

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 69.07

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1505-1520

## Обзор мирового опыта по проведению натуральных испытаний существующих железобетонных конструкций

Олег Васильевич Кабанцев, Андрей Евгеньевич Лапшинов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проанализирован отечественный и зарубежный опыт проведения натуральных испытаний. Приведена ретроспектива развития стандартов на выполнение натуральных испытаний в России и СССР. Осуществлен обзор мировых нормативных документов в части требований к проведению натуральных испытаний конструкций, который показал недостаточную исследованность этого вопроса как в нашей стране, так и за рубежом. Полученный обзор может являться основанием для разработки национального стандарта РФ на проведение натуральных испытаний.

**Материалы и методы.** Выполнен аналитический обзор.

**Результаты.** Показано состояние вопроса и применение стресс-тестов (натурных испытаний) в нашей стране, а также в Германии, США, Италии, Канаде, Австралии, Швейцарии и других странах. Представлены минимальные требования к целевой испытательной нагрузке при испытаниях, режиму нагружения и критериям приемки для экспериментальной оценки несущей способности существующих несущих конструкций, указанные в различных нормах. Проанализированы специализированные критерии приемки несущих конструкций, такие как коэффициент постоянства и отклонения от линейности, упоминаемые в отдельно взятых стандартах.

**Выводы.** Отмечается сходство общих подходов и отсутствие унифицированных требований к выполнению подобного вида исследований и оценке их результатов. Рассматривается необходимость разработки национального стандарта РФ на проведение натуральных испытаний возведенных железобетонных конструкций.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** конструкции, несущие системы, нагрузка, натурные испытания, прочность, деформативность, трещиностойкость

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кабанцев О.В., Лапшинов А.Е. Обзор мирового опыта по проведению натуральных испытаний существующих железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1505–1520. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1505-1520

Автор, ответственный за переписку: Андрей Евгеньевич Лапшинов, la686@yandex.ru.

## A review of the world experience in full-scale testing of existing reinforced concrete structures

Oleg V. Kabantsev, Andrey E. Lapshinov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Domestic and foreign experience of full-scale tests is analyzed. The retrospective of development of standards for conducting full-scale tests in Russia and the USSR is presented. The review of the world regulatory documents regarding the requirements for conducting full-scale tests of structures is carried out, which showed insufficient research of this question both in our country and abroad. The obtained review can be the basis for the development of the national standard of the Russian Federation for conducting full-scale tests.

**Materials and methods.** Analytical review.

**Results.** The state of the issue and the application of stress tests (full-scale tests) in our country, as well as in Germany, the USA, Italy, Canada, Australia, Switzerland and other countries are shown. The minimum requirements for the target test load during testing, the loading mode and acceptance criteria for the experimental assessment of the load-bearing capacity of existing load-bearing structures specified in various standards are given. Specialized criteria for the acceptance of load-bearing structures, such as the permanency ratio and deviation from linearity index, mentioned in individual standards, are analyzed.

**Conclusions.** The similarity of common approaches and the lack of unified requirements for conducting this type of research and evaluating their results are noted. The necessity to develop a national standard of the Russian Federation for full-scale tests of erected reinforced concrete structures is considered.

**KEYWORDS:** structures, load-bearing systems, load, full-scale tests, strength, deformability, crack resistance

**FOR CITATION:** Kabantsev O.V., Lapshinov A.E. A review of the world experience in full-scale testing of existing reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1505-1520. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1505-1520 (rus.).

*Corresponding author:* Andrey E. Lapshinov, la686@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В отдельных случаях при обследовании зданий и сооружений или их приемке требуется оценить нестандартное проектное решение или допущенные в ходе строительства отклонения от проекта. Однако зачастую оценить безопасность таких решений или отклонений расчетным методом не представляется возможным из-за несовершенства или отсутствия соответствующих методик. В таком случае прибегают к проведению натуральных испытаний конструкции, находящейся в проектном положении непосредственно на объекте. Как правило, такие испытания выполняются по специально разработанной программе. И разработка программы, и испытания осуществляются научными организациями. Следует подчеркнуть, что прямые нормативные требования по проведению, анализу и приемке результатов натуральных испытаний существующих конструкций, входящих в состав несущей системы, отсутствуют.

Согласно п. 6 ст. 15 Федерального закона № 384-ФЗ<sup>1</sup> соответствие проектных значений параметров и проектных характеристик зданий или сооружений требованиям безопасности должны быть обоснованы ссылками на требования ФЗ, а также ссылками на требования стандартов и сводов правил, включенных в перечни ФЗ, или на требования специальных технических условий.

При этом в случае отсутствия указанных требований соответствие проектных значений и характеристик здания или сооружения требованиям безопасности должно быть обосновано одним или несколькими способами из следующих:

- 1) результаты исследований;
- 2) расчеты и (или) испытания, выполненные по сертифицированным или апробированным иным способом методикам;
- 3) моделирование сценариев возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий, в том числе при неблагоприятном сочетании опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий;
- 4) оценка риска возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий.

Таким образом, в некоторых случаях механическая безопасность зданий и сооружений, а также отдельных конструкций может быть обеспечена выполнением натуральных испытаний по сертифицированным или апробированным иным способом ме-

тодикам. Исходя из трактовки закона проведением натуральных испытаний конструкций можно обосновывать соответствие проектных или действительных характеристик конструкций здания или сооружения требованиям безопасности. То есть, иными словами, можно обосновать соответствие фактической несущей способности возведенных конструкций проектным значениям методом прямых испытаний нагружением экспериментальной нагрузкой.

Анализ перечня нормативных документов показывает, что на сегодня в РФ отсутствуют нормативные документы на натурные испытания существующих железобетонных конструкций (ЖБК), входящих в состав несущей системы, что является препятствием для реализации положений п. 6 ст. 15 Федерального закона № 384-ФЗ.

В нашей стране натурные испытания элементов несущих систем и отдельных конструкций, входящих в состав таких систем, разработаны для отдельных классов сооружений. Достаточно упомянуть, что методы испытаний существующих конструкций внедрены в инженерную практику и используются для подтверждения проектных значений несущей способности при приемке мостовых сооружений (СП 79.13330.2012<sup>2</sup>) или свайных фундаментов (СП 24.13330.2021<sup>3</sup>). Также среди действующих стандартов на испытания конструкций можно отметить ГОСТ Р 56379–2015<sup>4</sup>, распространяющийся на определение несущей способности полов, однако данный метод испытаний не вошел в широкую инженерную практику из-за ограниченности применения, сложности изготовления оснастки (деформатора) и необходимости иметь упор сверху. В сложившихся обстоятельствах нормативный документ по применению методов испытаний существующих ЖБК широкого спектра зданий и сооружений весьма востребован практикой строительства и необходима его разработка.

В связи с высокой актуальностью проблемы авторы настоящей статьи проанализировали международные нормы по экспериментальной оценке несущей способности существующих и входящих в состав несущих систем ЖБК с целью сопоставления этих подходов с имеющимся в России уровнем техники, а также для определения перспективных подходов к методике экспериментальной оценки

<sup>2</sup> СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. Актуализированная редакция СНиП 3.06.07–86.

<sup>3</sup> СП 24.13330.2021. СНиП 2.02.03–85. Свайные фундаменты.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 56379–2015. Полы. Метод испытания несущей способности.

<sup>1</sup> Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

несущей способности существующих ЖБК зданий и сооружений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнен аналитический обзор состояния нормативной базы разных стран в части, касающейся оценки несущей способности ЖБК методом проведения натуральных испытаний.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже представлено состояние нормативной базы разных стран в части проведения натуральных испытаний ЖБК.

### СССР/Россия

ГОСТ 8829–58 стал первым стандартом такого рода в нашей стране и был введен в Советском Союзе в 1958 г. Он назывался «Детали железобетонные сборные. Методы испытаний и оценка прочности, жесткости и трещиностойкости». С тех пор стандарт обновлялся каждое десятилетие: в 1966, 1977, 1985 и 1994 гг. Также некоторое время действовали строительные нормы СН 417–70<sup>5</sup>, которые впоследствии отменены, а взамен с 01.01.78 утвержден и введен в действие ГОСТ 8829–77 (ИУС 3–77).

<sup>5</sup> СН 417–70. Временные указания по контролю и оценке прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных изделий и конструкций неразрушающими методами.

На текущий момент в РФ действует межгосударственный стандарт ГОСТ 8829–2018<sup>6</sup>. Он предназначен для применения лабораториями, осуществляющими контрольные статические испытания изделий нагружением в соответствии с требованиями ГОСТ 13015<sup>7</sup>, т.е. только изделий заводской готовности. Стандарт не распространяется на испытание натуральных существующих конструкций, а также на оценку правильности проектирования изделий. Редакция ГОСТ 8829 от 1994 г. допускала использовать методы испытаний и правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости изделий, определенных стандартом при проведении исследовательских испытаний вновь проектируемых изделий. Однако редакция от 2018 г. уже не распространяется на испытания с целью оценки правильности проектирования изделий.

