

## НАТУРНОЕ ИСПЫТАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ – ШАГ К ПОВЫШЕНИЮ ДЕФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ\*



Г.Н. Гусев,  
*Институт механики сплошных  
сред УрО РАН*



В.П. Матвеевко,  
*Институт механики сплошных  
сред УрО РАН*



Р.В. Цветков,  
*Институт механики сплошных  
сред УрО РАН*



И.Н. Шардаков,  
*Институт механики сплошных  
сред УрО РАН*



А.П. Шестаков,  
*Институт механики сплошных  
сред УрО РАН*

Рассмотрены основные принципы создания экспериментального стенда, позволяющего зафиксировать предкритические и критические процессы в конструкции. Разработана модель, описывающая особенности деформационного поведения железобетонной конструкции в начальной стадии накопления повреждений. Представлены результаты моделирования для элементов железобетонной конструкции в масштабе 1:2. Определены необходимые параметры экспериментального стенда и условия работы нагружающих устройств. Приведена схема создаваемого экспериментального стенда.

**Ключевые слова:** деформационный мониторинг, математическая модель, экспериментальный стенд, железобетон, предкритическое состояние.

Проектирование и создание современных амбициозных строительных и инженерных сооружений обуславливает особую актуальность безопасности их экс-

плуатации. Их разрушение может приводить к гигантским материальным потерям, а иногда и человеческим жертвам.

Процесс разрушения строительного со-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-29-00172).

оружения начинается с образования и накопления дефектов. Первоначально их появление, как правило, не приводит к разрушению сооружения, но является его предвестником. Поэтому необходимо осуществлять контроль развития дефектов во времени. Традиционные методы наблюдения за повреждениями включают непосредственный визуальный осмотр с выявлением видимых дефектов и измерением размеров повреждений. В настоящее время появляются новые методики обследования сооружений и конструкций [1–3]. Следует отметить работы Е. Арендарского, Х.А. Асанбекова, В.А. Лисенко, Э. Грунау и других, посвященные долговечности сооружений [4–6] и описанию методик, способных предсказать наступление разрушения [7, 8]. Самым современным подходом, позволяющим контролировать состояние конструкций и сооружений, является использование интеллектуальных автоматизированных систем деформационного мониторинга [9–14]. Эти системы должны не только осуществлять регистрацию деформационных параметров, но и прогнозировать время и место реализации критического состояния в том или ином элементе конструкции.

Основным материалом для строительных конструкций является бетон. В работе [15] исследуется разрушение бетонных оболочек при динамическом воздействии и вероятностном распределении физико-механических характеристик материала. Анализ деформационных процессов при критическом состоянии бетона посвящены работы [16, 17], в которых моделируется распространение трещин. В [18] применяется энергетический подход к анализу распространения трещин. Процесс регистрации трещинообразования методами акустической эмиссии рассмотрен в [19]. В [20] предложен подход, позволяющий давать оценку остаточного ресурса конструкции. Конечно-элементное моделирование развития и распространения трещин в стержневых конструкциях из железобетона рассматривается в работах Z.J. Yang и др. [21, 22]. Модель разрушения бетона,

предложенная K.J. Willam, E.D. Warnke [23], была использована для численной реализации в работе [24]. В [25] выведены основные соотношения и даются примеры расчета строительных стержневых конструкций из железобетона.

В настоящее время имеются единичные исследования, выполняемые на экспериментальных стендах, моделирующих особенности деформационного поведения отдельных элементов инженерных и строительных сооружений. Так, в работе А.В. Кухты [26] описываются стенды, моделирующие поведение плитного железобетонного фундамента и каркаса здания. В работе А.А. Карякина и др. [27] приведены результаты испытаний натурального фрагмента сборно-монолитного каркасного сооружения. Фрагмент каркаса состоял из двух типичных ячеек конструкции, что явно недостаточно для исследования деформационной картины сооружения в целом.

