до нулевого значения через 1000 с при общем перемещении активной опоры (укорочении образца) на 2,4 мм (с реализацией общей интегральной деформации об-

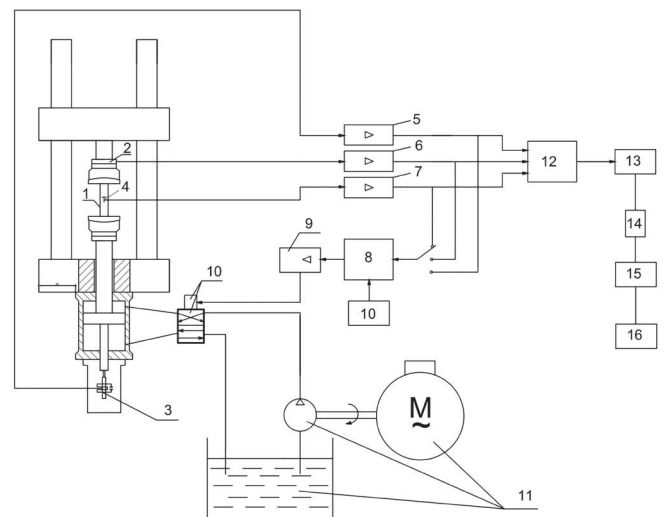


Рис. 3. Принципиальная блок-схема сервогидравлической испытательной и измерительной системы: 1 – опытный образец; 2 – датчик силы; 3 – датчик перемещения; 4 – датчик деформаций; 5 – усилитель канала перемещения; 6 – усилитель канала силы; 7 – усилитель канала деформаций; 8 – селектор обратной связи; 9 – усилитель; 10 – генератор формы сигнала; 11 – насосная станция; 12 – согласующий усилитель; 13 – интерфейс с АЦП и ЦАП; 14 – интерфейс связи; 15 – персональный компьютер; 16 – печатающий терминал

разца высотой 400 мм  $\varepsilon = 6 \cdot 10^{-3}$ ), что позволяет реализовать возможность получения стабильной и довольно длинной нисходящей ветви диаграммы деформирования, а также всесторонне исследовать её свойства в зависимости от разных параметров.

Реализация указанного выше режима испытания обеспечивалась задачей одного цикла синусоидальной кривой с периодом колебания 4000 сек (частота цикла 0,00025 Гц) в режиме управления перемещением активной опоры испытательной системы.

Стойкое деформирование исследуемого образца на нисходящем участке диаграммы состояния определяется характеристикой высокой общей жёсткости испытательной системы и высокоскоростной обратной связью по параметру управления процессом деформирования, что обеспечивает равновесный режим деформирования образца в закритической области диаграммы на ниспадающем участке.

При таком режиме силового нагружения опытный образец после достижения максимальных напряжений начинает разгружаться в границах его деформирования на участке нисходящей части диаграммы деформирования.

В этом случае, при условии достижения предельных напряжений в бетонном образце при сжатии, когда он не может воспринимать дальнейшего увеличения нагрузки, из-за снижения скорости перемещения активной опоры в опытном образце не происходит интенсивного неконтролируемого увеличения силовых деформаций и лавиноподобного нарастания скорости деформирования.

В наших опытах получение диаграмм деформирования бетона при статическом нагружении опытных образцов проводили:

- в режиме управления нагрузкой (мягкий режим)  $\dot{P} = \text{const}$ . При испытаниях в этом режиме статическая скорость нагружения опытного образца составляла  $\dot{\sigma} \approx 0,3 \text{ МПа/с}$ . Длительность испытания до разрушения образцов составляла приблизительно 100 сек;

- в режиме управления перемещением активной опоры (жёсткий режим)  $\dot{S} = \text{const}$ .

При испытаниях в этом режиме статическая скорость перемещения активной опоры составляла  $\dot{S} \approx 0,01 \text{ мм/с}$ , что соответствовало скорости деформаций опытного образца  $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . Длительность испытания до разрушения образцов

