

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.02

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.2.1

Определение степени воздействия для сжато-изгибаемых элементов с учетом физической и геометрической нелинейности от обычных средств поражения

Владимир Иванович Римшин^{1,3}, Андрей Викторович Шевченко²,
Эльвира Рафаэлевна Кужахметова², Алексей Николаевич Выдрин³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Конструкторско-технологическое бюро Железобетон (КТБ Железобетон); г. Москва, Россия;

³ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время различные виды обычных средств поражения (ОСП) атакуют существующие здания и сооружения разного назначения: гражданские и промышленные. Зачастую ОСП повреждают отдельные строительные конструкции, такие как плиты, колонны, балки и прочее. Отсюда оценка категории технического состояния строительных конструкций является актуальной задачей для инженеров-обследователей. Указанная проблема решается введением полученных данных по результатам обследования в поверочный расчет. Предмет исследования — методика статического расчета по прочности поврежденных строительных конструкций от ОСП на примере стержневого элемента с сжато-изгибаемым напряженно-деформированным состоянием. Цель исследования — определение степени воздействия ОСП указанного элемента с учетом физической и геометрической нелинейности материала.

Материалы и методы. Рассмотрена методика численного расчета на запроектное воздействие от ОСП, которая учитывает не только особенности физико-механических характеристик строительных материалов, а также физическую и геометрическую нелинейную работу обследуемой строительной конструкции здания (сооружения). Физическая нелинейность железобетона учитывается на основе требований отечественных норм, таких как СП 63.13330 и Пособие к СП 63.13330. В ходе численного расчета применяются метод начальных параметров (МНП) и метод простых итераций (или численный метод итераций). Метод начальных параметров устанавливает линейные и угловые перемещения стержневого элемента. Метод итераций используется для решения системы уравнений, который с заданной точностью выявляет по приближенному значению величины следующего приближения.

Результаты. Предложенная методика по определению усилий в сечении стержневого сжато-изгибаемого элемента и МНП позволяют получить обоснованные результаты численного расчета с учетом остаточных деформаций и деформированной модели бетона и стали.

Выводы. Разработанная методика прочностного расчета является поверочным расчетом существующих строительных конструкций. Для простоты и удобства выполнения поверочного расчета алгоритм данной методики автоматизирован на языке VBA (Visual Basic for Applications).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетон, физическая нелинейность, геометрическая нелинейность, метод итерации, метод начальных параметров, обычные средства поражения, стержень, угол поворота, линейные перемещения, угловые перемещения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Римшин В.И., Шевченко А.В., Кужахметова Э.Р., Выдрин А.Н. Определение степени воздействия для сжато-изгибаемых элементов с учетом физической и геометрической нелинейности от обычных средств поражения // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 2. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.2.1

Автор, ответственный за переписку: Эльвира Рафаэлевна Кужахметова, e.kuzhahmetova@ktbbeton.com.

Determination of the degree of impact for compressed-bending elements taking into account physical and geometric nonlinearity from conventional means of destruction

Vladimir I. Rimshin^{1,3}, Andrey V. Shevchenko², Elvira R. Kuzhakhmetova²,
Alexey N. Vydrin³

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Design and technology bureau Reinforced concrete; Moscow, Russian Federation;

³ Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture
and Building Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, various types of conventional means of destruction (CMD) attack buildings and lead to varying uses: civil and industrial. CMD often damages individual building structures, such as slabs, columns, beams, etc. Hence, assessing the category of technical condition (TC) of building structures is an urgent task for survey engineers. This problem is solved by introducing the data obtained from the survey results into the verification calculation. The subject of the study is the method of strength calculation of damaged building structures from CMD using the example of a rod element with a compressive-bending stress-strain state (SSS). The purpose of the study is to determine the degree of impact of the CMD of the specified element, taking into account the various nonlinearities of the material.