Однако до сих пор остается малоизученным как с точки зрения фундаментальной, так и прикладной науки вопрос о закономерностях деформационного поведения ансамбля элементов строительной или инженерной конструкции, передающего не только свойства отдельных элементов, но и многообразие механизмов их взаимодействия. Особенно важными становятся эти вопросы в условиях перехода конструкции от предкритического состояния к критическому.

Актуальной задачей является также изучение пространственно-временного распределения деформационного отклика несущих элементов конструкции на возникновение критического состояния в отдельных ее частях. Следует отметить, что особый интерес представляет решение указанных проблемных задач с привязкой к реальным масштабам исследуемых объектов.

Решение данных фундаментальных задач дает подходы к разработке современных систем деформационного мониторинга, усиливая такое важное их качество, как оценка времени, оставшегося до наступления критического состояния в каком-либо элементе конструкции.

В 2014 г. Российский научный фонд провел один из крупнейших конкурсов научных проектов. О престижности этого конкурса можно судить по его результатам: из 1 855 заявок поддержан 161 проект. Один из них – проект Института механики сплошных сред УрО РАН «Экспериментально-теоретические исследования закономерностей деформационного поведения элементов строительных и инженерных конструкций в условиях перехода к критическим состояниям» (руководитель проекта д.ф.-м.н., профессор И.Н. Шардаков). Реализация этого проекта позволит разработать и создать уникальный испытательный центр, предназначенный для исследования закономерностей деформационных процессов в разнообразных конструкциях, приближенных по масштабу и свойствам к реальным. Отличительной особенностью такого подхода является то, что испытываемый модельный объект будет представлять собой совокупность «типовых ячеек» объекта-прототипа, которая сохраняет ансамблевые деформационные свойства исходной конструкции. Такой ячейкой, например, может быть фрагмент железобетонного каркасного сооружения, размеры которого определяются расстоянием между опорными колоннами в пределах одного этажа. Создаваемый центр является уникальным инструментом, позволяющим изучать свойства не только строительных сооружений, но и разнообразных сложных металлических конструкций. По своему масштабу, свойствам, универсальности и современности оснащения такой испытательный центр не имеет аналогов в России.

Работа над созданием центра требует решения ряда важных задач.

**Первая задача** заключается в разработке математических моделей, характеризующих деформационные процессы в элементах испытываемой конструкции. На основе численных экспериментов с указанными моделями будут разработаны принципиальные схемы экспериментальных стендов, с помощью которых планируется изучать деформационное поведение

реальных конструкций. Результаты численных экспериментов позволят выделить деформационные параметры, пригодные для регистрации в эксперименте, установить диапазоны и точность измерений, назначить частотность измерений во времени и выбрать рациональную локализацию точек измерения по элементам конструкции с целью наиболее точного описания пространственно-временного распределения предвестников критического состояния по элементам.

**Вторая задача** состоит в разработке и создании экспериментального стенда. Решение этой задачи в значительной степени опирается на результаты проведенных численных экспериментов. Испытательный стенд будет оснащен специальными нагружающими устройствами, системами датчиков, регистрирующих деформационные параметры, средствами сбора экспериментальных данных и их математической обработки и анализа. Испытания на экспериментальном стенде дадут возможность наблюдать изменение состояния конструкции под действием нагрузок, появление и накопление дефектов в ней и даже ее разрушение.

В этих исследованиях наиболее интересным и значимым является этап, предшествующий разрушению конструкции. На этом этапе можно наблюдать появление симптомов, свидетельствующих о приближении разрушения материала конструкции. Именно на этом этапе можно получить информацию, способную значительно обогатить разрабатываемые системы мониторинга. Основываясь на этих результатах, можно существенно повысить надежность предсказания интервала безопасной эксплуатации реальных сооружений и конструкций.