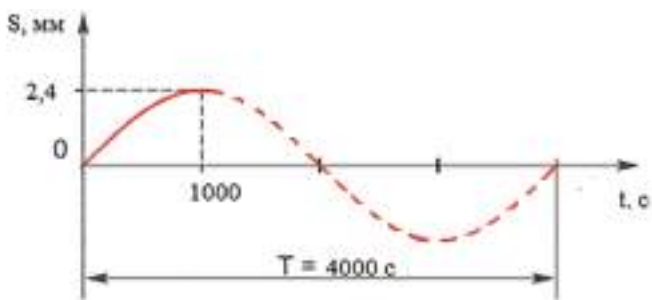


Рис. 4. Режим испытания образца с заданной скоростью перемещения активной опоры

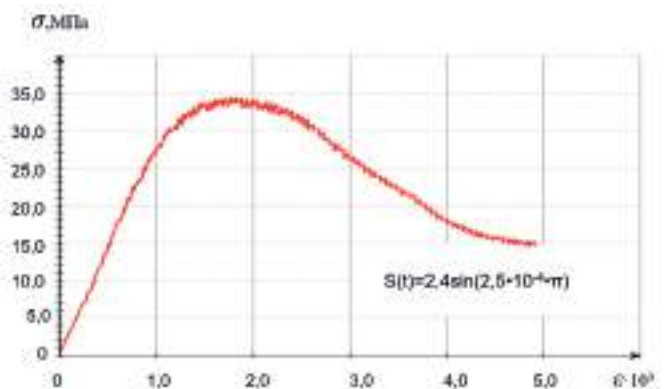
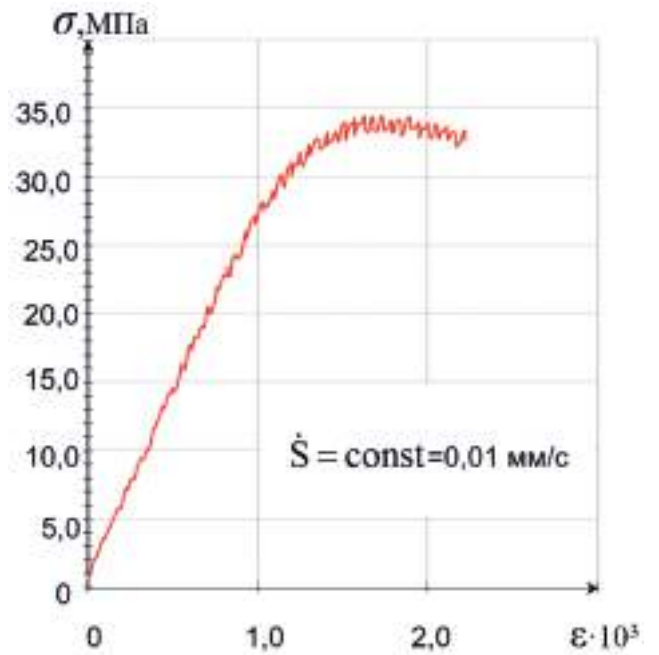
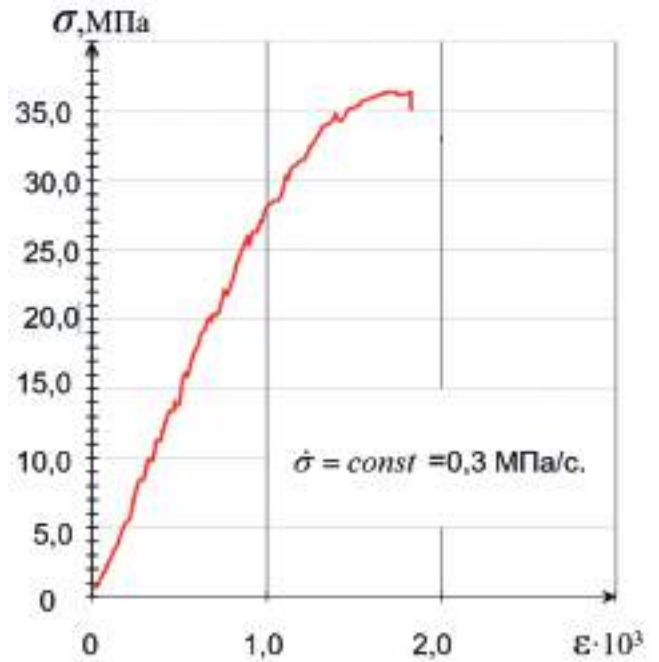


Рис. 5. Характерные диаграммы деформирования тяжелого бетон В30 при различных режимах нагружения



в этом режиме составляла не менее 100 сек., а скорость роста напряжений на восходящем участке диаграммы до уровня напряжений  $\sigma = 0,8 \cdot R_{np}$  соответствовала скорости роста напряжений  $\dot{\sigma} \approx 0,3$  МПа/с;

– в режиме управления перемещением активной опоры (жёсткий режим) с постоянно затухающей скоростью перемещения активной опоры по синусоидальному закону  $S(t) = 2,4 \sin(5 \cdot 10^{-4} \cdot \pi)$ , составляющей на начальном этапе нагружения 0,01 мм/с и затухающей до нулевого значения через 1000 с при общем перемещении (укорочении образца) 2,4 мм соответствующей интегральной деформации образца высотой 400 мм  $\varepsilon = 0,006$ .

