

УДК 624.012

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-5\(630\)-30-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-5(630)-30-41)

**Н.Н. ТРЕКИН^{1,2}, Э.Н. КОДЫШ², С.Д. ШМАКОВ^{2,3,✉}, Д.П. ЛЕЛЕТКО²,
А.Б. ЧАГАНОВ⁴**

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

² АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»), Дмитровское шоссе, д. 46, к. 2, г. Москва, 127238, Российская Федерация

³ ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)), ул. Образцова, д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (ВятГУ), ул. Московская, д. 36, Кировская область, г. Киров, 610000, Российская Федерация

ФАКТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ИЗГИБАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ НАГРУЖЕНИЯ

Аннотация

Введение. Анализируются требования действующих нормативных и технических документов по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения, а также отдельные способы защиты. Рассматривается целесообразность совершенствования теории расчета несущих железобетонных элементов не только на стадии работы элемента до границы первого предельного состояния, но и на стадии особого предельного состояния. Приведены резервы по прочности и деформативности изгибаемых элементов.

Цель. Экспериментальная проверка гипотезы перемещения нейтральной оси изгибаемого элемента в процессе нагружения и уточнения его величины, в том числе на этапе особого предельного состояния.

Материалы и методы. Экспериментальное исследование проведено путем испытания опытных образцов изгибаемых элементов. Загружение однопролетной свободно опертой железобетонной балки производилось двумя сосредоточенными нагрузками через распределительную траверсу в третях пролета. Представлено описание экспериментальной установки, характеристик материалов и опытных образцов, а также средств измерений, используемых для получения экспериментальных данных об изменении напряженно-деформированного состояния изгибае-

мого элемента на всех стадиях его работы, включая стадию снижения несущей способности (разупрочнение).

Результаты. В статье приводится первая часть результатов анализа экспериментальных исследований (стадия нагружения от $0,8 M_{ult}$ до M_{ult}), направленных, в том числе, на определение критериев особого предельного состояния для изгибаемых железобетонных элементов. Приводится анализ полученных расчетных и экспериментальных значений относительных деформаций бетона и арматуры, а также изгибающих моментов, определенных на стадиях деформирования. Разработана и представлена для обсуждения методика определения напряженно-деформированного состояния конструкции на различных этапах нагружения, основанная на уравнении равновесия внешних и внутренних сил, действующих в сечении железобетонного элемента с учетом изменения положения нейтральной оси.

Выводы. Погрешность теоретических результатов, полученных при помощи разработанной авторами методики определения напряженно-деформированного состояния конструкции в сравнении с экспериментальными данными на стадии нагружения от $0,8 M_{ult}$ до M_{ult} , составила до 3–5 % в зависимости от стадии деформирования. Гипотеза изменения положения нейтральной оси, изложенная в разрабо-

танной методике и подтвержденная экспериментальными исследованиями, будет опубликована в последующих работах авторов.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, изгибаемый элемент, аналитическая модель, методика расчета, предельное состояние, уравнения равновесия, изменение положения нейтральной оси, экспериментальная работа, результаты исследования

Для цитирования: Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Шмаков С.Д., Лелетко Д.П., Чаганов А.Б. Фактическое напряженно-деформированное состояние железобетонного изгибаемого элемента на различных этапах нагружения // *Бетон и железобетон*. 2025. № 5 (630). С. 30–41. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-5\(630\)-30-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-5(630)-30-41). EDN: ZYNWFB

Вклад авторов

Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н. – постановка задачи и общее руководство.

Шмаков С.Д. – разработка программы испытания, подготовка и проведение экспериментального исследования, анализ результатов исследования, разработка методики расчета.

Лелетко Д.П. – анализ результатов исследования.

Чаганов А.Б. – подготовка и проведение экспериментального исследования.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.08.2025

Поступила после рецензирования 30.09.2025

Принята к публикации 02.10.2025

**N.N. TREKIN^{1,2}, E.N. KODYSH², S.D. SHMAKOV^{2,3,✉}, D.P. LELETKO²,
A.B. CHAGANOV⁴**

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

² Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions – TsNII-Promzdaniy (TsNIIPromzdaniy JSC), Dmitrovskoe shosse, 46, bld. 2, Moscow, 127238, Russian Federation

³ Russian University of Transport (MILT), Obraztsova str., 9, bld. 9, Moscow, 127994, Russian Federation

⁴ Vyatka State University, Moskovskaya str., 36, Kirov region, Kirov, 610000, Russian Federation

ACTUAL STRESS–STRAIN STATE OF A REINFORCED CONCRETE BENDING ELEMENT AT VARIOUS STAGES OF LOADING

Abstract

Introduction. This article analyzes the requirements of current regulatory and technical documents for the protection of buildings and structures from progressive collapse, as well as individual protection methods. The feasibility of improving the load-bearing reinforced concrete elements calculation theory, not only during the element's service life up to the first special limit state, but also during the special limit state is discussed. Reserves for the strength and deformability of flexural elements are presented.

Aim. To experimentally verify the hypothesis of the neutral axis of a flexural element displacement during load-

ing and to refine its magnitude, including during the special limit state.

Materials and methods. The experimental study was conducted by testing prototypes of flexural elements. A single-span, simply supported reinforced concrete beam was loaded with two concentrated loads through a distribution crossbeam at one thirds of the span. This article describes the experimental setup, characteristics, and prototypes, as well as the measuring instruments used to obtain experimental data on changes in the stress-strain state of a flexural element at all stages of its operation, including the stage of reduced bearing capacity (softening).