**Третья задача** заключается в разработке математической модели деформационных процессов в исследуемой конструкции во взаимодействии ее с экспериментальным стендом. Она в значительной степени опирается на разработанную при проектировании стенда математическую модель конструкции и должна отражать

все многообразие реализующихся в ней деформационных процессов, а также иметь возможность адаптироваться для описания эволюции напряженно-деформированного состояния элементов конструкции, в особенности в моменты, предшествующие ее разрушению. Кроме того, она необходима для интерпретации результатов натурных экспериментов на стенде.

**Четвертая задача** состоит в разработке и создании модельного варианта автоматизированной системы деформационного мониторинга на основе созданного экспериментального стенда. При решении этой задачи должны быть разработаны конкретные структурные схемы автоматизированной системы мониторинга, определены ее основные блоки и описано их функциональное взаимодействие. На стенде, оснащем автоматизированной системой мониторинга, будут воспроизведены различные сценарии реализации предкритических и критических состояний

элементов конструкции. На основе этих экспериментов («установочных») будут получены функциональные зависимости измеряемых деформационных параметров в любой точке конструкции от времени. Далее полученные зависимости будут использованы в аналитическом блоке системы мониторинга. На последующих этапах эксперимента («проверочных») будет протестирована способность системы мониторинга осуществлять предсказание возможности развития критической ситуации в элементах исследуемой конструкции по оценке появления предвестников критического состояния в точках конструкции, оснащенных датчиками.

В настоящее время в Институте механики сплошных сред ведутся работы над первыми двумя задачами. Разработана математическая модель сборно-монолитной конструкции из железобетона, которая является уменьшенной вдвое копией реально существующего объекта (рис. 1).