Materials and methods. The paper discusses a method of numerical calculation for beyond design impact from conventional means of destruction, which takes into account not only the features of the physical and mechanical characteristics of building materials, but also the physical and geometric nonlinear work of the building structure being examined. The physical nonlinearity of reinforced concrete is considered in this article on the basis of the requirements of building codes of the Russian Federation, such as CP 63.13330 and the Manual for CP 63.13330. During the numerical calculation, the following methods are used: the method of initial parameters and the method of simple iterations (or the numerical iteration method). The initial parameters method determines the linear and angular displacements of the rod. The iteration method is used to solve a system of equations, which, with a given accuracy, determines the value of the next approximation based on the approximate value.

Results. The proposed method for determining the forces in the cross-section of a bar compression-flexural element and the method of initial parameters make it possible to obtain reasonable results of numerical calculations taking into account residual deformations and the deformed model of concrete and steel.

Conclusions. The developed method of strength calculation is a verification calculation of existing building structures. For simplicity and convenience of performing verification calculations, the algorithm of this technique is automated in the language VBA (Visual Basic for Applications).

KEYWORDS: reinforced concrete, physical nonlinearity, geometric nonlinearity, numerical methods, conventional weapons

FOR CITATION: Rimshin V.I., Shevchenko A.V., Kuzhakhmetova E.R., Vydrin A.N. Determination of the degree of impact for compressed-bending elements taking into account physical and geometric nonlinearity from conventional means of destruction. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(2):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.2.1

Corresponding author: Elvira R. Kuzhakhmetova, e.kuzhahmetova@ktbbeton.com.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе последних событий различные виды обычных средств поражения (далее — ОСП) атакуют существующие здания и сооружения различного назначения: гражданские (жилые дома, общественные сооружения и прочее) и промышленные (заводы, фабрики) на территории Российской Федерации. Указанные эксплуатируемые здания и сооружения после повреждения ОСП представляют собой объект с разной степенью разрушения, которая классифицируется по ГОСТ Р 42.2.01¹: слабая,

средняя, сильная степени и полное разрушение. Зачастую разрушения зданий (сооружений) характеризуются слабой или средней степенью разрушения, т.е. повреждена часть несущих строительных конструкций, таких как плиты, балки, ригели, колонны, стены и прочее, при этом опасность их обрушения отсутствует. В этом случае экономически целесообразным считается полное восстановление частично разрушенных строительных конструкций зданий после основных средств поражения с минимальными затратами. Отсюда необходимо оценить и присвоить категорию технического состояния (ТС) несущих строительных конструкций здания (сооружения) согласно ГОСТ 31937².

¹ ГОСТ Р 42.2.01–2014. Гражданская оборона. Оценка состояния потенциально опасных объектов, объектов обороны и безопасности в условиях воздействия поражающих факторов обычных средств поражения. Методы расчета. М. : Стандартинформ, 2019.

² ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М. : Стандартинформ, 2014.

Поврежденные строительные конструкции незамедлительно обследуют по общим правилам проведения обследования и мониторинга ТС конструкций и сооружений по указанному нормативному документу ГОСТ 31937. В результате обследования определяют объемно-планировочные решения здания (сооружения), анализируют соединительные узлы несущих строительных конструкций, фактическую прочность строительных материалов, реальные эксплуатируемые нагрузки и воздействия с учетом фактической картины дефектов и повреждений строительных конструкций.

В ходе обследования все полученные результаты фиксируют в техническом отчете для дальнейшего выполнения поверочного расчета, который является одним из основополагающих факторов для присвоения категории технического состояния несущих строительных конструкций (см. СП 13-102–2003³). Для точного и правильного поверочного расчета по установлению прочности поврежденных конструкций от ОСП необходимо разработать методику расчета на примере стержневого элемента с сжато-изгибаемым напряженно-деформированным состоянием (НДС). Необходимо выявить степени воздействия ОСП указанного элемента с учетом различной нелинейности материала.