#### Выводы

1. Результаты проведённых испытаний по экспериментальной оценке диаграмм деформирования бетона при различных режимах статического сжатия опытных образцов показывают, что «жёсткий» режим деформирования образцов позволяет получить диаграммы деформирования, которые более корректно отвечают работе бетона в изгибаемых и внецентренно сжатых конструкциях в предельной стадии, близкой к разрушению, соответственно более полно учитывают изменение механических свойств при переходе от стадии эксплуатации, когда бетон сохраняет свою первоначальную микро- и макроструктуру, к стадии разрушения, когда эта структура в значительной степени изменяется.

2. Испытания в «жёстком» режиме с постоянной скоростью деформирования  $\dot{S} = \text{const} = 0,01$  мм/с, что следует из оценки характеристики как площади под диаграммой деформирования « $\sigma - \varepsilon$ », так и аналогичной ей диаграммы «нагрузка  $P$  – укорочение  $\Delta L$ », которая характеризует энергоёмкость процесса деформирования (разрушения) образца

$W = \int_0^{\Delta L} P(\Delta L) d(\Delta L)$ , позволяют зарегистрировать значение этого показателя в среднем на 47%, а при «жёстком» режиме с затухающей скоростью деформирования по синусоидальному закону – на 74% выше, чем при испытаниях в «мягком» режиме с постоянной скоростью нагружения  $\dot{\sigma} = \text{const} = 0,3$  МПа/с.

3. На восходящем участке диаграмм деформирования поведение образцов практически идентично и не зависит от условий нагружения. Некоторые отличия в поведении отдельных образцов практически не значимы и носят случайный характер.

4. На нисходящем участке диаграмм сопротивление бетона существенно зависит от режима нагружения, причём при переменном режиме и падающей скорости деформирования этот эффект будет больше.

5. Максимальный эффект влияния снижения скорости деформирования в зоне разрушения материала образца проявляется при зеркальном подобию кривых изменения скорости деформирования и сопротивления бетона сжатию.

6. Оценивать деформации и управлять режимом жёсткого деформирования при сжатии образца целесообразно по датчику перемещения активной опоры пресса.

7. Статические и динамические испытания рекомендуется проверить с использованием вычислительного комплекса в широком диапазоне статических и динамических воздействий: при мягком режиме  $\sigma(t) = \text{const}$ ; жёстком режиме  $S(t) = \text{const}$ ; режиме деформирования с затухающей скоростью деформирования по синусоидальному закону  $S(t) = 2,4 \sin(2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \pi)$  и динамическому режиму гидравлического удара в испытательной системе  $S(t) \approx 220$  мм/с на линейном участке максимальной скорости смещения активной опоры при сжатии образца.

#### Литература

1. Бондаренко, В.М. Квазилинейные уравнения силового сопротивления и диаграмма  $\sigma - \varepsilon$  бетона / В.М. Бондаренко, В.И. Римшин // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2014. – № 6. – С. 40–44.

2. Безгодов, И.М. К вопросу о методике получения полных диаграмм деформирования бетона / И.М. Безгодов, П.Ю. Левченко // Технологии бетонов. – 2013. – № 10 (87). – С. 34–36.

3. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1966.

4. Рахманов, В.А. Рекомендации по методу динамических испытаний бетона / В.А. Рахманов, Е.Л. Розовский и др. – М.: Минстройматериалов СССР, 1985.

5. Рахманов, В.А. Влияние динамического воздействия на прочностные и деформативные свойства тяжелого бетона / В.А. Рахманов, Е.Л. Розовский, И.А. Цупков // Бетон и железобетон. – 1987. – № 7.

6. СП 63.13330.2012. «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с изменением).

7. Frame composites based on soluble glass / V.T. Erofeev, E.V. Zavalishin, V.I. Rimshin et.al // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Т.7. – № 3. – P. 2506–2517.

8. Changes in the topology of a concrete porous space in interactions with the external medium / Y.M. Bazhenov, V.T. Erofeev, V.I. Rimshin, et.al // Engineering Solid Mechanics. 2016. – № 4. – P. 219–225.

9. The energy integrity resistance to the destruction of the long-term strength concrete / A. Krishan, V. Rimshin, S. Markov, et.al // Procedia Engineering 1. – 2015. – P. 211–217.

10. Рахманов, В.А. Изменение прочности при внезапном приложении нагрузки / Рахманов В.А., Тябликов Ю.Е. // Заводская лаборатория. – 1970. – № 10.