Испытания согласно ГОСТ 8829–2018 выполняются до разрушения, при этом значения контрольных разрушающих нагрузок назначаются в зависимости от коэффициента  $C$ , учитывающего не только предполагаемый механизм и характер разрушения, но и вид бетона испытываемых конструкций (таблица).

<sup>6</sup> ГОСТ 8829–2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости.

<sup>7</sup> ГОСТ 13015. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения.

Значения коэффициента  $C$  для испытываемых изделий в зависимости от механизма и характера разрушения, а также вида бетона

The values of the coefficient  $C$  for the tested products, depending on the mechanism and nature of destruction, as well as the type of concrete

Механизм разрушения Failure mechanism	Характер разрушения Failure type	Значение коэффициента $C$ The value of the factor $C$
От действия изгибающего момента по нормальному сечению или от внецентренного сжатия From the action of the bending moment along the normal section or from eccentric compression	Пластичный, с текучестью продольной арматуры в ормальном и наклонном сечениях до наступления раздробления сжатой зоны Ductile, with the yielding of longitudinal reinforcement in normal and oblique sections before the crushing of the concrete compressed zone	1,3
	Хрупкий, с раздроблением сжатой зоны бетона, с разрывом арматуры изделий из бетонов: • тяжелого, мелкозернистого и силикатного; • легкого Brittle, with the crushing of the concrete compressed zone, with rupture of reinforcement of concrete: • heavy, fine-aggregate and silicate concrete; • lightweight	1,6 1,8
От действия поперечных сил по наклонному сечению или между наклонными трещинами From the action of shear forces along an oblique section or between oblique cracks	Пластичный, с текучестью продольной и/или поперечной арматуры в наклонном сечении Ductile, with the yielding of longitudinal and/or transverse reinforcement in an oblique section	1,3
	Хрупкий, с раздроблением бетона или нарушением анкеровки арматуры Brittle, with concrete crushing or reinforcement anchoring failure	1,9

Нагружение конструкций согласно ГОСТ 8829–2018 допускается проводить как штучными грузами, так и гидравлическими прессами или стендами с гидравлическими домкратами и насосными станциями, а также многорычажными и пневматическими установками.

В случае необходимости осуществления испытаний существующих конструкций разрабатывается специальная программа испытаний. При этом при разработке такой программы, как правило, используется ГОСТ 8829. Однако использование указанного стандарта имеет значительные ограничения:

1) применение ограничено группой изделий заводского изготовления, что следует из наименования нормативного документа, а большой объем конструкций и несущих систем на сегодняшний день в нашей стране выполняется по технологии монолитного железобетона непосредственно на месте их дальнейшей эксплуатации;

2) стандарт подразумевает проведение испытаний до достижения контролируемого параметра предельного состояния, т.е. исчерпания несущей способности по одному из критериев (например, прочность нормального или наклонного сечения), причем также принимается во внимание ожидаемый механизм разрушения (хрупкий, пластичный). При проведении натурных испытаний на объекте указанное ключевое условие (достижение предельного состояния) часто невыполнимо и, более того, в случае достижения может повлечь за собой необратимые разрушения как самой конструкции, так и спровоцировать обрушение смежных конструкций, вплоть до прогрессирующего обрушения всей несущей конструктивной системы здания.

Таким образом, нормативная база РФ в части, касающейся экспериментальной оценки существующих и входящих в состав несущих систем конструкций, требует совершенствования и развития.

### ФРГ

Историческое развитие правил стресс-тестов (натурных испытаний) в Германии подробно описано в публикациях [1, 2], ссылки на более подробную литературу по текущим основам применения указаны в работах [3–5].

С 2000 г. нагрузочные испытания на существующих конструкциях регулируются директивой Немецкого комитета по железобетону «Испытания нагружением бетонных конструкций»<sup>8</sup>. Эта директива позволила экспериментально доказать несущую способность многих существующих конструкций за последние 15 лет и, таким образом, внести решающий вклад в их сохранение [6]. Согласно указанной директиве, натурные испытания могут «дополнять доказательство несущей способности существующих конструкций в обоснованных слу-

чаях, когда такое доказательство не может быть получено путем расчета, несмотря на тщательное обследование конструкции».

В Германии термин «испытание нагружением» сохранился до наших дней из-за его исторического значения, но сегодня он используется как синоним для различных типов испытаний с квазистатической нагрузкой:

- испытания на уровне полезной нагрузки;
- испытания до целевой экспериментальной нагрузки<sup>9</sup>;
- испытания до предельной экспериментальной нагрузки;
- испытания до разрушения.

Как правило, задача натурных испытаний состоит не в том, чтобы определить фактическую несущую способность конструкции, а в том, чтобы доказать достаточную несущую способность при определенном воздействии [7]. Цель состоит в том, чтобы обеспечить максимально возможную полезную нагрузку  $F_k$ , не повреждая испытываемую конструкцию во время испытания. Величина нагрузки, которая должна быть приложена в ходе испытания, является целевой испытательной нагрузкой  $F_{Ziel}$ <sup>9</sup>, она рассчитывается на основе нагрузки, подлежащей проверке (включая все коэффициенты безопасности). Максимально допустимая нагрузка при испытании — это предельная испытательная нагрузка  $F_{lim}$ , т.е. нагрузка, при которой еще не наступило критическое состояние, которое могло бы привести к разрушению.

Таким образом, для того, чтобы с высокой степенью достоверности подтвердить несущую способность испытываемого элемента на установленную полезную нагрузку, необходимо приложить максимально возможную испытательную нагрузку, и в то же время нагрузка не должна быть настолько большой, чтобы повредить конструкцию.

Однако богатый опыт проведения и оценки стресс-тестов показывает, что требования и критерии оценки, изложенные в директиве, не во всех случаях достаточно конкретизированы или пригодны для практического применения. Это касается измеряемых величин деформации, которые должны быть получены в ходе испытания, и связанных с ними критериев оценки, практическая значимость которых в некоторых случаях может быть поставлена под сомнение. Сообщалось также о некоторых опасных для жизни ошибках при проведении испытаний (например, использование балластных масс, не защищенных от падения, для создания нагрузки или применение механических измерительных приборов с ручным считыванием показаний), которые

<sup>9</sup> Термин «целевая экспериментальная нагрузка», очевидно, соответствует термину «контрольная нагрузка при испытаниях» в терминологии российской научно-технической документации.

<sup>8</sup> Dt. Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken. Berlin, Beuth-Verlag, 2000.



связаны с недостаточно четко сформулированными требованиями к нагрузочной и измерительной технике, а также (в отдельных случаях) с недостаточным опытом и знаниями специалистов.

Кроме того, в последнее время в ФРГ были предприняты некоторые усилия [3, 8] по расширению применения метода экспериментальной оценки несущей способности даже к тем элементам, которые ранее не подвергались испытаниям под нагрузкой из-за их низкой пластичности. Например, изложены [4] основы для экспериментальной оценки прочности на сдвиг для стальных и предварительно напряженных ЖБК, которые должны позволить в будущем с уверенностью оценивать несущую способность и механические характеристики таких несущих конструкций. Дальнейшие исследования [9] были посвящены увязке и согласованию результатов экспериментального и численного контроля. При этом численные модели проверяются и калибруются с помощью системных измерений компонентов при эксплуатационных нагрузках и таким образом обеспечивают численное определение несущей способности, что стало возможным благодаря экспериментально полученной информации [9]. Натурные испытания при помощи специализированного испытательного грузового автомобиля BELFA [10] также дали возможность во многих случаях экспериментально доказать несущую способность существующих мостов малого и среднего пролета [11]. Все эти дальнейшие разработки и выводы, основанные на практическом опыте, в сочетании с внедрением Еврокодов привели к необходимости пересмотра директивы.

Испытания на несущую способность, при которых элементы подвергаются нагрузке до разрушения, в настоящее время не подпадают под действие немецкой директивы. Чтобы исключить риск «необъявленного отказа (например, разрушения при сдвиге)», компоненты с такими формами отказа ранее не учитывались при оценке нагрузочных испытаний, поскольку для этого отсутствовали критерии оценки для безопасного определения экспериментальной предельной нагрузки.

В исследованиях G. Spaethe [12] используются вероятностные методы для наглядного объяснения влияния успешно проведенного испытания на прочность на растяжение исследуемого компонента. При этом рассматривается уровень безопасности, выраженный индексом безопасности  $\beta$  до, во время и после пробной нагрузки, автор исследований приходит к выводу, что «с точки зрения теории безопасности пробная нагрузка может быть полезной, бессмысленной или даже вредной». Соотношение между приложенной нагрузкой и предыдущей полезной нагрузкой, полученное в ходе испытания, имеет решающее значение для оценки безопасности, достигнутой в результате нагрузочного испытания.

Как показано на рис. 1, приложение предполагаемой целевой нагрузки приводит к снижению индекса безопасности во время испытания, после успешного завершения испытания ведет к последующему увеличению индекса безопасности, поскольку испытание улучшает знания о несущем поведении конструкции, если нагрузка была воспринята без разрушения.