Физическая нелинейность (ФН) железобетона характеризуется неупругими деформациями бетона и арматуры в стержневых элементах и их узловых сопряжениях, а также возникновением и развитием в них трещин. Учитывается и принимается ФН по строительным нормам: СП 63.13330⁴ и Пособие к СП 63.13330⁵. Геометрическая нелинейность (ГН) — это нелинейная зависимость между внешним воздействием и перемещением, которое вызвано дополнительным усилием при деформировании несущих строительных конструкций.

Цель исследования — определение степени воздействия от обычных средств поражения сжато-изгибаемого элемента с учетом физической и геометрической нелинейности материала.

В настоящее время вопросами динамики сооружений при аварийных воздействиях, связанных с воздействиями взрывов и распространением воздушных ударных волн на здания, в том числе с использованием нелинейных подходов, занимаются: П.А. Акимов [1], В.И. Римшин [2], В.И. Колчунов [3], О.В. Ка-

банцев [4], Э.Н. Кодыш [5], О.В. Мкртычев [6], В.Л. Мондрус [7], А.Г. Тамразян [8], Н.Н. Трекин [9], Г.П. Тонких [10], В.И. Травуш [1] и др. Следует отметить значительные сложности в моделировании взрывного воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материалов для исследования используются нормативно-технические документы РФ, научные книги и статьи. Для определения деформаций железобетонных элементов принят метод начальных параметров (МНП) как альтернативный вариант расчета вертикального сжато-изгибаемого стержневого элемента методом интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси стержневого элемента по определению деформации, указанного в Пособии к СП 63.13330.

Приведенные методы имеют свои достоинства и недостатки, подробно рассмотренные в научных книгах «Сопротивление материалов». Однако для применения указанных методов имеются схожие ограничения:

- рассматриваемая конструкция — стержневой элемент;
- материал конструкции однородный по всей ее длине (высоте);
- стержень является прямолинейным;
- поперечное сечение конструкции имеет постоянную форму.
- справедлива гипотеза плоских решений, т.е. сечения плоские до деформации остаются плоскими после деформации, а напряжения распределяются равномерно в пределах сечений.

Инженер-расчетчик использует метод интегрирования и метод начальных параметров исходя из исходных данных задачи (проекта), продолжительности времени численного расчета, сроков проектирования и прочего. Оба метода расчета по установлению второй группы предельных состояний (по деформациям) можно применять в качестве поверочного расчета. Известно, что метод начальных параметров является одним из относительно простых способов расчета угловых и линейных перемещений при изгибе, сжатии стержневых элементов с любым количеством принятых участков по его длине. Изначально в МНП необходимо определиться с выбором начала координат в расчетной схеме, условий закрепления рассматриваемого стержневого элемента.

В статье приведена методика численного расчета по определению деформаций для сжато-изгибаемых элементов с учетом физической и геометрической нелинейности от ОСП. Алгоритм расчета указанной задачи проводится в несколько этапов. В качестве граничных условий для сжато-изгибаемого стержня примем шарнирные закрепления, внизу — шарнирно-неподвижная опора, сверху — шар-

³ СП 13-102–2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2004.

⁴ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01–2003. М. : АО «НИЦ «Строительство», 2019. 124 с.

⁵ Пособие к СП 63.13330. Методическое пособие. Расчет железобетонных конструкций без предварительного напряжения арматуры.