Results. This article presents the first part of the results

of an analysis of experimental studies (loading stage from $0,8 M_{ult}$ to M_{ult}), aimed, among other things, at determining the criteria for the special limit state of flexural reinforced concrete elements. An analysis of the calculated and experimental values of the relative deformations of concrete and reinforcement, as well as the bending moments determined at the deformation stages, is presented. A methodology for determining the stress-strain state of a structure at various loading stages has been developed and presented for discussion. This methodology is based on the equilibrium equation for external and internal forces acting in the cross-section of a reinforced concrete element, taking into account changes in the position of the neutral axis. *Conclusions.* The error in the theoretical results obtained using the authors' methodology for determining the stress-strain state of a structure, compared to experimental data obtained at the loading stage from $0,8 M_{ult}$ to M_{ult} , was up to 3–5 %, depending on the deformation stage. The hypothesis for changes in the neutral axis position, outlined in the developed methodology and confirmed by experimental research, will be published in the authors' subsequent papers.

Keywords: reinforced concrete structures, bending element, analytical model, calculation method, limit state, equilibrium equations, change in the position of the neutral axis, experimental work, research results

For citation: Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Leletko D.P., Chaganov A.B. Actual stress-strain state of a reinforced concrete bending element at various stages of loading. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 5 (630), pp. 30–41. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-5\(630\)-30-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-5(630)-30-41). EDN: ZYNWFB

Authors contribution statement

Trekin N.N., Kodysh E.N. – conceived the problem and provided general guidance.

Shmakov S.D. – developed the test program, prepared and conducted the experimental study, analyzed the study results, and developed the calculation methodology.

Leletko D.P. – analyzed the study results.

Chaganov A.B. – prepared and conducted the experimental study.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.08.2025

Revised 30.09.2025

Accepted 02.10.2025

Редколлегия журнала «Бетон и железобетон» поздравляет доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки РФ, почетного строителя, почетного члена РААСН, главного научного сотрудника ОКС АО «ЦНИИПромзданий» Эмиля Наумовича Кодыша с 92-м днем рождения!

Уважаемый Эмиль Наумович!

Примите наши искренние поздравления с днем рождения и пожелания отличного здоровья на долгие годы, дальнейших успехов в профессиональной деятельности, благополучия и процветания! Мы благодарны, что своим научным авторитетом Вы поддерживаете журнал, являетесь постоянным автором и рецензентом, помогаете добрым советом!

Введение

В настоящее время при проектировании зданий и сооружений повышенного уровня ответственности необходимо выполнять требование по учету аварийной расчетной ситуации (часть 6 статьи 16 Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ [1]). Положения [1] конкретизированы в ряде нормативных и технических документов, таких как ГОСТ 27751-2014 [2], СП 385.1325800.2018 [3], СП 296.1325800.2017 [4] и др.

Защита от прогрессирующего обрушения, согласно положениям СП 385.1325800.2018 [3], необходима как для вновь проектируемых, так и для реконструируемых объектов строительства. Перечень зданий и сооружений, для которых требуется выполнять расчет на аварийную ситуацию и обеспечивать защиту от прогрессирующего обрушения, определен в п. 5.2.6 ГОСТ 27751-2014 [2]. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения может производиться с применением конструктивных и организационно-технических мероприятий [5–7]. В настоящее время ведется дискуссия о внедрении риск-ориентированного подхода и активно проводятся научные исследования.

Выполнение условий обеспечения целостности зданий и сооружений при наступлении аварийной ситуации, в случае проектирования объекта строительства с соблюдением критериев первого и второго предельных состояний, может приводить к удорожанию строительства. Снижению затрат на защиту зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения способствует использование резервов прочности и деформативности строительных конструкций [8, 9]. В настоящее время данный подход реализован введением особого предельного состояния, возникающего после превышения установленных в нормах критериев несущей способности конструкций по первой группе предельных состояний, допускающего развитие больших пластических деформаций в пределах, сохраняющих геометрическую неизменяемость конструктивной схемы сооружения и частичное разрушение сечений, при которых они не обеспечивают функциональные требования, предъявляемые к зданию или сооружению, а дальнейшее увеличение нагрузок и воздействий приводит к их разрушению. Критерии особого предельного состояния представлены в СП 385.1325800.2018 [3].

Потребность в уточнении критериев особого предельного состояния приводит к необходимости совершенствования теории расчета конструктивных элементов не только на стадии работы элемента до его максимальной несущей способности ($M = M_{ult}$ для изгибаемых железобетонных элементов), но и за ее пределами, на стадии разупрочнения.

В настоящее время в научно-технической литературе представлено незначительное количество данных о работе железобетонных элементов на стадии

ях, близких к исчерпанию его несущей способности, а также на стадии разупрочнения [9]. По имеющимся экспериментальным [10–13] и теоретическим [14–19] данным, при выполнении нормативных требований по прочности и деформативности материалов арматуры и бетона, а также при отсутствии дефектов в конструкциях имеются резервы по прочности до 25 %, а по деформативности – до 35 %, по сравнению с теоретическими данными, полученными на базе расчетов по нормативным документам [8].

Цель

Экспериментальная проверка гипотезы перемещения нейтральной оси изгибаемого элемента в процессе нагружения, в том числе на этапе особого предельного состояния и уточнения его критериев.

Материалы и методы

Для подтверждения гипотезы перемещения нейтральной оси изгибаемого элемента в процессе нагружения, в том числе на этапе особого предельного состояния и уточнения его критериев, были проведены экспериментальные исследования, выполненные на специально разработанной установке (рис. 1).