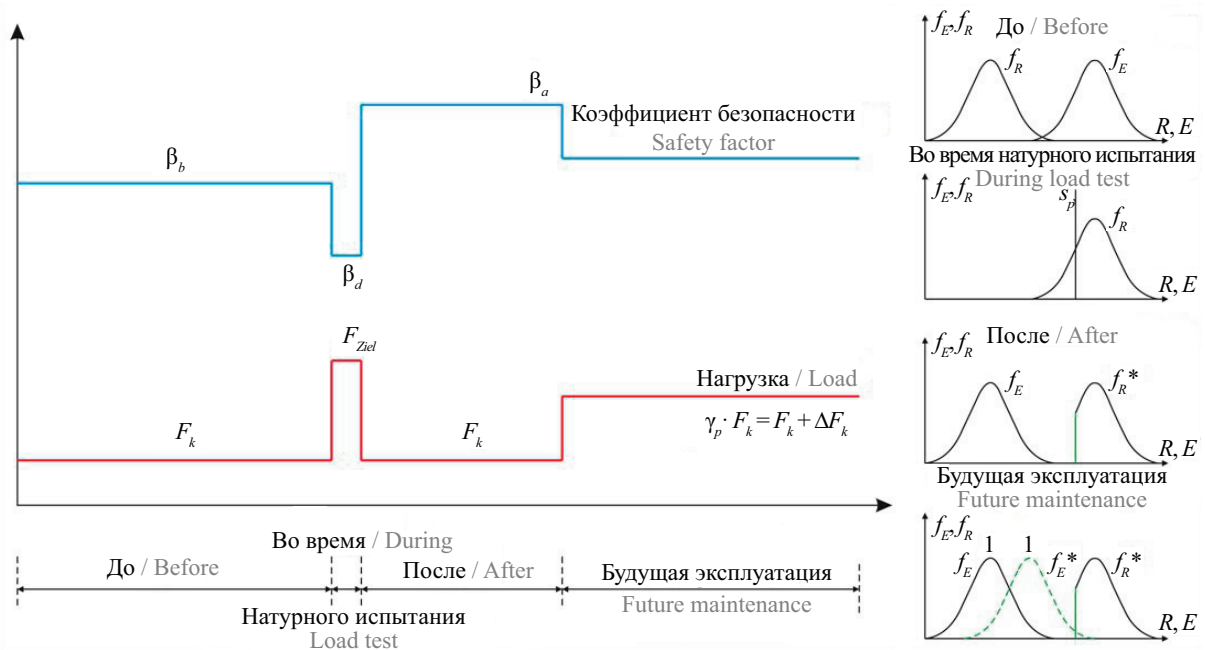


Рис. 1. Объяснение повышения безопасности и, как следствие, обнаруженных скрытых резервов прочности в результате натурных испытаний, согласно работе [12]

Fig. 1. An explanation of the increased safety and, as a result, the discovered hidden reserves of strength after load tests, according to [12]

Поскольку конструкция выдержала запланированную нагрузку без каких-либо признаков разрушения, неизвестная функция плотности распределения сопротивлений используется для расчета, а все значения несущей способности ниже выдерживаемой нагрузки исключаются. Это приводит к уменьшению функции плотности распределения (рис. 1), что означает уменьшение неопределенности сопротивления.

Полученная дополнительная безопасность может быть использована на стороне нагрузки для увеличения допустимой полезной нагрузки  $\Delta F_k$ . В своих расчетах автор [12] также показывает, что испытание на уровне полезной нагрузки не дает большого повышения безопасности, а повышение безопасности увеличивается только с увеличением уровня нагрузки, поскольку только таким образом обнаруживаются и устраняются слабые участки и, следовательно, прогнозируются и устраняются неопределенности контролируемого характера [12].

По исследованию [12] общая полезная нагрузка  $\Delta F$ , полученная в случае успешного установления целевой нагрузки испытания  $F_{Ziel}$  (дополнительная нагрузка  $G_k$  и транспортная нагрузка  $Q_k$ ), определяется из доли нагрузки  $extF_{Ziel}$  внесенной извне в испытание, с учетом соответствующих частных коэффициентов безопасности на стороне воздействия. Существующие остаточные нагрузки компонента полностью задействованы во время испытания и, соответственно, не являются составной частью  $extF_{Ziel}$ . Дополнительные остаточные нагрузки, неэффективные в испытании, должны учитываться при определении  $extF_{Ziel}$  точно так же, как и при вычислительном обнаружении с использованием частных коэффициентов надежности. Согласно директиве, характеристика предельного состояния по несущей способности определяется следующей зависимостью между прилагаемой извне испытательной или предельной нагрузкой и проверяемыми характеристиками:

$$extF_{lim} \geq extF_{Ziel} = \sum_{j>1} \gamma_{Gj} \cdot G_{kj} + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \sum_{i>1} \gamma_{Qi} \cdot \psi_{Qi} \cdot Q_{ki} \geq 0,35 \cdot G_{k1} \quad (1)$$

Минимальный уровень внешней целевой нагрузки  $extF_{Ziel}$  указанной в уравнении (1), предназначен для обеспечения того, чтобы для конструкций с большим значением собственного веса доля внешней нагрузки была не меньше 1,00–1,35 раза, чем характеристическое значение остальных нагрузок, действующих во время испытания [13]. Согласно указанной выше директиве, нагрузка должна применяться таким образом, чтобы «максимально точно отражать воздействия в последующем периоде эксплуатации в их наихудшем сочетании».

Нагрузка, приложенная в ходе испытания, должна представлять рассчитанные нагрузки и создавать соответствующие напряжения в конструкции. Упомя-

нутая директива прямо не предписывает, как создавать нагрузку при испытании, однако в настоящее время в Германии преимущественно используется так называемая технология самоблокирующейся нагрузки.

Использование балластных масс<sup>10</sup> для подтверждения достаточной несущей способности сопряжено с высоким риском для персонала и техники и в конечном итоге (по мнению авторов немецкой директивы) не соответствует требованиям неразрушающего контроля. При использовании самоблокирующейся системы нагружения испытательные нагрузки, возникающие при испытании, генерируются гидравлически и закрепляются непосредственно вблизи исследуемой конструкции, так что силовой контур замыкается, а прилегающие конструкции не подвергаются нагружению.

При условии наличия деформационно-жесткой несущей рамы и пластичных характеристик элементов испытание является самоблокирующимся. Эта самозащита достигается за счет того, что при сильной деформации испытываемой конструкции гидравлическое давление снижается, и вся система переходит в безопасное равновесное состояние. Кроме того, гидравлическая нагрузка позволяет быстро разгрузить конструкцию за счет снижения гидравлического давления [5].

Согласно немецкой директиве, достижение экспериментальной нагрузки целевого уровня должно осуществляться по меньшей мере за три этапа, причем после каждого этапа по меньшей мере один раз должна быть снижена до базового уровня нагрузки  $0,1F_k$ . Нагрузка должна поддерживаться постоянной в течение «разумного» времени при каждой загрузке и разгрузке.

Помимо этих минимальных требований, рекомендуется выполнять циклы загрузки и разгрузки на нескольких уровнях с повторением, поскольку таким образом можно с большей вероятностью обнаружить нелинейности в зависимости «нагрузка – деформации» (рис. 2). Заключительный этап испытания (продолжительностью от 15 до 30 мин) дает дополнительную информацию о возможных деформациях, зависящих от времени. Во время испытания значения выбранных компонентов записываются в режиме онлайн и отображаются в подходящей форме, чтобы инженер-испытатель мог оценивать их в режиме реального времени. Это единственный способ своевременно обнаружить и оценить начавшиеся нелинейные структурные изменения в конструкции.

В директиве определены следующие критерии деформации, указывающие на достижение предельной экспериментальной нагрузки:

- ограничение деформации бетона в области стабильного образования микротрещин;

<sup>10</sup> Термин «балластные массы», очевидно, соответствует термину «штучные грузы» в терминологии российской научно-технической документации и, в частности, ГОСТ 8829.