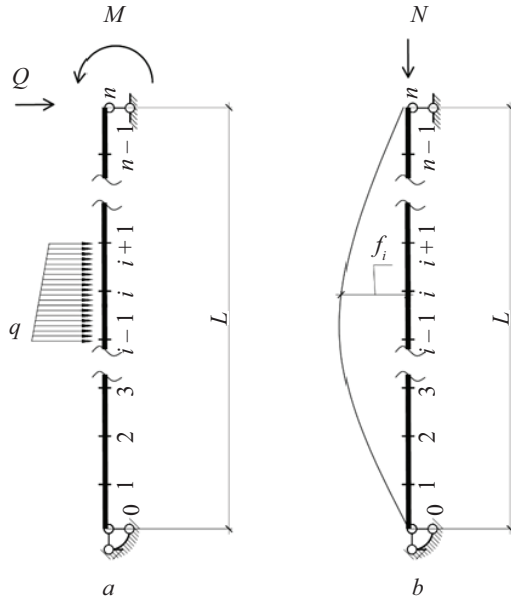


Рис. 1. Расчетные схемы вертикального стержневого элемента: *a* — изогнутый стержень; *b* — сжатый стержень; *M* — изгибающий момент; *Q* — поперечная сила; *N* — продольная сила; *q* — изгибающий момент; *L* — общая длина стержня; *f_i* — прогиб стержня

нирно-подвижная опора с концами и нагруженными усилиями (рис. 1).

Разобьем железобетонный вертикальный стержневой элемент длиной *L* на отдельные *n* участки равной длины *L_n*. Коэффициенты жесткости каждого *n* участка, сжатого в плоскости симметрии поперечного сечения железобетонного элемента и расположении оси *X* в этой плоскости, находим из общей системы уравнений (1) и (2):

$$D_{11} \cdot 1/\rho_x + D_{13} \cdot \varepsilon_0 = M_x; \quad (1)$$

$$D_{31} \cdot 1/\rho_x + D_{33} \cdot \varepsilon_0 = N, \quad (2)$$

где $1/\rho_x$ — кривизна сжато-изгибаемого элемента; D_{11} , $D_{13} = D_{13}$, D_{33} — жесткостные характеристики участка поперечного сечения железобетонного вертикального элемента.

В общем виде решение на каждом *k* шаге можно записать в виде последующих итераций (загружений) [11–13]:

$$\begin{aligned} (1/\rho_x)_j^{(k)} &= \\ &= \frac{M_{x,j}}{D_{11,j}^{(k-1)}} - \left(\frac{D_{13,j}^{(k-1)}}{D_{11,j}^{(k-1)}} \right) (\varepsilon_0)_j^{(k-1)}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} (\varepsilon_0)_j^{(k)} &= \\ &= \frac{N}{D_{33,j}^{(k-1)}} - \left(\frac{D_{31,j}^{(k-1)}}{D_{33,j}^{(k-1)}} \right) (1/\rho_x)_j^{(k-1)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где (*k*) — номер итерации; *j* — шаг нагружения.

Уравнения (1)–(4) решаются шагово-итерационным методом [14–19] с корректировкой жесткостных характеристик *D* и учетом дополнительных моментов *M* при продольном изгибе.

Линейные и угловые перемещения складываются из прогибов от действия изгибающих моментов и прогибов стержня от сжимающей нагрузки *N*. В общем виде вычисление линейных *y* и угловых Θ перемещений на каждом *k* шаге можно решить методом начальных параметров:

$$y_n^{(k)} = A_{y,n}^{(k)} \cdot y_0^{(k)} + B_{y,n}^{(k)} \cdot \theta_0^{(k)} + C_{y,n}^{(k)}; \quad (5)$$

$$\theta_i^{(k)} = A_{\theta,i}^{(k)} \cdot y_0^{(k)} + B_{\theta,i}^{(k)} \cdot \theta_0^{(k)} + C_{\theta,i}^{(k)}. \quad (6)$$

Коэффициенты уравнений (5) и (6) выражаются следующими зависимостями:

- для линейных перемещений *y*:

$$A_{y,i}^{(k)} = A_{y,i-1}^{(k)} + A_{\theta,i-1}^{(k)} \cdot L_{i-1}^{(k)}; \quad (7)$$

$$B_{y,i}^{(k)} = B_{y,i-1}^{(k)} + B_{\theta,i-1}^{(k)} \cdot L_{i-1}^{(k)}; \quad (8)$$

$$C_{y,i}^{(k)} = C_{y,i-1}^{(k)} + C_{\theta,i-1}^{(k)} \cdot L_{i-1}^{(k)}; \quad (9)$$