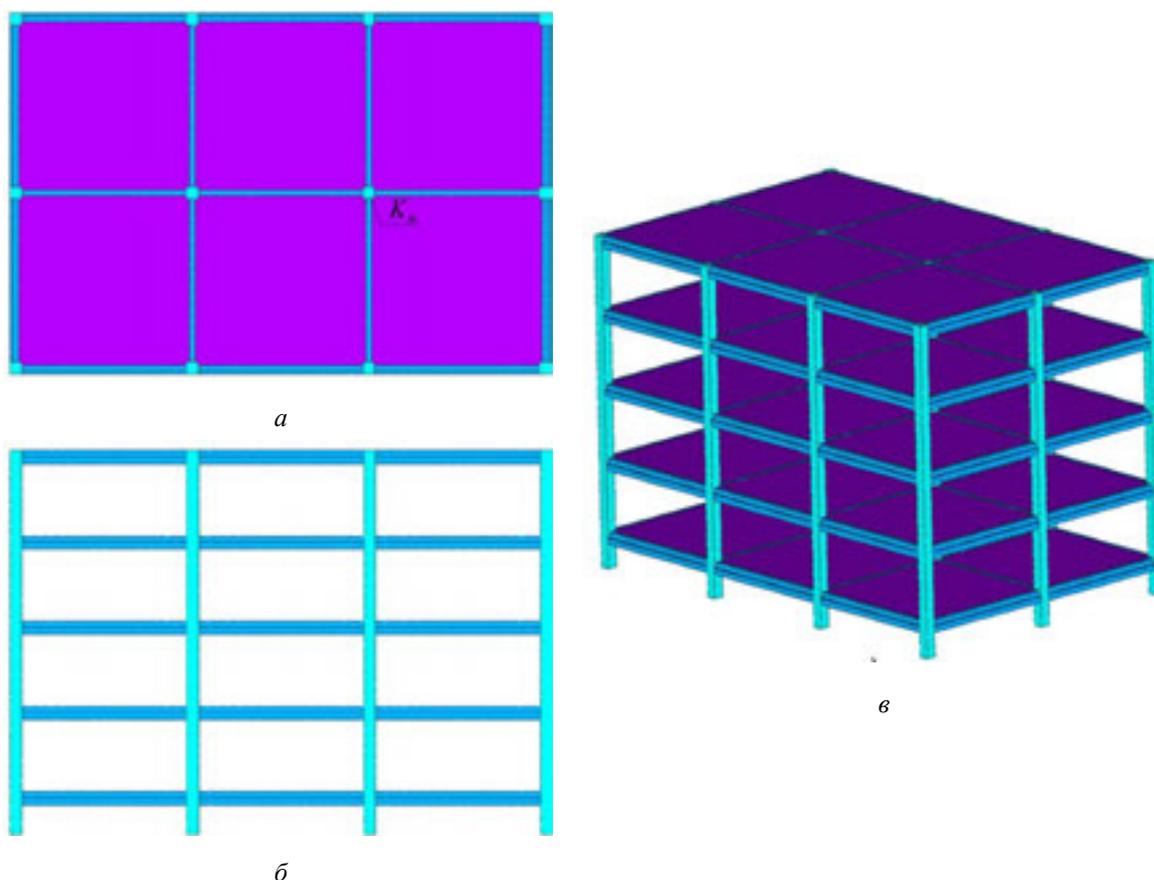


Рис. 1. Модель сборно-монолитной конструкции: а – вид сверху; б – вид сбоку; в – пространственный вид;  $K_n$  – колонна, моделирующая вертикальное смещение

Модельный объект включает в себя 24 типичных ячейки конструкции, объединенные в 4 этажа. Общая высота сооружения – 6 м, длина 9 м, и ширина 6 м. Выбранный масштаб позволяет удобно разместить модель на экспериментальном стенде.

Для определения нагрузок, способных разрушить здание, выполнен численный эксперимент, моделирующий нагружение конструкции за счет вертикального перемещения одной из опорных колонн.

На рис. 2, а представлено поле вертикальных перемещений элементов конструкции, спровоцированных вертикальным

смещением колонны  $K_u$  (рис. 1, а). Для наглядности картины перемещения увеличены в 50 раз. Получена зависимость усилий, возникающих в колонне  $K_u$ , от величины ее вертикального смещения (рис. 2, б). На основе этой зависимости выделены ключевые точки в процессе деформирования конструкции вплоть до ее разрушения:  $T_1$  ( $F = 147$  кН,  $U = 0$  мм) – конструкция нагружена собственным весом, перемещения колонны отсутствуют;  $T_2$  ( $F = 260$  кН,  $U = 0,5$  мм) – появление в конструкции первых трещин, локализующихся в растянутой зоне ригелей;