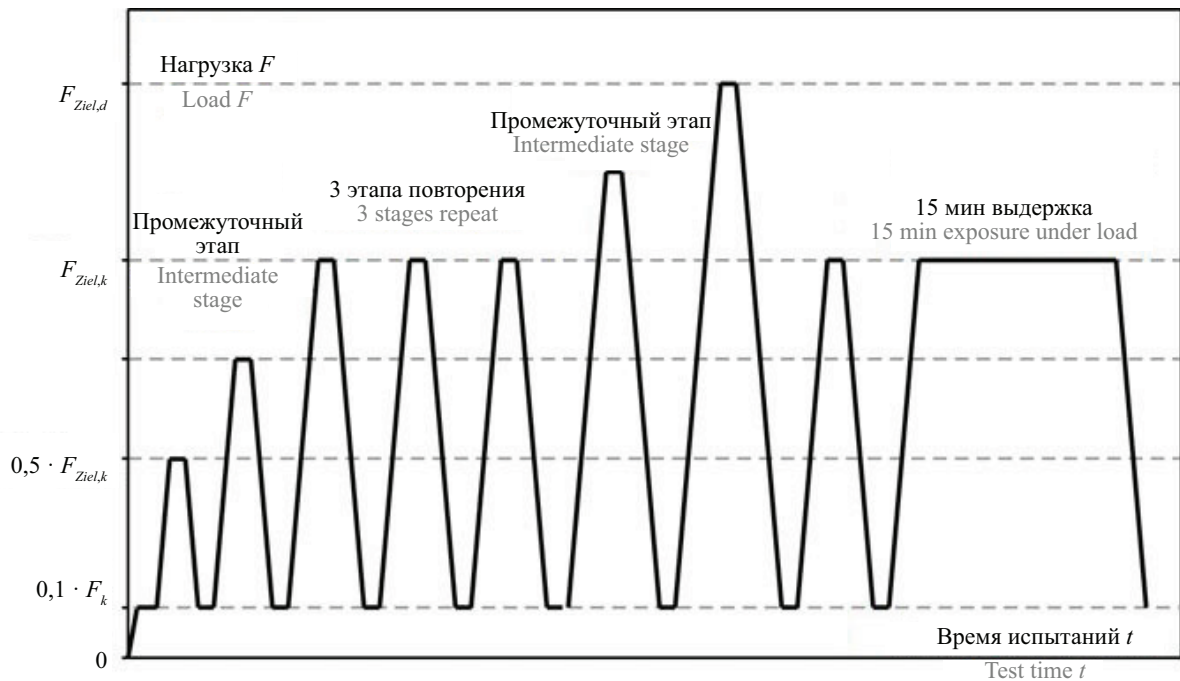


Рис. 2. Типовой режим нагрузок для натурных испытаний согласно немецкой директиве

Fig. 2. Typical load regime for load tests according to German directive

- ограничение деформации арматуры в зоне упругости;
- ограничение ширины трещин в зависимости от нагрузки и соответственно предела прочности арматуры;
- изменение ширины раскрытия трещины;
- ограничение нелинейных деформаций при нагрузке или деформации, которые остаются неизменными после разгрузки;
- ограничение деформаций в зоне наклонных сечений балок (трещины в наклонном сечении и растяжение стали в поперечной арматуре).

Экспериментальная предельная нагрузка также считается достигнутой, если:

- данные измерений, такие как деформация под нагрузкой или данные акустической эмиссии, указывают на критические изменения, которые при дальнейшем увеличении нагрузки могут привести к образованию необратимых повреждений;
- обнаружена угроза устойчивости;
- существует угроза возникновения критических перемещений опор.

Анализ предлагаемых значений предельной нагрузки, основанных на величинах деформации, показывает, что инструменты в виде оценки напряжений в арматуре вряд ли могут быть применены с практической точностью, поскольку, с одной стороны, точное местоположение максимальной деформации неизвестно (вследствие сложности прогноза трасс образования трещин), с другой — упругая предварительная деформация от собственного веса должна быть известна именно в этом месте. Корректная оценка напряжений в арматуре может быть выполне-

на только с применением датчиков, заранее установленных на арматуру, что для испытаний конструкций, входящих в состав несущей системы, является исключительным случаем.

Поэтому для оценки структурной безопасности изгибаемых элементов обычно используются диаграммы «нагрузка – прогиб». На их основе можно определить изменения жесткости, связанные с образованием трещин, зарождающимися нелинейными деформациями или компонентами упругой и пластической деформации. Благодаря непрерывному увеличению нагрузки и непрерывной регистрации параметров деформации, реакция конструкции может быть оценена одновременно в течение всего процесса нагружения и разгрузки. В частности, разгрузка обеспечивает значительный прирост информации и позволяет оценить компоненты пластической деформации, возникающие на соответствующей стадии нагружения (увеличение площади петли гистерезиса, остаточных деформаций), а также любые зарождающиеся нелинейные структурные изменения [14].

Результаты натурального испытания могут быть перенесены на другие элементы, «если их сходство может быть продемонстрировано во всех существенных деталях». Для того чтобы учесть неопределенности модели и системы при таком переносе, в целевой испытательной нагрузке должны быть учтены дополнительные коэффициенты безопасности.

#### США

Правила проведения нагрузочных испытаний — неотъемлемая часть нормативных документов в США с первых дней стандартизации в области железобетона

и до сих пор содержатся в ACI 318M–11<sup>11</sup>. Историческое развитие правил натуральных испытаний в США приведено в стандарте ACI 437.1R–07<sup>12</sup>. С точки зрения значимости и целей здесь прослеживаются параллели с развитием натуральных испытаний в Германии.

В начале XX в. все еще стояла задача обеспечения окончательной проверки структурной безопасности новых конструкций, но впоследствии значимость этой задачи снизилась с ростом точности аналитических методов прогноза несущей способности конструкций и развития вычислительных методов. Тем не менее правила проведения натуральных испытаний никогда не исключались из стандарта США, в отличие от стандарта ФРГ.

Сегодня усилия инженеров в США, как и во всех других промышленно развитых странах, чья обширная инфраструктура постепенно стареет, сосредоточены на реконструкции, перестройке и модернизации существующих конструкций зданий и сооружений. В качестве примера, иллюстрирующего указанную тенденцию, можно привести и сложившуюся ситуацию в других промышленно развитых странах. Например, в Бельгии уже в самом ближайшем будущем не останется места для нового строительства, что приведет к необходимости только перестройки или реконструкции уже существующих зданий. В связи с этим натурные испытания вновь приобретают особое значение, поскольку исключительно аналитическая оценка конструктивной безопасности существующего сооружения зачастую невозможна.

Ключевые положения важнейших строительных норм США, а именно главы 20 «Оценка прочности существующих конструкций» стандарта ACI 318, принципиально не изменились с 1971 г., когда проектирование на основе допускаемых напряжений было заменено проектированием на основе предельных состояний.

В стандарте с 1971 г. нагрузка, проверяемая в ходе испытания, составляла 85 % от теоретической расчетной нагрузки:

$$F_{Ziel} = 0,85 \cdot (1,4 \cdot G_k + 1,7 \cdot Q_k). \quad (2)$$

В связи с введением в 2002 г. нормативного документа по железобетону ACI 318–02<sup>13</sup> из-за стандартизации концепции безопасности для различных методов строительства общие коэффициенты для нагрузок на конструкции были снижены. Однако целевая испытательная нагрузка изначально

не была адаптирована к этой новой концепции. Она по-прежнему рассчитывалась в соответствии с уравнением (2). Это означало, что определение испытательной целевой нагрузки больше не было напрямую связано с расчетным предельным состоянием конструкции, а требуемая испытательная нагрузка теперь составляла 93–98 % от расчетного значения воздействий. По этой причине правила натуральных испытаний в комитете ACI 437 пересмотрены в 2007 г., а в документе ACI 437.2–13<sup>14</sup> также введена альтернативная процедура и оценка натуральных испытаний существующих конструкций. Коэффициенты были скорректированы таким образом, чтобы целевая испытательная нагрузка вновь соответствовала около 85 % от расчетной нагрузки. Пересмотренные правила ACI 437 включены в ACI 562–13<sup>15</sup> в 2013 г., но еще не были введены в действие строительными органами. Поэтому в настоящее время испытания под нагрузкой должны проводиться в соответствии со стандартом ACI 318–11<sup>16</sup>. Более подробно положения обоих упомянутых стандартов представлены далее.

#### Нормы по железобетону ACI 318–11

Правила планирования, проведения и оценки натуральных испытаний в стандарте ACI 318–11 более традиционны. Например, целевая испытательная нагрузка, включая уже действующие нагрузки от собственного веса элемента, не должна быть меньше, чем описано в уравнении:

$$F_{Ziel} \geq \max \begin{cases} 1,15 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_k + 0,4 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k); \\ 1,15 \cdot G_k + 0,9 \cdot Q_k + 1,5 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k); \\ 1,3 \cdot G_k, \end{cases} \quad (3)$$

где  $G_k$  — собственный вес;  $Q_k$  — нагрузка от транспорта;  $L_{rk}$  — нагрузка от кровли;  $S_k$  — снеговая нагрузка;  $R_k$  — нагрузка от дождя на кровлю.

Нагрузка должна прикладываться не менее чем в четырех равных интервалах (этапах). Кроме того, измеренные значения прогиба должны быть зарегистрированы для каждой ступени нагрузки. Полную нагрузку предписано оставить на 24 ч и снова измерить деформацию через 24 ч после снятия нагрузки (рис. 3).

Нагрузка обычно прикладывается в виде балластных масс (штучных грузов). Проверка считается выполненной, если конструкция выдержала приложенную нагрузку без признаков разрушения

<sup>11</sup> Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M–11). ACI Standard and Commentary, American Concrete Institute Committee 318, 2011.