Для получения полных диаграмм деформирования бетона и арматуры изгибаемого элемента, в том числе на стадии разупрочнения (разрушения), нагружение железобетонной балки производилось контролируемым перемещением. Загружение однопролетной свободно опертой железобетонной балки производилось двумя сосредоточенными нагрузками через распределительную траверсу в третях пролета 32-тонным механическим домкратом с контролем перемещений до 0,005 мм. Контроль перемещений траверсы производился установленным на ней индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм.

Контроль усилий, возникающих на опорах, а также непосредственно на траверсе, производился с помощью динамометрических опор. Для измерения деформаций использовались тензорезисторы марки TML с базой 5 и 50 мм сопротивлением 120 Ом, а также цифровые головки (индикаторы часового типа) NORGAU Industrial 12.7/0.5», NID-1201 с ценой деления 0,001 мм.

Для экспериментальных исследований были изготовлены четыре серии изгибаемых элементов сечением 180(н) × 100 мм и длиной 2000 мм (расчетная длина 1800 мм), отличающиеся классом бетона и процентом армирования.

Рабочая (растянутая) арматура класса A500 размещалась в нижней части сечения и была представлена, в зависимости от серии, в виде двух стержней диаметром 12 и 16 мм соответственно. Сжатая арматура размещалась в верхней части сечения и была представлена в виде двух стержней диаметром 6 мм класса A500 для всех рассматриваемых образцов.

Поперечное армирование выполнялось из арматуры класса А500 диаметром 6 мм в виде гнутых хомутов с шагом 75 мм в крайних третях балки

и 150 мм в ее центральной части. Характеристики образцов представлены в табл. 1. Схема армирования образцов представлена на рис. 2.



Рис. 1. Фотография установки для проведения натурного эксперимента
Fig. 1. Photo of the setup for conducting a full-scale experiment

Таблица 1

Характеристики испытываемых образцов

Table 1

Characteristics of the tested samples

№	Маркировка образца (серия)	Ø арматуры, мм		Класс бетона	Кол-во, шт.
		растянутой (Ø s)	сжатой (Ø 's)		
1	Ш16-B25	2 Ø 16	2 Ø 6	B25	4
2	Ш12-B25	2 Ø 12			4
3	Ш16-B30	2 Ø 16		B30	4
4	Ш12-B30	2 Ø 12			4

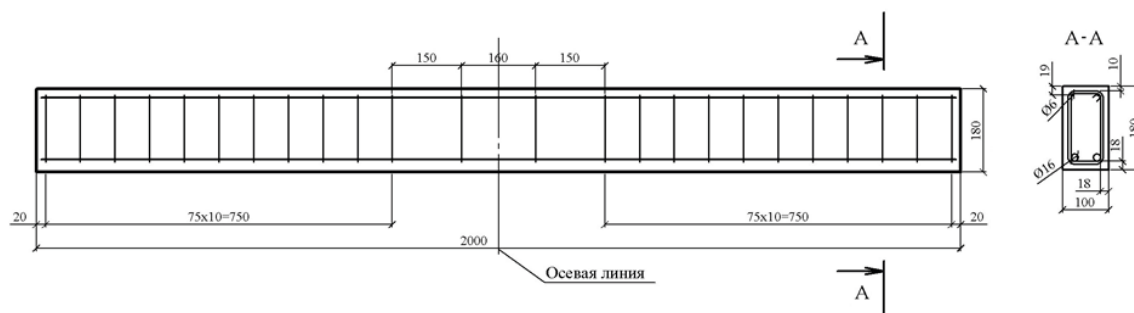


Рис. 2. Схема армирования балок
Fig. 2. Beam reinforcement scheme

В центральном сечении и в дополнительном сечении в 150 мм от центрального измерялись относительные деформации бетона и рабочей арматуры с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм, расположенных на специально установленных закладных деталях, путем установки тензорезисторов, а также с применением датчиков напряжения [20, 21], размещаемых в сжатой зоне бетона балок.

Также при проведении эксперимента определялись прогибы изгибаемого элемента в 7 точках по его длине, в том числе на опорах и в центральной части сечения. Определение прогибов производилось с применением индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм, а также с применением потенциометров с чувствительностью, равной 0,005 мм.

Результаты экспериментальных исследований

Сравнение экспериментально полученных данных по несущей способности с расчетными показывает удовлетворительную сходимость по предельному разрушающему моменту (от 1 до 5 %) в случае применения в расчете характеристик, полученных при испытании материалов: $R_s = \sigma_r$; $R_b = B$; $A_s = A_{s \text{ эксп.}}$ (табл. 2). В случае применения расчетных характеристик материалов с нормируемым коэффициентом надежности по арматуре и бетону, запасы по прочности составляют от 18 до 25 % (табл. 2). На рис. 3 показан опытный образец после испытаний.

Метод определения напряженно-деформированного состояния сечения с учетом изменения положения нейтральной оси

Для выявления безопасных границ особого предельного состояния важным является изучение механизма работы сечения изгибаемого элемента не только на стадии деформирования до максимальной несущей

способности, но и за ее пределами, на стадии разрушения. Одним из наиболее значимых параметров механизма разрушения железобетонного элемента является изменение высоты сжатой зоны сечения, происходящее на разных этапах его загрузки как при росте воспринимаемой нагрузки, так и на стадии ее снижения, происходящее за счет выключения из работы (разрушения) наиболее сжатых слоев бетона. Авторами предложена методика расчета, позволяющая учитывать изменение высоты сечения конструктивного элемента во время деформирования с учетом изменения положения нейтральной оси.