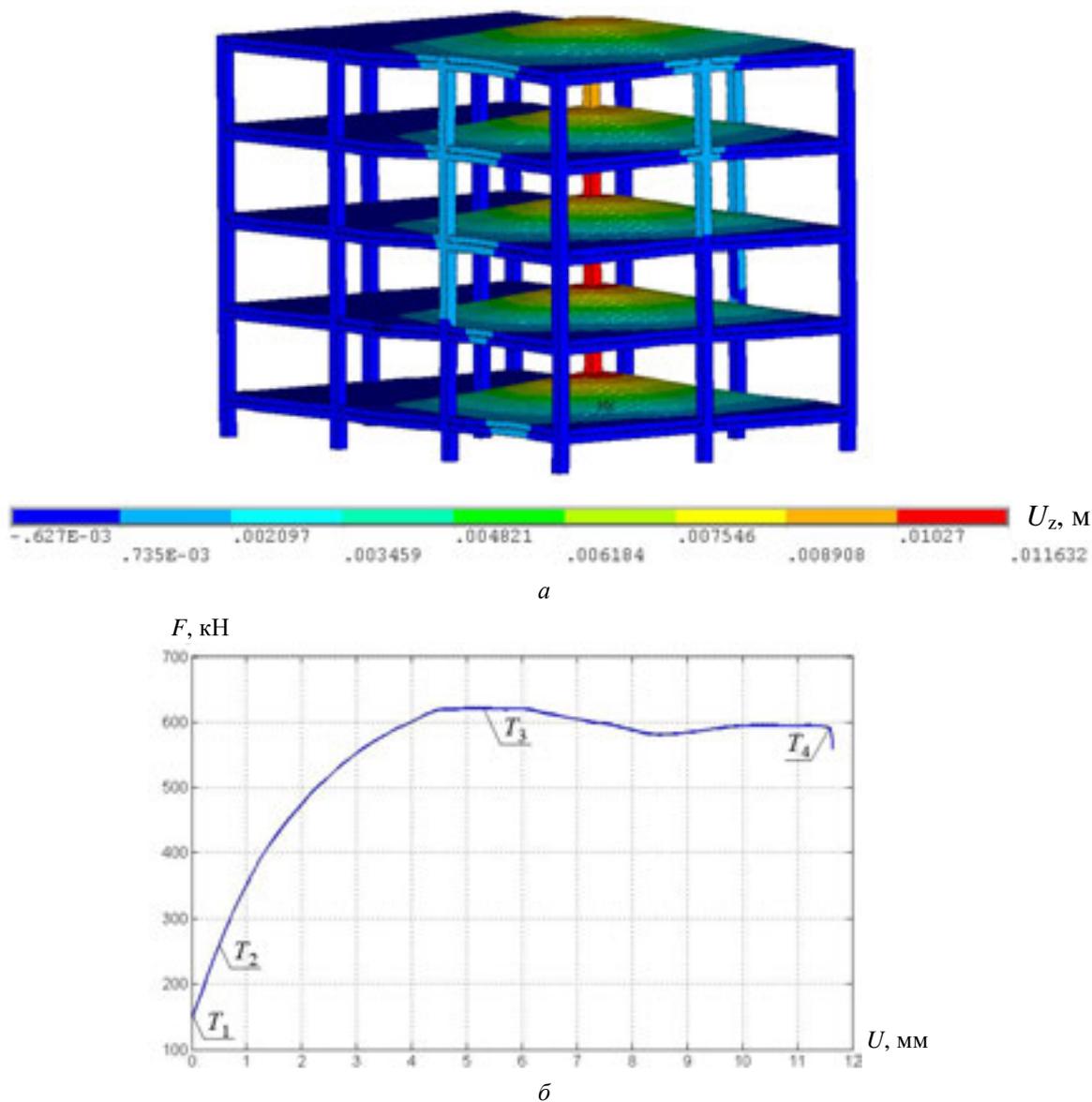


Рис. 2. Результаты моделирования: а – поле вертикальных перемещений; б – усилия, реализующиеся в колонне в зависимости от приложенных перемещений (точками  $T_i$  обозначены ключевые состояния конструкции)

$T_3$  ( $F = 621$  кН,  $U = 5,2$  мм) – появление трещин в плитах перекрытий, что соответствует реализации максимальных усилий в колонне;  $T_4$  ( $F = 590$  кН,  $U = 11,6$  мм) – разрушение сжатой зоны ригелей. Проведенные расчеты позволили определить основные характеристики нагружающего устройства, которое будет использоваться для испытаний модельной конструкции на экспериментальном стенде: для того чтобы гарантированно выполнить разрушение, необходимо предусмотреть диапазон усилий нескольких сотен тонн; в то же время для выполнения контролируемого перехода конструкций из упругого состояния в стадию разрушения должна быть обеспечена точность задания перемещений не ниже 0,1 мм.

Масштабность исследуемого объекта и испытательных нагрузок предъявляет особые требования к прочности и жесткости элементов создаваемого испытательного стенда. Проведенные расчеты позволили выбрать характерные размеры и материалы конструкции испытательного стенда.

Экспериментальный стенд представляет собой металлическую рамную конст-

рукцию на железобетонном основании с размерами в плане 12×8 м (рис. 3). Основными несущими элементами являются четыре силовых контура, выполненные из прокатного профиля и объединенные горизонтальными и вертикальными связями. Нижние части силовых контуров объединены двухуровневой опорной рамой, замкнутой в железобетонное основание толщиной 3 м. На рис. 4 показан внешний вид экспериментального стенда, внутри которого размещена модельная конструкция в масштабе 1:2.