<sup>12</sup> Load Tests of Concrete Structures: Methods, Magnitude, Protocols and Acceptance Criteria (ACI 437.1R–07). American Concrete Institute Committee 437, 2007.

<sup>13</sup> Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318–02). ACI Standard and Commentary, ACI Committee 318, 2002.

<sup>14</sup> Code Requirements for Load Testing of Existing Concrete Structures (ACI 437.2–13). ACI Standard and Commentary, ACI Committee 437, 2013.

<sup>15</sup> Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings (ACI 562–13). ACI Standard and Commentary, ACI Committee 562, 2013.

<sup>16</sup> Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M–11). ACI Standard and Commentary, American Concrete Institute Committee 318, 2011.



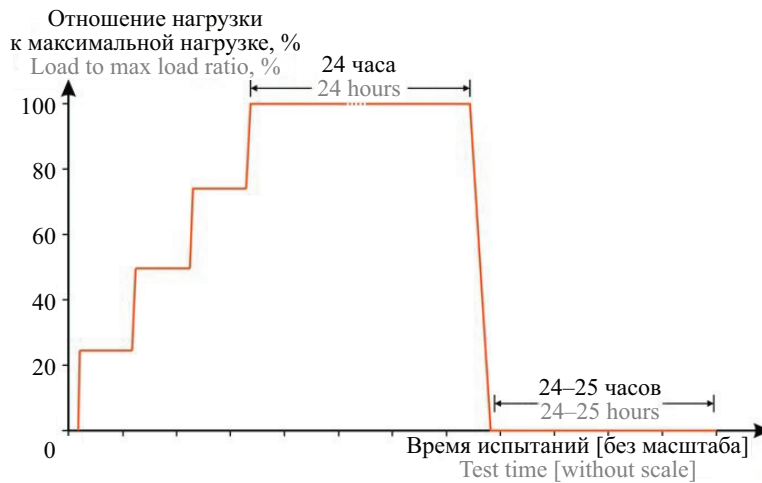


Рис. 3. Режим нагружения при испытании на монотонное нагружение, по ACI 318–11

Fig. 3. Loading mode during the monotonous loading test, according to ACI 318–11

(чрезмерных повреждений, чрезмерного раскрытия трещин, сколов или трещин в бетоне), а прогиб удовлетворяет условиям уравнения (4) или (5):

$$w_1 \leq \frac{l_t^2}{20\,000 \cdot h}; \quad (4)$$

$$w_r \leq \frac{w_1}{4}, \quad (5)$$

где  $w_1$  — максимальный прогиб, измеренный при первом испытании;  $l_t$  — пролет;  $h$  — толщина элемента;  $w_r$  — постоянная деформация после разгрузки.

Если оба условия не соблюдены, испытания можно повторить через 72 ч. Испытания считаются успешно пройденными, если остаточная деформация при втором испытании составляет менее 1/5 от максимального прогиба этого испытания.

#### Испытания под нагрузкой в соответствии с ACI 437.2–13

Правила ACI 437.2–13 определяют минимальные требования к целевой испытательной нагрузке при испытаниях, режиму нагружения и критериям приемки для экспериментальной оценки несущей способности существующих несущих конструкций. Для проведения натуральных испытаний предлагаются два принципиально разных варианта: монотонный и циклический.

Правила, касающиеся монотонных испытаний, в значительной степени соответствуют правилам, приведенным в ACI 318–11, поэтому в данном разделе рассмотрены только циклические испытания.

Если исследуются все рассматриваемые участки конструкции, разрушение происходит по растянутой арматуре, разрушение имеет пластичный характер, или изучаются статически определимые конструкции, то целевая испытательная нагрузка должна быть не меньше, чем в соответствии с уравнением (6). При этом существующие нагрузки от собственного веса  $G_{k,1}$  учитываются без допол-

нительных коэффициентов безопасности, а эксплуатационным нагрузкам  $G_{k,2}$  присваивается коэффициент безопасности 1,1:

$$F_{Ziel} \geq \max \begin{cases} 1,2 \cdot (G_{k1} + G_{k2}); \\ G_{k1} + 1,1 \cdot G_{k2} + \\ + 1,4 \cdot Q_k + 0,4 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k); \\ G_{k1} + 1,1 \cdot G_{k2} + \\ + 0,9 \cdot Q_k + 1,4 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k). \end{cases} \quad (6)$$

В случае, если проводится ограниченное количество испытаний, но их результаты должны быть экстраполированы на многие другие аналогичные элементы или анализируются статически неопределимые несущие конструкции, необходимо приложить несколько увеличенные целевые испытательные нагрузки согласно ACI 437.2–13 в соответствии с уравнением (7):

$$F_{Ziel} \geq \max \begin{cases} 1,3 \cdot (G_{k1} + G_{k2}); \\ G_{k1} + 1,1 \cdot G_{k2} + \\ + 1,6 \cdot Q_k + 0,5 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k); \\ G_{k1} + 1,1 \cdot G_{k2} + \\ + 1,0 \cdot Q_k + 1,6 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k). \end{cases} \quad (7)$$

Согласно стандарту США ACI 437.2–13, нагрузку рекомендуется прикладывать гидравлически, но возможно также использование балластных масс. При использовании балластных масс последовательность нагружения выбирается в соответствии с ACI 437.2–13 (рис. 3). При использовании гидравлического метода нагружения проводится циклическое нагрузочное испытание не менее  $3 \times 2$  циклов с пятью этапами нагружения и разгрузки до заданной испытательной нагрузки (рис. 4).

Протокол циклического нагружения позволяет в режиме реального времени оценивать такие харак-

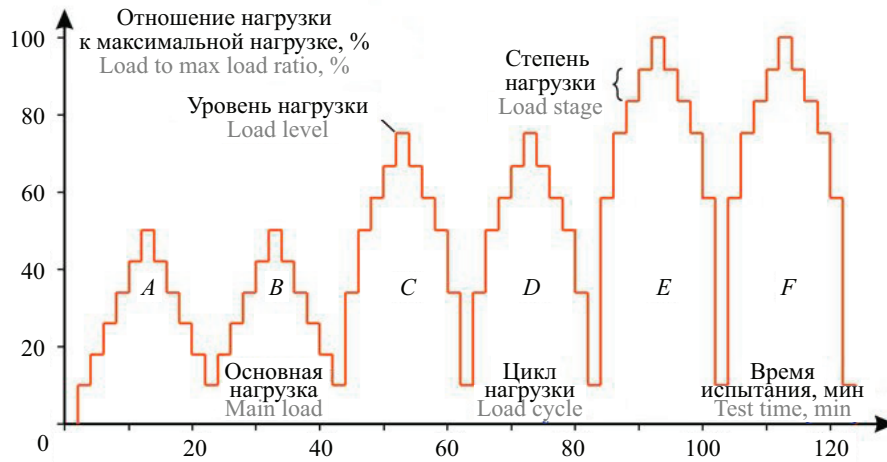


Рис. 4. Режим нагружения при циклическом испытании, согласно ACI 437.2–13

Fig. 4. Loading mode during cyclic testing, according to ACI 437.2–13

теристики элементов, как линейность и постоянство деформаций при различных уровнях нагрузки.

Как правило, измеряется прогиб, при этом оценка осуществляется в классическом виде: максимальный прогиб или остаточный прогиб после разгрузки. Кроме того, уровень несущей способности конструкции оценивается на основе трещин и различных значений отношения нагрузки к прогибу, таким как коэффициент постоянства деформаций и индекс отклонения от линейности.

Оценка несущей способности при эксплуатационной нагрузке выполняется (при необходимости) путем сравнения расчетных и фактически измеренных деформаций, ширины раскрытия трещин и расстояния между трещинами. Однако, поскольку часто наблюдается сильное отклонение фактического состояния от теоретического, в случаях, когда экспериментально определенные значения выходят за нормативные пределы, инженером может быть проведена индивидуальная оценка. Это специальное разрешение на возможную оценку инженером отклонений от теоретических стандартных значений является очень важным для оценки существующих конструкций, потому что такой принцип позволяет проводить оценку в каждом конкретном случае с учетом всех необходимых параметров эксперимента и открывает разумные варианты действий.