11. Рахманов, В.А. Поведение бетона при двух циклах повторно-статического сжатия / В.А. Рахманов // Сборник докладов Всесоюзного совещания «Повышение надежности гидротехнических сооружений при динамических воздействиях». – М. 1976.

12. Рекомендации по методу динамических испытаний бетона / В.А. Рахманов, Е.Л. Розовский и др. – М.: Минстройматериалов СССР, 1985.

13. Особенности динамического деформирования мелкозернистого сталефибробетона / В.А. Рахманов, Е.Л. Розовский, И.А. Цупков, А.А. Сафонов // Сб. по материалам республиканского научно-технического совещания «Совершенствование технологии изготовления, методов расчета и свойств фибробетонных конструкций». – Рига, 1988.

14. Рахманов, В.А. Влияние динамического воздействия на прочностные и деформативные свойства тяжелого бетона / В.А. Рахманов, Е.Л. Розовский, И.А. Цупков // Бетон и железобетон. – 1987. – № 7. – С. 19–20.

15. Рахманов, В.А. Учёт прочности и деформативности бетона при расчете железобетонных конструкций на действие динамических нагрузок высокой интенсивности. Совершенствование заводской технологии сборного железобетона / В.А. Рахманов, Е.Л. Розовский, И.А. Цупков // Сб. трудов ВНИИжелезобетона. – М., 1983.

#### Literatura

1. Bondarenko V.M. Kvazilinejnye uravneniya silovogo soprotivleniya i diagramma  $\sigma$ – $\varepsilon$  бетона / V.M. Bondarenko, V.I. Rimshin // Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstruksij i sooruzhenij. – 2014. – № 6. – С. 40–44.

2. Bezgodov I.M. K voprosu o metodike polucheniya polnyh diagramm deformirovaniya бетона / I.M. Bezgodov, P.Yu. Levchenko // Tehnologii betonov. – 2013. – № 10 (87). – С. 34–36.

3. Karpenko N.I. Obshhie modeli mehaniki zhelezobetona / N.I. Karpenko. – М.: Strojizdat, 1966.

4. Rahmanov V.A. Rekomendatsii po metodu dinamicheskikh ispytaniy бетона / V.A. Rahmanov, E.L. Rozovskij i dr. – М.: Ministroymaterialov SSSR, 1985.

5. Rahmanov V.A. Vliyanie dinamicheskogo vozdejstviya na prochnostnye i deformativnye svojstva tyazhelogo бетона / V.A. Rahmanov, E.L. Rozovskij, I.A. Tsupkov // Beton i zhelezobeton. – 1987. – № 7.

6. SP 63.13330.2012. «Betonnnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya». Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01-2003 (s izmeneniyem).

10. Rahmanov V.A. Izmenenie prochnosti pri vnezapnom prilozhenii nagruzki / Rahmanov V.A., Tyablikov Yu.E. // Zavodskayalaboratoriya. – 1970. – № 10.

11. Rahmanov V.A. Povedenie бетона pri dvuh tsiklah povtorno-staticheskogo szhatiya / V.A. Rahmanov // Sbornik dokladov Vsesoyuznogo soveshaniya «Povyshenie nadezhnosti gidrotehnicheskikh sooruzhenij pri dinamicheskikh vozdejstviyah». – М. 1976.

12. Rekomendatsii po metodu dinamicheskikh ispytaniy бетона / V.A. Rahmanov, E.L. Rozovskij i dr. – М.: Ministroymaterialov SSSR, 1985.

13. Osobennosti dinamicheskogo deformirovaniya melkozernistogo stalefibrobetona / V.A. Rahmanov, E.L. Rozovskij, I.A. Tsupkov, A.A. Safonov // Sb. po materialam respublikanskogo nauchno-tehnicheskogo soveshaniya «Sovershenstvovanie tehnologii izgotovleniya, metodov rascheta i svojstv fibrobetonnykh konstruksij». – Riga, 1988.

14. Rahmanov V.A. Vliyanie dinamicheskogo vozdejstviya na prochnostnye i deformativnye svojstva tyazhelogo бетона / V.A. Rahmanov, E.L. Rozovskij, I.A. Tsupkov // Beton i zhelezobeton. – 1987. – № 7. – С. 19–20.

15. Rahmanov V.A. Uchet prochnosti i deformativnosti бетона pri raschete zhelezobetonnykh konstruksij na dejstvie dinamicheskikh nagruzok vysokoj intensivnosti. Sovershenstvovanie zavodskoj tehnologii sbornogo zhelezobetona / V.A. Rahmanov, E.L. Rozovskij, I.A. Tsupkov // Sb.trudov VNIIZhelezobetona. – М., 1983.