Для определения сходимости математической (аналитической) модели, изменения нейтральной оси, а также изменения высоты сжатой зоны бетона с экспериментальными данными рассматривался цикл нагружения конструктивного элемента от $M = 0,8 M_{ult}$ до $M = M_{ult}$, исходя из того, что высота сечения h при M_{ult} равняется начальной высоте сечения ($h = const$).

Прочность нормальных сечений железобетонных элементов обеспечена, если выполняются условия равновесия внешних и внутренних сил. Внутренние усилия определялись по нормальным напряжениям в сечении, возникающим от изгибающего момента M , находящегося в сечении (рис. 4). Согласно рис. 4, поперечное сечение разделяется на малые участки, при этом напряжения в пределах малых участков принимают равномерно распределенными (усредненными). Для бетона внутренние усилия определяются путем численного интегрирования напряжений по нормальному сечению. Таким образом, условие прочности будет состоять из уравнения равновесия проекции внутренних и внешних сил на нормаль к плоскости рассматриваемого сечения $\Sigma N = 0$ и уравнений равновесия изгибающих моментов внешних и внутренних усилий в плоскости оси $X - \Sigma M_x = 0$.

Таблица 2

Сводная таблица результатов экспериментальной работы по M_{ult}

Table 2

Summary table of the results of experimental work for M_{ult}

Марка образца	Класс бетона	M_{ult} эксп., кг×м	M_{ult} расч. реальные хар. матер., кг×м ($R_{cs} = 400$ МПа)	M_{ult} эксп./ M_{ult} расч. реальные хар. матер.	M_{ult} расч. расч. хар., кг×м	M_{ult} эксп./ M_{ult} расч. расч. хар.
Ш12-2	B30	1901,6	1841	1,033	1532	1,241
Ш12-4	B25	1833,2	1787	1,026	1490	1,230
Ш12-6	B25	1854,0	1797	1,032	1490	1,244

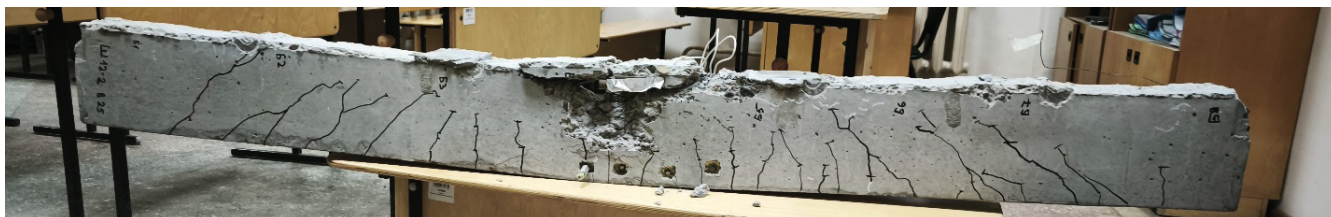


Рис. 3. Фотография конструктивного элемента после завершения испытания
Fig. 3. Photo of the structural element after the test completion

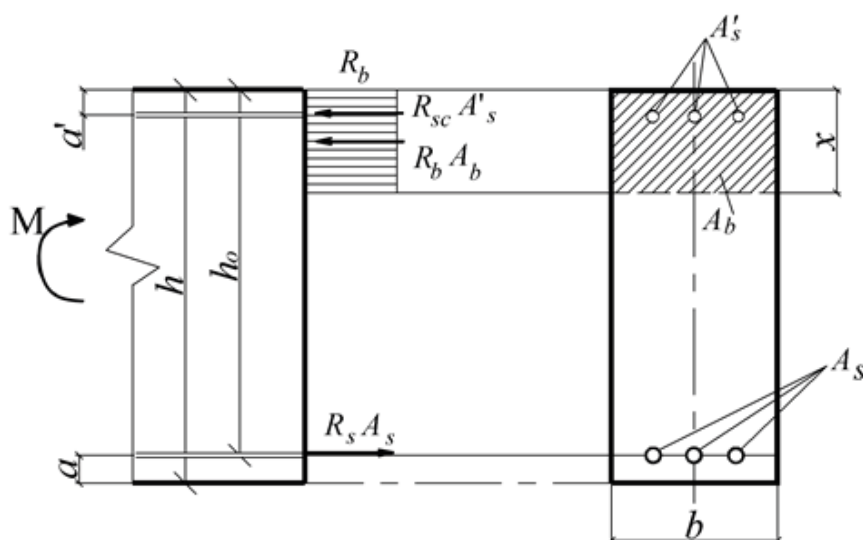


Рис. 4. Расчетная схема нормального сечения изгибаемого элемента
Fig. 4. Calculation scheme of the normal section of a bending element

Очевидно, что на стадиях деформирования изгибаемого элемента от $M = 0$ до $M = M_{ult}$ выполняется условие:

$$M_{\text{вн.сил}} = M_b + M_{bt} + M_s + M_{sc}$$

при соблюдении уравнения равновесия $N_b = N_s$.

Ввиду наличия на рассматриваемой стадии нагружения поперечных трещин в растянутой зоне бетона, для упрощения расчета примем значение момента растянутой зоны бетона равным нулю ($M_{bt} = 0$).