Коэффициент постоянства включает сравнение коэффициентов остаточного и максимального прогибов в двух последовательных циклах и описывает развитие деформации в двух последовательных циклах при одинаковом уровне нагрузки, например, в циклах A и B или E и F (в соответствии с рис. 4). Отношение постоянной деформации к максимальной деформации рассчитывается отдельно для каждого цикла согласно уравнению (8), а затем устанавливается коэффициент постоянства в соответствии с уравнением (9). Если значение коэффициента не превышает 0,5, можно считать, что при данном уровне

нагрузки не происходит дальнейших структурных изменений, и испытание считается пройденным:

$$I_{pi} = \frac{w_r^i}{w_{max}^i}; I_{p(i+1)} = \frac{w_r^{(i+1)}}{w_{max}^{(i+1)}}; \quad (8)$$

$$I_{pr} = \frac{I_{p(i+1)}}{I_{pi}}. \quad (9)$$

Нелинейность несущего поведения (отклонение от линейности  $I_{DL}$ ) определяется отношением приращений кривых «нагрузка – деформация» (рис. 5):

$$I_{DL} = \left( 1 - \frac{\tan(\alpha_i)}{\tan(\alpha_{ref})} \right) \cdot 100 \%. \quad (10)$$

Этот параметр измеряет нелинейный отклик и оценивается во всех циклах нагрузки. Как показано в уравнении (10), отклонение от линейности (IDL) рассчитывается как единица минус отношение между секущей линией для графика зависимости нагрузки от прогиба в конкретном цикле  $\tan(\alpha_i)$  и наклоном контрольной точки от графика зависимости нагрузки от прогиба (секущая жесткость)  $\tan(\alpha_{ref})$ . Контрольная точка определяется в первом цикле загрузки. Отклонение от критерия линейности считается выполненным, если показатель не превышает 25 %.

Отклонения от линейности считаются допустимыми, если они не превышают 25 %, что означает снижение жесткости до 75 % от исходной жесткости первого цикла нагружения. Метод, основанный на работах [15, 16], до сих пор использовался только в нескольких натуральных исследованиях. Постоянная деформация  $w_r$  должна быть измерена через 24 ч после снятия нагрузки и должна удовлетворять уравнению (5). Если критерии приемки не выполняются, то может быть проведено повторное испытание,

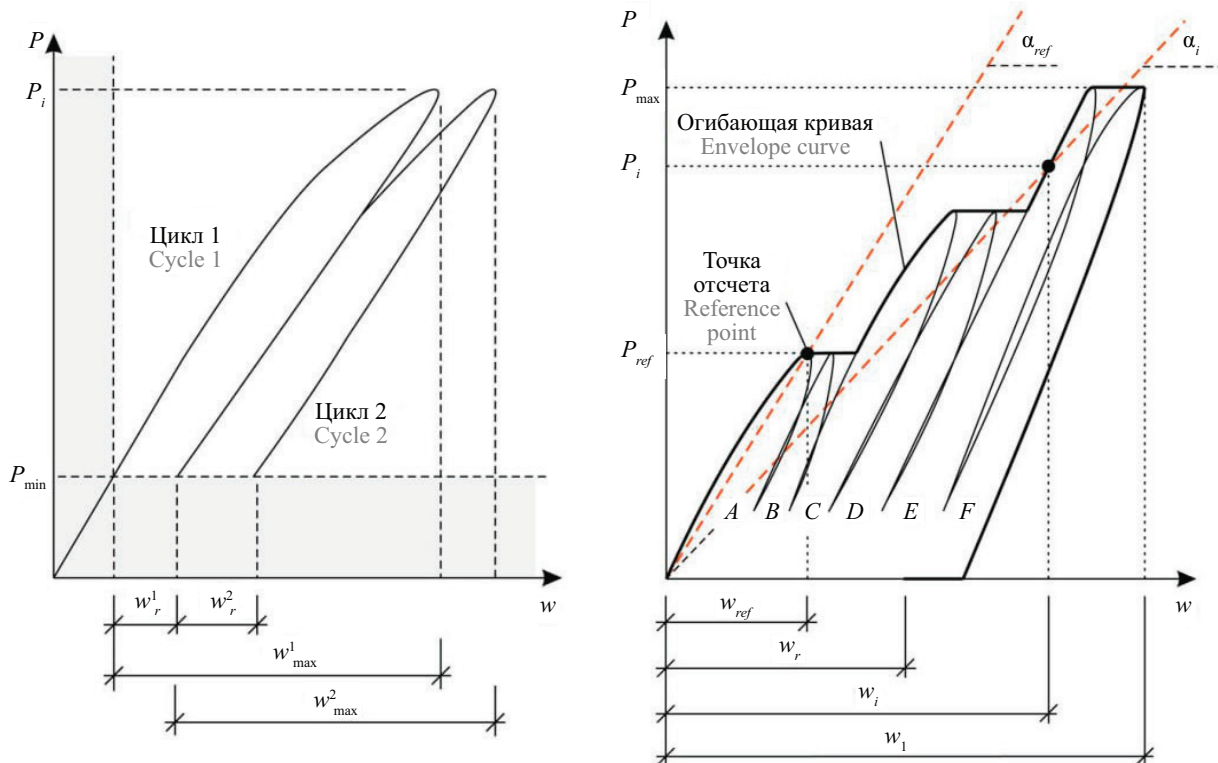


Рис. 5. Критерии оценки для испытания на циклическую нагрузку, согласно ACI 437.2–13

Fig. 5. Evaluation criteria for the cyclic load test, according to ACI 437.2–13

если максимальная деформация  $w_i$  удовлетворяет следующему уравнению:

$$w_i \leq \frac{l_t}{180}. \quad (11)$$

Повторное испытание считается пройденным, если остаточная деформация  $w_{rrt}$ , которая измеряется повторно через 24 ч после снятия нагрузки, удовлетворяет уравнению (12), где  $w_{i2}$  — максимальная деформация, измеренная во время второго испытания:

$$w_{rrt} \leq \frac{w_{i2}}{10}. \quad (12)$$

Уравнения (11) и (12) также применимы к испытанию на монотонную нагрузку с балластными массами в соответствии с ACI 437.2–13.

### Великобритания

Стандарт BS 8110–II<sup>17</sup> (до введения Еврокодов) содержал правила проведения экспериментальных испытаний армированных и предварительно напряженных ЖБК. Хотя эти правила в принципе предназначены для испытаний в период строительства или вскоре после него, они также использовались для экспериментальной оценки существующих конструкций [17, 18]. Даже в связи с заменой BS 8110 на Еврокод и отсутствием в нем обязательных требований по натурным испытаниям, рекомендации,

приведенные BS 8110–II, применяются и сегодня. В соответствии с BS 8110–II натурные испытания до расчетной нагрузки и испытания на разрушение должны осуществляться только в исключительных случаях. Цель состоит в том, чтобы продемонстрировать достаточную безопасность конструкций с помощью испытаний на уровне и немного выше эксплуатационной нагрузки, при которых измеренные деформации используются для калибровки теоретической расчетной модели и таким образом обеспечивают ее верификацию. Целевая испытательная нагрузка должна удовлетворять условиям в соответствии с уравнением:

$$G_k + Q_k \leq F_{Ziel} \leq \min \begin{cases} 1,0 \cdot G_k + 1,25 \cdot Q_k \\ 1,125 \cdot (G_k + Q_k) \end{cases}. \quad (13)$$

Испытательную нагрузку следует увеличивать и уменьшать постепенно. Максимальная нагрузка должна быть приложена не менее двух раз, а между испытаниями должно пройти не менее одного часа. Измеренные значения требуется считывать через 5 мин после приложения каждой нагрузки, чтобы измеренные значения успели стабилизироваться. 24-часовое испытание на выносливость при заданном уровне испытательной нагрузки не предусмотрено, но может быть выполнено при необходимости. Оценка измеренных деформаций производится путем сравнения с теоретически рассчитанными расчетными значениями. Если при испытании возникают значительные деформации, упругая остаточная деформация после второго этапа нагружения

<sup>17</sup> British Standard: Structural Use of Concrete, Part 2 — Code of Practice for special circumstances. British Standard Institution, 1989.

должна приблизительно соответствовать упругой остаточной деформации после первого этапа нагружения и составлять не менее 75 % для железобетона и не менее 85 % от общей деформации для предварительно напряженных бетонных конструкций. Прогибы и ширина трещин при эксплуатационных нагрузках также должны соответствовать требованиям стандарта. Если измеренные прогибы остаются меньше  $1/1000$  пролета, то нет необходимости оценивать остаточную деформацию.

Д.Н. Bungey [17] приводит анализ нагрузочных испытаний, проведенных в Великобритании, и рекомендует более высокие целевые испытательные нагрузки, поскольку безопасность, достигаемая при нагрузке, согласно уравнению (13), слишком низка. Например, Институт инженеров-строителей [19] предлагает испытательную целевую нагрузку в соответствии с формулой:

$$1,25 + (G_k + Q_k). \quad (14)$$

А автор другой работы [20] предлагает определять испытательную целевую нагрузку по выражению:

$$1,5 + (G_k + Q_k). \quad (15)$$

Исследователь J.B. Menzies [18] также предлагает более высокую испытательную целевую нагрузку (формула (16)), чтобы продемонстрировать достаточный запас прочности по отношению к эксплуатационной нагрузке:

$$1,4...1,5 \cdot (G_k + Q_k). \quad (16)$$

Согласно Д.Н. Bungey [17], для создания испытательных нагрузок обычно используется балласт, поскольку гидравлические системы считаются слишком дорогими, а необходимые соединительные элементы — слишком сложными.

Оценка результатов испытаний основана на диаграммах «нагрузки – деформации», регистрируемых по нарастающей, из которых можно извлечь различные признаки зарождающегося нелинейного деформационного поведения. Однако конкретные параметры или связанные с ними предельные значения в работе [17] не указаны.