После создания экспериментального стенда и проведения натурных испытаний будут установлены закономерности деформационного поведения элементов строительных конструкций в условиях перехода от предкритических состояний к критическим. Разрабатываемые на основе полученных закономерностей автоматизированные системы деформационного мониторинга обеспечат существенный прогресс в прогнозировании поведения строительных конструкций в течение их жизненного цикла и предсказании интервала безопасной эксплуатации.

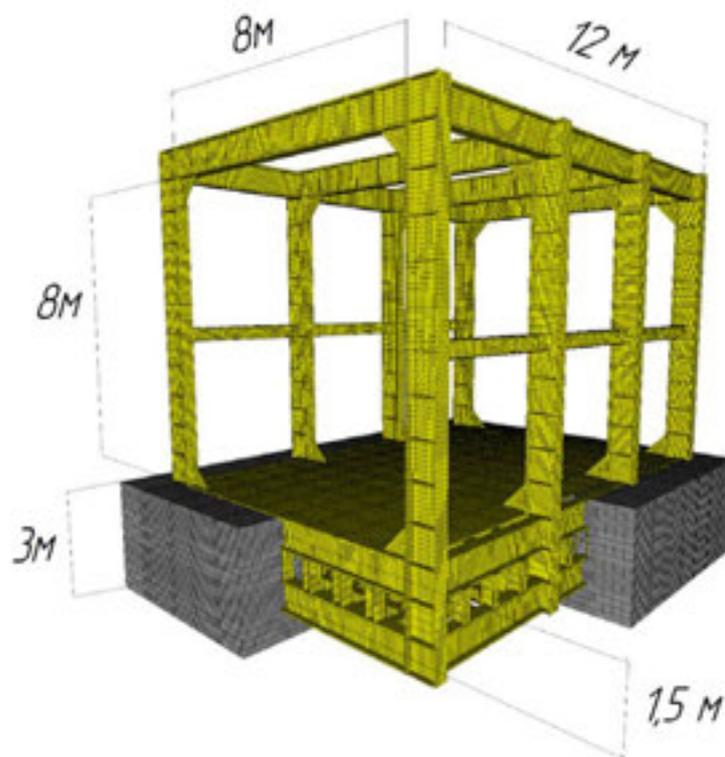


Рис. 3. Конструкция экспериментального стенда

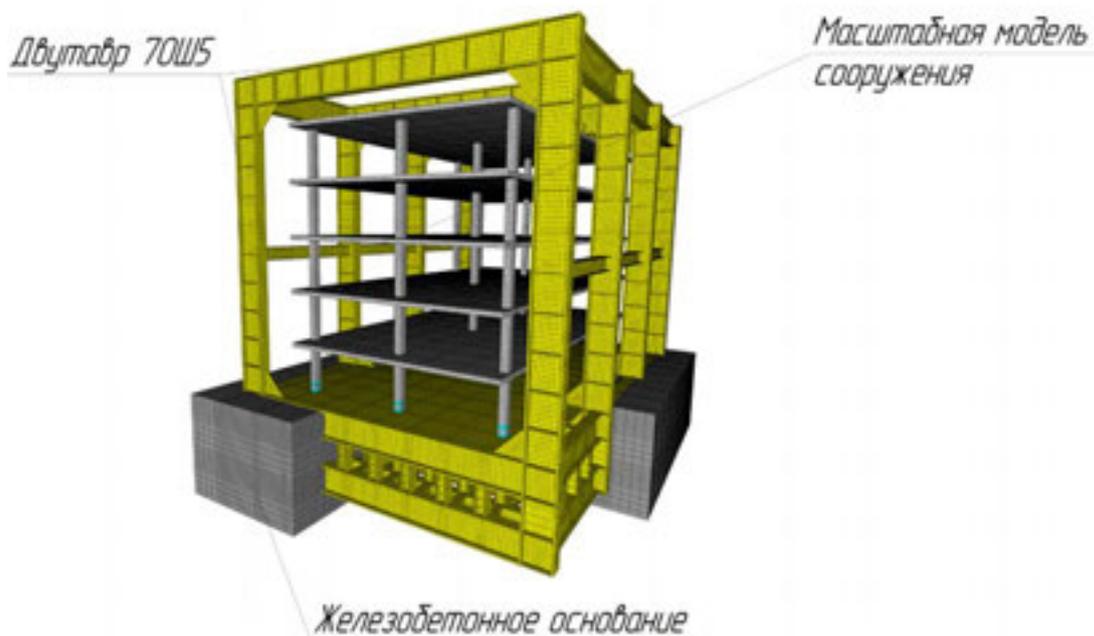


Рис. 4. Экспериментальный стенд с масштабной моделью конструкции

#### Библиографический список

1. Добромыслов А.Н. Оценка зданий и сооружений по внешним признакам: Справочное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 72 с.
2. Организация и проведение обследования технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений / А.С. Морозов, В.В. Ремнева, Г.П. Тонких и [др.] – М, 2001. – 212 с.
3. Ройтман А.Г. Деформации и повреждения зданий. – М.: Стройиздат, 1987. – 160 с.
4. Арндарский Е. Долговечность жилых зданий: пер. с польск. / под ред. С.С. Крамилова. – М.: Стройиздат, 1983. – 255 с.
5. Асанбеков Х.А. Долговечность сборных конструкций многоэтажных зданий. – М.: Стройиздат, 1985. – 104 с.
6. Колотилкин Б.М. Долговечность жилых зданий. – М.: Стройиздат, 1965. – 254 с.
7. Грунау Э. Предупреждение дефектов в строительных конструкциях. – М.: Стройиздат, 1985. – 215 с.
8. Предупреждение деформаций и аварий зданий и сооружений / под ред. В.А. Лисенко – Киев: Будівельник, 1984. – 120 с.