Для простоты вычислений, составив уравнение моментов относительно середины сечения изгибаемого элемента ($\frac{h}{2}$), получаем следующее:

$$M_{\text{вн.сил}} = R_s \times A_s \times \left(\frac{h}{2} - a\right) + R_b \times x \times b \times \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2}\right) + R_{sc} \times A_{sc} \times \left(\frac{h}{2} - a'\right).$$

Определим R_s через сумму моментов бетона и арматуры относительно центра сечения:

$$\frac{M_{\text{вн.сил}} - R_b \times x \times b \times \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2}\right) - R_{sc} \times A_{sc} \times \left(\frac{h}{2} - a'\right)}{\left(\frac{h}{2} - a\right)} = R_s \times A_s.$$

Представим $R_s = E_s \times \varepsilon_s$, тогда

$$\sigma_s = E_s \times \varepsilon_s \times A_s.$$

Выразим напряжения, возникающие в бетоне:

$$M_{\text{вн.сил}} - \sigma_s \times \left(\frac{h}{2} - a\right) - R_{sc} \times A_{sc} \times \left(\frac{h}{2} - a'\right) = R_b \times x \times b \times \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2}\right).$$

Экспериментально получены значения относительных деформаций арматуры (ε_s) и ее площади, переменные R_s и A_s известны в каждый момент деформирования изгибаемого элемента.

Задавая известные значение R_s и ε_s , исходя из уравнения равновесия, методом перебора определим высоту сжатой зоны x , положение нейтральной оси (пример фрагмента визуализированной эпюры напряжений бетона (образец Ш12-6)) при $M = M_{ult}$ представлен на рис. 5.

Максимально достигаемые краевые деформации ε_b и ε_{sc} , соответствующие деформациям бетона данного слоя на интересующей стадии деформирования изгибаемого элемента, определялись с применением трехлинейной диаграммы деформирования бетона.

Алгоритм проведения расчета представлен на рис. 6.

Пример графика « $M/M_{ult} - f/l$ » для образца Ш12-6 представлен на рис. 7.

Напряжения, возникающие в арматурных стержнях, определялись исходя из экспериментально полученных зависимостей « $\sigma_s - \varepsilon_s$ » арматуры опытных балок.

Учитывалось, что после достижения арматурой относительных деформаций, равных пределу текучести, напряжения в арматуре будут приниматься $\sigma_s = \sigma_{st}$.

Применение такого подхода, в отличие от расчета с изначально заданным значением $\varepsilon_{b2} = \varepsilon_{built}$ (принималось равным 0,0035), позволяет получить сходимость аналитической модели и экспериментальных данных как по значению высоты сжатой зоны, так и по достигаемым относительным деформациям арматуры (ε_s) с погрешностями до 3–5 % в зависимости от стадии деформирования (табл. 3).

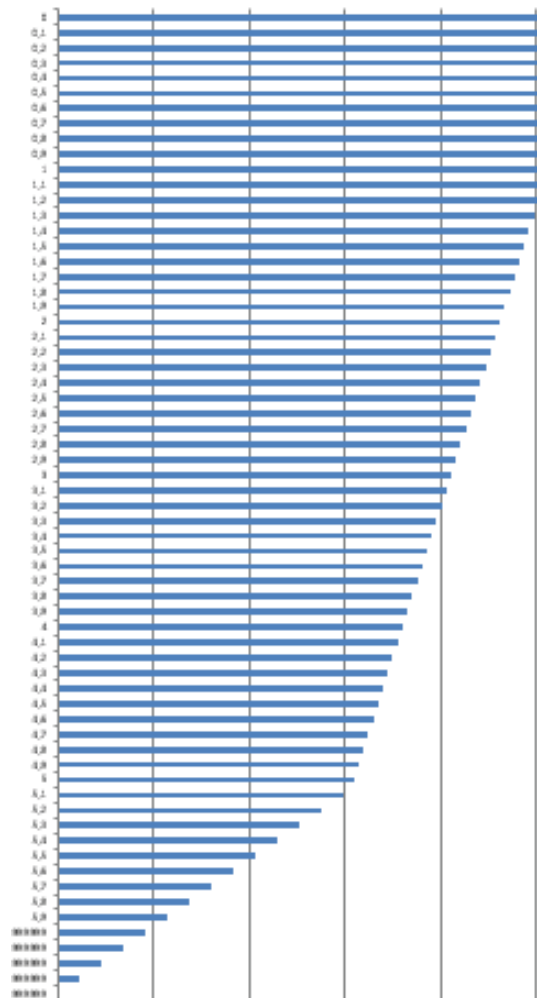


Рис. 5. Пример визуализированного фрагмента эпюры усилий в бетоне сжатой зоны (образец Ш12-6) при $M = M_{ult}$
Fig. 5. Illustration of a visualized fragment of the stress diagram in concrete in the compressed zone (sample Sh12-6) at $M = M_{ult}$