### Другие страны

В Канаде испытания строительных конструкций на нагрузку регламентируются главой 20 канадского стандарта<sup>18</sup>. Из стандарта исключаются испытания предварительно напряженных конструкций без сцепления арматуры с бетоном, а также исключены конструкции с предполагаемым коррозионным повреждением. Целевая испытательная нагрузка должна соответствовать как минимум 90 % расчетной нагрузки, при переносе результатов одного испытания на другие аналогичные конструкции необходимо доказать, что единовременная сумма всех нагрузок должна составлять 100 % от значения расчетной

нагрузки. Дополнительная информация о переносе результатов испытаний на элементы, не прошедшие испытание, не приводится. Полная нагрузка должна быть приложена на испытываемой конструкции на 24 ч, а после еще 24 ч следует оценить остаточную деформацию. В случае предварительно напряженных элементов прогиб должен уменьшиться не менее чем на 80 %, а для железобетонных без преднапряжения — не менее чем на 60 %. Если эти условия не выполняются, можно провести повторное испытание. Это должно произойти примерно через 72 ч после первого испытания, при этом уменьшение прогиба должно быть не менее 75 %. Необходимо отметить, что в документе не указано, какие критерии должны быть использованы в качестве оценки несущей способности: деформации, трещины или что-то иное.

Австралийский стандарт AS 3600<sup>19</sup> содержит лишь несколько инструкций по проведению натурных испытаний обычных и предварительно напряженных железобетонных элементов. Для испытаний с целью определения предельного состояния существующих конструкций заданная испытательная нагрузка должна соответствовать проектной нагрузке, и ее требуется прикладывать к конструкции в постоянно возрастающем режиме. Во время деформации (прогиба), а также образования трещин следует внимательно наблюдать и, если есть признаки зарождающегося разрушения, испытание стоит отменить. Доказательство достаточной безопасности при нагрузке обеспечивается, если нагрузка была приложена в течение 24 ч, и конструктивный элемент не имеет признаков повреждения или чрезмерного трещинообразования. Испытания для проверки работоспособности проводятся при эксплуатационных нагрузках и оцениваются на основе критериев работоспособности, установленных в указанном стандарте.

В Швейцарии стандарт SIA 269<sup>20</sup> разрешает устанавливать несущую способность на существующих несущих конструкциях. Согласно этому стандарту, должно быть доказано, что при определенных нагрузках деформации остаются в пределах упругости и не возникает чрезмерных трещин, вибраций или смещений. Определенные реакции компонентов впоследствии интерпретируются с помощью соответствующей расчетной структурной модели. Утверждения о величине, продолжительности и типе нагрузки или деформаций, подлежащих измерению, не приводятся. Пример применения описан в труде [21], в котором используется гидравлическая генерация нагрузки, испытательная нагрузка увеличивается до 1,8 раз от эксплуатационной нагрузки в несколько этапов, и оценка состояния несущей способности выполняется на основе анализа величин деформации

<sup>19</sup> Concrete Structures. Australian Standard: AS 3600, Standards Australia, 2009.

<sup>20</sup> Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken (SIA 269). Schweiz. Ingenieur- und Architektenverein, 2011.

<sup>18</sup> Design of concrete Structures (A23.3–04). Canadian Standards Association, 2004.



под нагрузкой. Как именно прикладывается испытательная нагрузка, в работе [21] не указано.

В Италии стандарт на ЖБК<sup>21</sup> допускает проведение натуральных испытаний для новых элементов здания, но не дается конкретных указаний по их планированию, проведению и оценке [22]. Испытания должны выполняться только инженерами с опытом работы не менее десяти лет. В этом случае они несут полную ответственность за содержание испытаний и интерпретацию их результатов. В документе [22] даются только очень общие рекомендации. Так, согласно исследованию [22], нагрузка для статических испытаний должна увеличиваться небольшими шагами и оставаться постоянной для измерения деформаций. Целевая испытательная нагрузка определяется из эксплуатационных нагрузок в наихудшей комбинации. Деформации должны быть пропорциональны нагрузке, и не должно быть признаков разрушения (трещины, сколы). Постоянная деформация с учетом начальной пластической деформации не должна превышать определенную долю от максимальной деформации. Если это условие не выполняется, допускается приложение новой нагрузки до максимальной. В этом случае конструкция должна демонстрировать практически упругое поведение. Максимальные измеренные деформации не должны превышать расчетные значения [22].

Международная федерация по железобетону (fib) приводит основные инструкции<sup>22</sup> по проведению сопроводительных нагрузочных испытаний для проверки расчетных моделей или для проверки достаточной безопасности конструкции. Для проверки работоспособности целевая испытательная нагрузка должна, по крайней мере, соответствовать эксплуатационной нагрузке и не превышать  $(0,25 \times G_k + 1,25 \cdot Q_k)$ , и оставаться приложенной в течение 24 ч, чтобы деформации могли стабилизироваться. При проведении испытаний для определения безопасности конструкции должно быть доказано, что существует достаточный запас до рабочей нагрузки, при этом минимальное значение запаса не устанавливается. Нагрузку следует увеличивать с шагом от пяти до десяти этапов и контролировать соответствующие деформации. Промежуточная разгрузка не предусмотрена. Если начинают возникать нелинейные деформации, нагрузку следует поддерживать постоянной, чтобы иметь возможность наблюдать за развитием деформаций. В случае прогрессирующих деформаций, необходимо немедленно разгрузить конструкцию и зарегистрировать деформацию.

Нагрузка может создаваться балластными массами, при этом вода считается авторами документа

наиболее подходящим методом нагружения. Использование гидравлических систем нагружения считается дорогостоящим из-за необходимости сложной системы их крепления. Деформации должны быть сопоставлены с ранее установленными предельными значениями, и в результате испытания не должна нарушаться работоспособность испытуемого элемента.

Во время испытания следует исключить значительное увеличение развития трещин и деформаций. Как и в итальянском стандарте, в примечании указывается, что для проведения таких испытаний требуется многолетний опыт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ разных нормативных актов показывает, что подход, используемый в различных национальных стандартах, носит, в основном, традиционный характер. Отличительной особенностью этого подхода является ориентация рекомендаций по применению балластных масс для нагружения испытываемой конструкции. Поскольку невозможно получить непрерывную линию зависимости «нагрузка – деформации» из-за пошагово увеличивающейся экспериментальной нагрузки, уровень оценки результатов испытаний довольно ограничен. Могут применяться только простые критерии оценки, такие как соотношение постоянной и максимальной деформации, но они не могут быть признаны в качестве реальных критериев предельного состояния. Кроме того, использование балласта из-за скрытой опасности обрушения сопряжено с высоким риском повреждений и материального ущерба. По указанным причинам описанный подход считается некоторыми исследователями неудовлетворительным еще 60 лет назад [23] и остается таковым по сей день. Это может быть причиной того, что натурные испытания существующих конструкций с оценкой их несущей способности в странах с традиционными или очень мягкими нормами проектирования применяются довольно редко. По крайней мере, об этом свидетельствует полное отсутствие публикаций с примерами использования таких испытаний в соответствующей специальной литературе.

В то же время известно лишь несколько зарубежных исследований, посвященных дальнейшему развитию метода экспериментальной оценки несущей способности существующих конструкций, например в Германии в 1980-х и 1990-х гг. Некоторые авторы [17] приходят к выводу о том, что испытания под нагрузкой с использованием гидравлических нагружающих технологий являются более сложными и дорогостоящими, но другие исследователи [3, 7] с этим не согласны. По мнению последних, если такая технология нагружения доступна для проведения испытаний, то испытания можно проводить значительно быстрее и безопаснее.

Технология гидравлического нагружения, особенно при нагружении нескольких однотипных эле-

<sup>21</sup> Norme tecniche per le costruzioni. Decreto del Ministero dei trasporti e delle Infrastrutture, Gazzetta Ufficiale, 2005.

<sup>22</sup> Management, maintenance and strengthening of concrete structures. Schriftenreihe der fédération internationale du béton (fib) bulletin 17, Lausanne, 2002.

ментов, по мнению исследователей [3, 7], имеет явные экономические преимущества благодаря быстрой возможности нагружения и разгрузки, а также малой массе, перемещаемой в конструкции. Дополнительным положительным фактором можно считать то, что качество оценки результатов испытаний повышается, так как технология гидравлического нагружения в сочетании с цифровой системой сбора данных может быть использована для получения непрерывно регистрируемых кривых нагрузки и разгрузки, из которых затем могут быть выведены различные расширенные критерии оценки, например, в соответствии с немецким Руководством по нагрузочным испытаниям и АСІ 437.

Однако применение технологии гидравлического нагружения связано со сравнительно высокими первоначальными капиталовложениями, а для ее использования также требуется соответствующим образом обученный персонал. В противном случае, использование гидравлических систем нагружения не имеет смысла, если натурные испытания не внедрены в инженерную практику и используются только в исключительных случаях. Стоит отметить, что в нашей стране гидравлические системы нагружения действительно не внедрены в широкую практику выполнения натурных испытаний на объектах строительства, а применяются в основном штучные грузы (балластные массы).