9. Коргин А.В., Емельянов М.В. Особенности построения интеллектуальных систем автоматического мониторинга технического состояния ответственных строительных сооружений // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 3. – С. 32–34.
10. Патрикеев А.В., Салатов Е.К. Основы методики динамического мониторинга деформационных характеристик зданий и сооружений // Вестник МГСУ. – 2013. – № 1. – С. 133–138.
11. Хорошилова Ж.А., Хорошилов В.С. Деформационный мониторинг инженерных объектов как составная часть геодезического мониторинга // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. – 2012. – Т. 1. – № 1. – С. 77–80.
12. Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Система мониторинга неравномерных осадок сооружений с использованием ip-камер // Вестник Волгоградского архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – 2013. – № 30 (49). – С. 95–100.
13. Богдавленская В.А., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Цветков Р.В. Моделирование в системах мониторинга механического поведения инженерных сооружений и природных объектов // VI Сессия Научного совета РАН по механике: материалы Всерос. Конференции. – Барнаул, Белокуриха, 26–31 июля 2012. – С. 38–39.
14. Bartolomey M.L., Glot I.O., Shardakov I.N., Tsvetkov R.V. The Analysis of the deformation state of the building structure based on the measurement with an automated monitoring system // Structural Health Monitoring for Infrastructure Sustainability. Proceedings of the 6-th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure – SHMII-6. – Hong Kong – 9–11 Dec. 2013. Электрон. оптич. диск. (CD.) ISBN 978-962-367-768-4 – 7 p.
15. Герасимов А.В., Паишков С.В. Моделирование естественного дробления твердых тел при ударных и взрывных нагружениях // Химическая физика. – 2004. – Т. 24. – № 11. – С. 48–54.