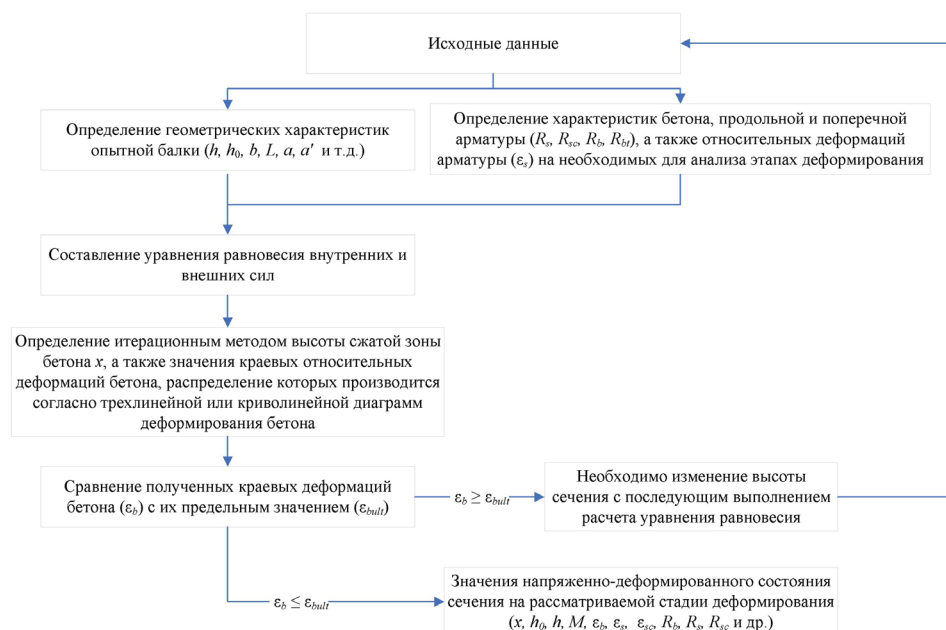


Рис. 6. Алгоритм проведения расчетов по методике, основанной на уравнении равновесия внешних и внутренних сил
Fig. 6. Algorithm for calculations performing using a method based on the equation of equilibrium of external and internal forces

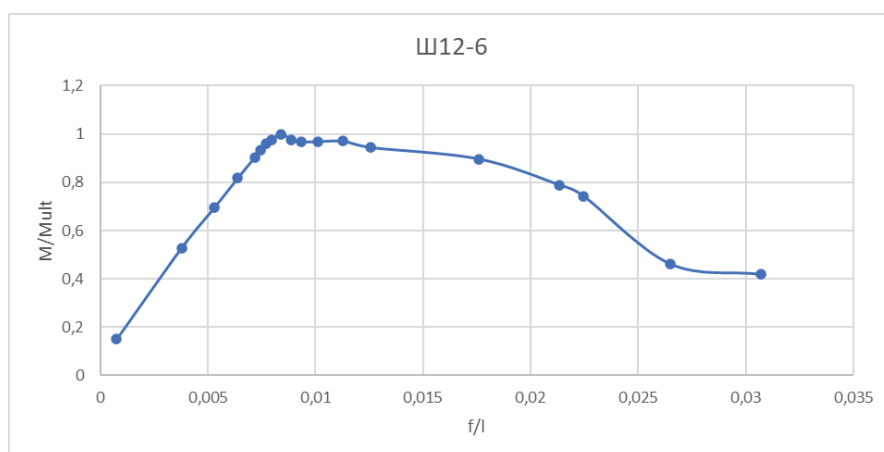


Рис. 7. График « $M/M_{ult} - f/l$ » для образца Ш12-6 (где f – прогиб, l – расчетная длина изгибаемого элемента)
 Fig. 7. « $M/M_{ult} - f/l$ » diagram for sample Sh12-6 (where f is the deflection, l is the calculated length of the bending element)

Таблица 3

Результаты сходимости моментов, действующих в сечении изгибаемого элемента, на разных этапах деформирования по аналитической модели и экспериментальных данных на примере образца Ш12-6

Table 3

Convergence results of the moments acting in the section of the bent element at different stages of deformation according to the analytical model and experimental data on the sample Sh12-6

$M_{экс.}, \text{ кг} \times \text{м}$	M/M_{max}	ε_s среднее	$X_{расч.}, \text{ см}$	$M_{расч.}, \text{ кг} \times \text{м}$	$M_{экс.}/M_{расч.}$
1516	0,82	0,002545	6,41	1542	0,983
1676	0,90	0,002837	6,55	1704	0,984
1854	1,00	0,003450	6,40	1797	1,032

В случае превышения крайевыми деформациями бетона их предельного значения ($\varepsilon_b \geq \varepsilon_{b,ult}$), сжатый слой бетона, в котором возникли данные деформации, следует считать разрушенным и не учитывать в расчете, тем самым уменьшая высоту сечения конструктивного элемента. Производится определение высоты сечения (h_{i+1}), а также рабочей высоты сечения (h_0) без учета разрушенной части сечения, после чего из уравнения равновесия повторно определяют характеристики напряженно-деформированного состояния сечения, включая значение высоты сжатой зоны бетона (x), а также положения нейтральной оси (более подробно будет представлено в последующих работах авторов).

Выводы

Авторами разработана и представлена для обсуждения методика определения напряженно-деформированного состояния конструкции на различных этапах нагружения, основанная на уравнении равновесия внешних и внутренних сил, действующих в сечении железобетонного элемента с учетом изменения положения нейтральной оси.

Предложенная методика расчета позволяет производить расчет на стадии снижения несущей способности изгибаемого элемента, так как дает возможность

итерационным методом определять высоту сечения изгибаемого элемента, его сжатой зоны (положение нейтральной оси), а соответственно, и напряжений в бетоне, что особенно важно в условиях уменьшения высоты сечения вследствие послойного разрушения бетона сжатой зоны. Уменьшение высоты сечения производится на основании превышения относительными деформациями бетона их предельного значения, равного $\varepsilon_b \geq \varepsilon_{b,ult}$.

В публикации приводится анализ полученных расчетных и экспериментальных значений относительных деформаций бетона и арматуры, а также изгибающих моментов, определенных на стадиях деформирования от $M = 0,8 M_{ult}$ до $M = M_{ult}$, исходя из предпосылок, что высота сечения h при M_{ult} равняется начальной высоте сечения ($h = const$).

Применение предложенного авторами подхода на рассматриваемых стадиях нагружения позволяет получить сходимость аналитической модели и экспериментальных данных как по значению высоты сжатой зоны, так и по достигаемым относительным деформациям арматуры (ε_s) с погрешностями до 3–5 %.