Еще одной важной характеристикой отдельных стандартов является величина испытательной нагрузки, которая должна быть приложена в случае, если необходимо экспериментально продемонстрировать несущую способность конструкции. Здесь реализуются разные подходы. В некоторых случаях нет выраженной связи между коэффициентами надежности, используемыми в расчете, и нормированием экспериментальной нагрузки. Такие нормативные документы, как BS 8110-II, предполагают, что уровень несущей способности, установленный при сравнительно низких испытательных нагрузках, может быть экстраполирован на расчетное предельное состояние несущей способности (при полном значении расчетной нагрузки). Однако в случае с железобетонными элементами это предположение не надежно обоснованно и может быть принято только в исключительных случаях при наличии необходимой информационной базы для существующих конструкций. Для испытания на несущую способность отдельно исследуемой конструкции

(т.е. без экстраполяции установленного уровня несущей способности) приложенные целевые испытательные нагрузки должны оцениваться как слишком низкие [12].

Утверждения по ключевому для экспериментальных исследований несущей способности существующих конструкций вопросу о возможности экстраполяции результатов испытаний единичного образца на совокупность сходных образцов отсутствуют в большинстве рассмотренных нормативных документов. Исключения — стандарт АСІ 437 и стандарт Канады. Однако в обоих случаях проблема решается с небольшим отличием путем указания общего увеличения нагрузки, а это означает, что изменения, возникающие в конкретном случае, лишь частично отражаются в соответствующих параметрах.

В статье представлен аналитический обзор международного состояния нормирования по методам экспериментальной оценки безопасности существующих ЖБК.

Во многих странах мира отдельный стандарт на проведение натурных испытаний существующих конструкций, входящих в состав несущей системы, либо отсутствует, либо не содержит полные и исчерпывающие требования к выполнению таких испытаний. В Российской Федерации стандарт на осуществление натурных испытаний существующих конструкций отсутствует.

Установлено, что большинство стандартов описывают традиционный подход, основанный на использовании балластных масс (штучных грузов) для формирования нагрузки и определяют упрощенные критерии оценки несущей способности.

Исключениями из этого правила являются руководство ФРГ по натурным испытаниям и нормы США, в которых описаны особенности, учитывающие применение технологии гидравлического нагружения испытываемой конструкции, а также критерии оценки, вытекающие из непрерывных взаимосвязей между нагрузкой и деформацией.

В РФ требуется разработка национального стандарта на проведение натурных испытаний существующих конструкций, входящих в состав несущей системы, в котором должны быть определены требования к выполнению таких испытаний, необходимые методы нагружения, а также критерии оценки несущей способности конструкции на основе экспериментальных результатов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Bolle G., Schacht G., Marx S. Geschichtliche Entwicklung und aktuelle Praxis der Probelastung — Teil 1: Geschichtliche Entwicklung im 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts. *Bautechnik*. 2010; 87(11):700-707. DOI: 10.1002/bate.201010047

2. Bolle G., Schacht G., Marx S. Geschichtliche Entwicklung und aktuelle Praxis der Probelastung — Teil 2: Entwicklung von Normen und heutige Anwendung. *Bautechnik*. 2010; 87(12):784-789. DOI: 10.1002/bate.201010052

3. Marx S., Maas H.-G., Schacht G., Koschitzki R., Bolle G. Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen. *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Zukunft Bau"*. 2011.
4. Schacht G. *Experimentelle Bewertung der Schubtragsicherheit von Stahlbetonbauteilen: Dissertation*. Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, 2014.
5. Marx S., Schacht G., Bolle G. Kapitel 7 – Bewertung der Tragfähigkeit auf Grundlage von Belastungsversuchen. *Fingerloos, F.; Schnell, J.; Marx, S. (Hrsg.): Tragwerksplanung im Bestand, Betonkalender*. 2015.
6. Opitz H., Quade J. 10 Jahre Richtlinie des DAfStb "Belastungsversuche an Betonbauwerken". Erfahrungen und Ausblick. *6 Symp.Exp. Untersuchung von Baukonstruktionen, TU Dresden, Schriftenreihe Konstr. Ingenieurbau(kid), Heft 24*. 2011; 81-94.
7. Steffens K. *Experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Bauwerken: Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. Berlin, Ernst & Sohn, 2002.
8. Marx S., Schacht G., Maas H.-G., Liebold F., Bolle G. Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen II. *Abschlussbericht Zukunft Bau*. IRB Verlag Fraunhofer, 2013.
9. Czentner G., Fiedler L., Kapphahn G., Steffens K. Deutsches Archäologisches Institut DAI in Rom. *Bautechnik*. 2010; 87(3):127-132. DOI: 10.1002/bate.201010010
10. Gutermann M., Schröder C. 10 Jahre Belastungsfahrzeug BELFA. *Bautechnik*. 2011; 88(3):199-204. DOI: 10.1002/bate.201110020
11. Bretschneider N., Fiedler L., Kapphahn G., Slowik V. Technische Möglichkeiten der Probelastung von Massivbrücken. *Bautechnik*. 2012; 89(2):102-110. DOI: 10.1002/bate.201100010
12. Spaethe G. Die Beeinflussung der Sicherheit eines Tragwerks durch Probelastung. *Bauingenieur*. 1994; 69(12):459-468.
13. Manleitner S., Opitz H., Steffens K. Belastungsversuche an Betonbauwerken — Eine neue Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2001; 96(7):488-494. DOI: 10.1002/best.200100580
14. Bolle G. *Zur Bewertung des Belastungsgrades biegebeanspruchter Stahlbetonbauteile anhand von Last-Verformungs-Informationen: Dissertation*. Bauhaus Universität Weimar, 1999.
15. Mettemeyer M., Serra P., Wuerthele M., Schuster G., Nanni A. Shear Load Testing of Carbon Fiber Reinforced Polymer Strengthened Double Tee Beams in Precast Parking Garage. *SP-188: 4th Intl Symposium — Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*. 1999. DOI: 10.14359/5696
16. Casadei P., Parretti R., Nanni A., Heinze T. In Situ Load Testing of Parking Garage Reinforced Concrete Slabs: Comparison between 24 h and Cyclic Load Testing. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2005; 10(1):40-48. DOI: 10.1061/(asce)1084-0680(2005)10:1(40)
17. Bungey J.H., Millard S.G. *Testing of Concrete in Structures*. 3rd Ed. Blackie Academic, 2006.
18. Menzies J.B. Loading testing of concrete building structures. *Structural Engineer*. 1978; 56(12):347-353.
19. Report of working party on high alumina cement. *Structural Engineer*. 1976; 54(9):352-361.
20. Lee C.R. *Load testing of concrete structures, with particular reference to CP110 and experience in the HAC Investigations*. Build. Research, Dok. B507. 1977.
21. Egger G. Statische Belastungsversuche an Gebäudedecken. *Schweizer Ingenieur und Architekt*. 1998; 116(36):644-647.
22. Casadei P., Deluca A., Serafini R., Agneloni E. Assessment of Concrete Structures through In-Situ Load Testing: An Italian Prospective. *The Second FIB International Congress*. 2006.
23. Röbert S. *Kritische Einschätzung der Probelastungen an Stahlbetonbiegeträgern nach DIN 1045 § 7 unter besonderer Berücksichtigung der Verformungsberechnung: Dissertation*. TU Dresden, 1957.

Поступила в редакцию 24 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2024 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Олег Васильевич Кабанцев** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 659725, Scopus: 15055871000, ResearcherID: T-3937-2017, ORCID: 0000-0001-9907-8470; ovk531@gmail.com;

**Андрей Евгеньевич Лапинов** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, заведующий лабораторией обследования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 900733, Scopus: 57204882288, ResearcherID: AFN-5244-2022, ORCID: 0000-0002-7340-0617; la686@yandex.ru.

Вклад авторов:

Кабанцев О.В. — научное редактирование текста, концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

*Лапшинов А.Е. — идея, сбор и обработка материала, перевод зарубежных источников, написание исходного текста, итоговые выводы.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Received May 24, 2024.*

*Adopted in revised form on June 26, 2024.*

*Approved for publication on June 26, 2024.*

**BIONOTES:** **Oleg V. Kabantsev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 659725, Scopus: 15055871000, ResearcherID: T-3937-2017, ORCID: 0000-0001-9907-8470; ovk531@gmail.com;

**Andrey E. Lapshinov** — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Head of the Laboratory for Surveying Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 900733, Scopus: 57204882288, ResearcherID: AFN-5244-2022, ORCID: 0000-0002-7340-0617; la686@yandex.ru.

*Contribution of the authors:*

*Oleg V. Kabantsev — scientific editing of the text, conceptualization, supervision, final conclusions.*

*Andrey E. Lapshinov — idea, data gathering and processing, translation, writing of the article, final conclusions.*

*The authors declare that they have no conflicts of interest.*