16. Reinhardt H. W., Xu S. Crack extension resistance based on the cohesive force in concrete // Engineering Fracture Mechanics. – 1999. – Vol. 64. – P. 563–587.
17. Prasad M.V.K., Krishnamoorthy C.S. Computational model for discrete crack growth in plain and reinforced concrete // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 2002. – Vol. 191, Is. 25–26. – P. 2699–2725.
18. Bolander Jr.J.E., Le B.D. Modeling crack development in reinforced concrete structures under service loading // Construction and Building Materials. – 1999. – Vol. 13, Is. 1–2. – P. 23–31.
19. Ohtsu M., Kaminaga Y, Munwam M. C. Experimental and numerical crack analysis of mixed-mode failure in concrete by acoustic emission and boundary element method // Construction and Building Materials. – 1999. – Vol. 13, Is. 1. – P. 57–64.
20. Шматков С.Б. Расчет остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Строительство и архитектура. – 2007. – Т. 94. – № 22. – С. 56–57.
21. Yang Z.J., Chen J. Finite element modelling of multiple cohesive discrete crack propagation in reinforced concrete beams // Engineering Fracture Mechanics. – 2005. – Vol. 72. – P. 2280–2297.
22. Yang Z.J., Proverbs D. A comparative study of numerical solutions to non-linear discrete crack modelling of concrete beams involving sharp snap-back // Engineering Fracture Mechanics. – 2004. – Vol. 71. – P. 81–105.
23. Willam K.J., Warnke E.D. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete // Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering. – 1975. – Vol. 19. – P. 174.
24. Fuschi P., Dutko M., Peric D., Owen D.R.J. On numerical integration of the five-parameter model for concrete // Comput & Structures. – 1994. – Vol. 53. – Is. 4. – P. 825–838.
25. Ветюков М.Ю., Елисеев В.В. Моделирование каркасов зданий как пространственных стержневых систем с геометрической и физической нелинейностью // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3. – № 3. – С. 32–45.
26. Кухта А.В. Экспериментальные стенды «Конструктор», «Плита» и «Створ» для решения задач строительного мониторинга: особенности. Возможности. Проблемы // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2013. – № 1. – С. 46–59.
27. Карякин А.А., Сонин С.А., Попп П.В., Алилуев М.В. Испытание натурального фрагмента сборно-монолитного каркаса системы Аркос с плоскими перекрытиями // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Строительство и архитектура – 2009. – № 35 (168). – С. 16–20.

**FULL-SCALE LOAD TESTING OF STRUCTURES –  
A SIGNIFICANT STEP TO IMPROVING DEFORMATION SAFETY**

G.N. Gusev, V.P. Matveenko, R.V. Tsvetkov, I.N. Shardakov, A.P. Shestakov

The basic principles of development of an experimental stand for recording pre-critical and critical processes taking place in structures are considered. A model is developed to describe the specific features of the deformation behavior of a reinforced concrete structure at the initial stage of damage accumulation. Simulation results are obtained for elements of the reinforced concrete structure of half scale. Parameters of the experimental stand and operating conditions of loading devices are determined. The scheme of the experimental stand is presented.

*Keywords: deformation monitoring, mathematical model, experimental stand, reinforced concrete, pre-critical state.*

**Сведения об авторах**

*Гусев Георгий Николаевич*, кандидат технических наук, заведующий лабораторией строительной механики, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, ул. Академика Королева, 1; e-mail: gusev.g@icmm.ru

*Матвеенко Валерий Павлович*, доктор технических наук, директор, ИМСС УрО РАН; e-mail: mvr@icmm.ru

*Цветков Роман Валерьевич*, кандидат технических наук, научный сотрудник, ИМСС УрО РАН; e-mail: flower@icmm.ru

*Шардаков Игорь Николаевич*, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией интеллектуального мониторинга, ИМСС УрО РАН; e-mail: shardakov@icmm.ru

*Шестаков Алексей Петрович*, младший научный сотрудник, ИМСС УрО РАН; e-mail: shap@icmm.ru

*Материал поступил в редакцию 11.12.2014 г.*