Результаты анализа стадии разупрочнения, полученные в ходе экспериментальной работы, проводимые, в том числе, на основании представленной методики, из-за ограниченного объема публикации

не могут быть представлены в одной статье и будут опубликованы в последующих работах авторов.

Повышению сходимости экспериментальных и теоретических данных будет способствовать применение в рассматриваемой аналитической модели криволинейной диаграммы деформирования бетона.

Список литературы

1. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=475858>.
2. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2015.
3. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с Изменениями № 1–4). Москва: Стандартинформ, 2018.
4. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия (с Изменениями № 1, 2). Москва: Стандартинформ, 2017.
5. Келасьев Н.Г., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Леонтьев Е.В., Терехов И.А., Шмаков С.Д. Конструктивные решения защиты одноэтажных каркасных зданий от прогрессирующего обрушения // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 3. С. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.03.17-22>. EDN: HZUMIM.
6. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Келасьев Н.Г., Терехов И.А. Введение в проектирование технически сложных зданий и сооружений. Москва: Издательство ACB, 2022. 294 с.
7. Trekin N.N., Kodysh E.N., Kelasiev N.G., Shmakov S.D., Terehov I.A., Chaganov A.B. The improvement of protection methods from the progressive collapse of one-storey industrial buildings. *Journal of Physics: Conference Series: International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019, Moscow, November 13–15, 2019*. Vol. 1425. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020, p. 012050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012050>. EDN: PULCSK.
8. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Шмаков С.Д., Чаганов А.Б., Черепанов А.В., Гончарук И.В. Деформирование железобетонных изгибаемых элементов в стадии разрушения // *Промышленное и гражданское строительство*. 2024. № 6. С. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2024.06.33-39>. EDN: LRZBWW.
9. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terehov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021, vol. 17, no. 1, pp. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116>. EDN: EZKHRK.
10. Плотников А.И. Динамика упругопластичности железобетонных балок при действии интенсивных кратковременных нагрузок аварийного характера [диссертация]. Москва, 1994. 375 с.
11. Гуца Ю.П. Исследование изгибаемых железобетонных элементов при работе стержневой арматуры в упругопластической стадии [диссертация]. Москва, 1967. 142 с.
12. Тамов М.А. Исследование железобетонных изгибаемых конструкций, армированных сталями повышенной прочности, при кратковременном динамическом нагружении [диссертация]. Москва, 1981. 150 с.
13. Зенин С.А. Экспериментальные исследования прочности изгибаемых железобетонных элементов с обжимными муфтовыми соединениями арматуры // *Бетон и железобетон*. 2024. № 3 (622). С. 5–12. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-3\(622\)-5-12](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-3(622)-5-12). EDN: AICXBU.
14. Белостоцкий А.М., Карпенко Н.И., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Карпенко С.Н., Петров А.Н., Кайтуков Т.Б., Харитонов В.А. О методах расчета напряженно-деформированного состояния и на устойчивость к прогрессирующему обрушению пространственных плитнооболочечных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности, трещинообразования и приобретаемой анизотропии // *Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций*. 2018. № 2 (14). С. 30–47. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47>. EDN: XWXBWP.
15. Колчунов В.И., Бушова О.Б. Деформирование железобетонных конструкций каркасов многоэтажных зданий в запредельных состояниях при особых воздействиях // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. № 4 (18). С. 297–306. DOI: <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-297-306>.
16. Савин С.Ю., Федорова Н.В., Колчунов В.И. Устойчивость железобетонных каркасов зданий в запредельных состояниях // *Academia. Архитектура и строительство*. 2023. № 4. С. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-4-127-137>. EDN: DCUCJI.
17. Травуш В.И., Колчунов В.И., Ключева Н.В. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 3. С. 4–11. EDN: TOBVVD.
18. Травуш В.И., Федорова Н.В. Живучесть конструктивных систем сооружений при особых воздействиях // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 5. С. 73–80. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.81.8>.

19. Зенин С.А. К вопросу расчета железобетонных конструкций на действие изгибающих моментов, продольных и поперечных сил по СП 63.13330.2018 // *Бетон и железобетон*. 2023. № 2 (616). С. 50–55. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2\(616\)-50-55](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2(616)-50-55). EDN: CCTIYB.
20. Трекин Н.Н., Авдеев К.В., Кодыш В.Э., Шмаков С.Д., Черепанов А.В., Тучин М.А., Чаганов А.Б. Разработка датчика для определения напряжений внутри железобетонных конструкций. Часть 2 // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 5. С. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-40-52>. EDN: IUBQUV.
21. Трекин Н.Н., Авдеев К.В., Кодыш В.Э., Шмаков С.Д., Черепанов А.В., Тучин М.А., Чаганов А.Б. Разработка датчика для определения напряжений внутри железобетонных конструкций. Часть 1 // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 4. С. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-45-58>. EDN: IQQVOW.
8. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Chaganov A.B., Cherepanov A.V., Goncharuk I.V. Deformation of reinforced concrete bendable elements at the stage of destruction. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2024, no. 6, pp. 33–39. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2024.06.33-39>. EDN: LRZ-BWW.
9. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021, vol. 17, no. 1, pp. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116>. EDN: EZKHRK.
10. Plotnikov A.I. Dynamics of elastic-plastic reinforced concrete beams under the action of intense short-term emergency loads [dissertation]. Moscow, 1994, 375 p. (In Russian).
11. Guscha Yu.P. Study of bending reinforced concrete elements during the operation of rod reinforcement in the elastic-plastic stage [dissertation]. Moscow, 1967, 142 p. (In Russian).
12. Tamov M.A. Study of reinforced concrete bendable structures reinforced with high-strength steels under short-term dynamic loading [dissertation]. Moscow, 1981, 150 p. (In Russian).
13. Zenin S.A. Experimental studies of the strength of bent reinforced concrete elements with crimp couplings of reinforcement. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2024, no. 3 (622), pp. 5–12. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-3\(622\)-5-12](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-3(622)-5-12). EDN: AICXBU.
14. Belostotsky A.M., Karpenko N.I., Akimov P.A., Sidorov V.N., Karpenko S.N., Petrov A.N., Kaytukov T.B., Kharitonov V.A. About development of methods of analysis and assessment of vulnerability of spatial plate-shell reinforced concrete structures with allowance for physical non-linearities, crack formation and induced anisotropy. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018, no. 2 (14), pp. 30–47. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47>. EDN: XWXBWP.
15. Kolchunov V.I., Bushova O.B. Deformation of reinforced concrete frames of multi-storey buildings in extreme conditions under special influences. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022, no. 4 (18), pp. 297–306. DOI: <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-297-306>. (In Russian).
16. Savin S.Y., Fedorova N.V., Kolchunov V.I. Stability

References

1. Federal Law No. 384-FZ of 30.12.2009 “Technical regulations on the safety of buildings and structures” [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=475858>. (In Russian).
2. State Standard 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles (with Amendments No. 1). Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
3. SP 385.1325800.2018, Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements (with Amendments No. 1–4). Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
4. SP 296.1325800.2017. Buildings and structures. Accidental actions (with Amendments No. 1, 2). Moscow: Standartinform Publ., 2017. (In Russian).
5. Kelasyev N.G., Trekin N.N., Kodysh E.N., Leont'yev E.V., Terekhov I.A., Shmakov S.D. Structural solutions for protecting one-story frame buildings from progressive collapse. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2021, no. 3, pp. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.03.17-22>. EDN: HZUMIM. (In Russian).
6. Kodysh E.N., Trekin N.N., Kelasyev N.G., Terekhov I.A. Introduction to the design of technically complex buildings and structures. Moscow: ASV Publishing House, 2022, 294 p. (In Russian).
7. Trekin N.N., Kodysh E.N., Kelasiev N.G., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Chaganov A.B. The improvement of protection methods from the progressive collapse of one-storey industrial buildings. *Journal of Physics: Conference Series: International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019, Moscow, November 13–15, 2019*. Vol. 1425. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020, p. 012050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012050>. EDN: PUL-CCK.

analysis of reinforced concrete building frames under ultimate states. *Academia. Architecture and construction*. 2023, no. 4, pp. 127–137. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-4-127-137>. EDN: DCUCJL.

17. Travush V.I., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2015, no. 3, pp. 4–11. (In Russian). EDN: TOBVVD.
18. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects. *Magazine of Civil Engineering*. 2018, no. 5, pp. 73–80. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.81.8>.
19. Zenin S.A. On the issue of calculations of reinforced concrete structures under the action of bending moments, longitudinal and transverse forces according to SP 63.13330.2018. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2023, no. 2 (616), pp. 50–55. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2\(616\)-50-55](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2(616)-50-55). EDN: CCTIYB.
20. Trekin N.N., Avdeev K.V., Kodysh V.E., Shmakov S.D., Cherepanov A.V., Tuchin M.A., Chaganov A.B. Development of a sensor for determining stresses inside reinforced concrete structures. Part 2. *Seismostoiikoe Stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 5, pp. 40–52. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-40-52>. EDN: IUBQUV.
21. Trekin N.N., Avdeev K.V., Kodysh V.E., Shmakov S.D., Cherepanov A.V., Tuchin M.A., Chaganov A.B. Development of a sensor for determining stresses inside reinforced concrete structures. Part 1. *Seismostoiikoe Stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 4, pp. 45–58. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-45-58>. EDN: IQQVOW.

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Николаевич Трекин, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры железобетонных конструкций, НИУ МГСУ; заместитель генерального директора по науке, АО «ЦНИИПромзданий», Москва
e-mail: nik-trekin@yandex.ru

Nikolai N. Trekin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University); Deputy Director General for Science, TsNIIPromzdaniy JSC, Moscow

Эмиль Наумович Кодыш, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ЦНИИПромзданий», Москва
e-mail: otk@yandex.ru

Emil N. Kodysh, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher, TsNIIPromzdaniy JSC, Moscow
e-mail: otk@yandex.ru

Сергей Дмитриевич Шмаков✉, аспирант, АО «ЦНИИПромзданий»; доцент кафедры СКЗиС, РУТ (МИИТ), Москва
e-mail: sergey3456789@gmail.com

Sergei D. Shmakov✉, Graduate Student, TsNIIPromzdaniy JSC; Associate Professor of the Department of Civil Engineering and Architecture, Russian University of Transport (MIIT), Moscow
e-mail: sergey3456789@gmail.com

Дмитрий Петрович Лелетко, заведующий сектором, АО «ЦНИИПромзданий», Москва
e-mail: otk@yandex.ru

Dmitry P. Leletko, Head of the Sector, TsNIIPromzdaniy JSC, Moscow
e-mail: otk@yandex.ru

Алексей Борисович Чаганов, канд. техн. наук, заведующий кафедрой строительного производства, ВятГУ, Киров
e-mail: chabpilot@yandex.ru

Alexey B. Chaganov, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Construction Production, Vyatka State University, Kirov
e-mail: chabpilot@yandex.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author