- для углов поворота Θ :

$$A_{\theta,i}^{(k)} = A_{\theta,i-1}^{(k)}; \quad (10)$$

$$B_{\theta,i}^{(k)} = B_{\theta,i-1}^{(k)}; \quad (11)$$

$$C_{\theta,i}^{(k)} = C_{\theta,i-1}^{(k)}, \quad (12)$$

где $A_{y,i}^{(k)} - C_{\theta,i}^{(k)}$ — индексы метода перемещений (МП), описывающие линейные перемещения и углы поворота в рекуррентной форме.

Для продольного изгиба величину перемещений выпучивания находим из следующих зависимостей:

$$\begin{aligned} \left(\frac{f_0}{L} \right)^2 &= \\ &= -\frac{9}{2} \frac{\chi^2 L^2 \cos\left(\frac{\chi L}{2}\right)}{\chi^2 L^2 \left(2 - 3 \cos\left(\frac{\chi L}{2}\right) + \left(\cos\left(\frac{\chi L}{2}\right) \right)^3 \right)}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\chi^2 = \frac{N_{cr}}{D_i}, \quad (14)$$

где f_0 — максимальный прогиб в середине пролета при действии критической силы N_{cr} ; L — общая длина рассматриваемого элемента.

Тогда распределение прогибов при начале координат на одном из концов стержня найдем по формуле:

$$f_i = \frac{N}{N_{cr}} \sin\left(\frac{\pi x_i}{L}\right), \tag{15}$$

где x_i — координата сечения, в котором определяются прогибы.

Расчет сжато-изгибаемого вертикального стержневого элемента производим в следующем порядке:

- 1) разбиваем стержневой элемент на равные участки, четное количество;
- 2) определяем внутренние усилия от действия поперечной нагрузки;
- 3) вычисляем дополнительный изгибающий момент от сжимающей силы;
- 4) определяем прогибы по формулам (5)–(15);
- 5) корректируем коэффициенты жесткости поперечного сечения стержневого элемента по следующим формулам (1)–(4);
- 6) весь процесс повторяется до сходимости принятой величины, например по максимальному значению изгибающего момента, при контроле предельных деформаций бетона и арматуры.

Величину нагрузки от воздействия ОСП находим по остаточным деформациям [12], считая нагрузку конструкции упругой.

Для удобства поверочного расчета описанный алгоритм методики автоматизирован в VBA (Visual Basic for Applications) [13, 20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера численного расчета рассмотрим сжато-изгибаемый стержень с поперечным сечением квадратной формы и размерами 400 × 400 мм. Длина стержня составляет 6 м. Материалом железобетонного стержня принят тяжелый бетон класса В25, продольная арматура класса (4Ø18) А400 по ГОСТ 34028–2016⁶. Продольная сила Q и изгибающий момент M от постоянных и длительных нагрузок (продолжительное действие нагрузок) приняты $N_l = 1700$ кН, $M_l = 0,0$ кН. По результатам обследования выявлен остаточный прогиб (или выгиб), который составил 52 мм. Необходимо определить величину внешнего воздействия от ОСП.

На стадии воздействия обычными средствами поражения значение предельных относительных деформаций стали ϵ_{s2} принимаем 0,033 с коэффициентом упрочнения 1,3.

Для сжатой зоны бетона класса В25 принимаем коэффициент упрочнения 1,4, а для растянутой зоны бетона — коэффициент упрочнения 1,1.

Значения предельных относительных деформации тяжелого бетона В25 при непродолжительном действии внешней нагрузки (т.е. кратковременном режи-

⁶ ГОСТ 34028–2016. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия (с Поправкой). М. : Стандартинформ, 2019.

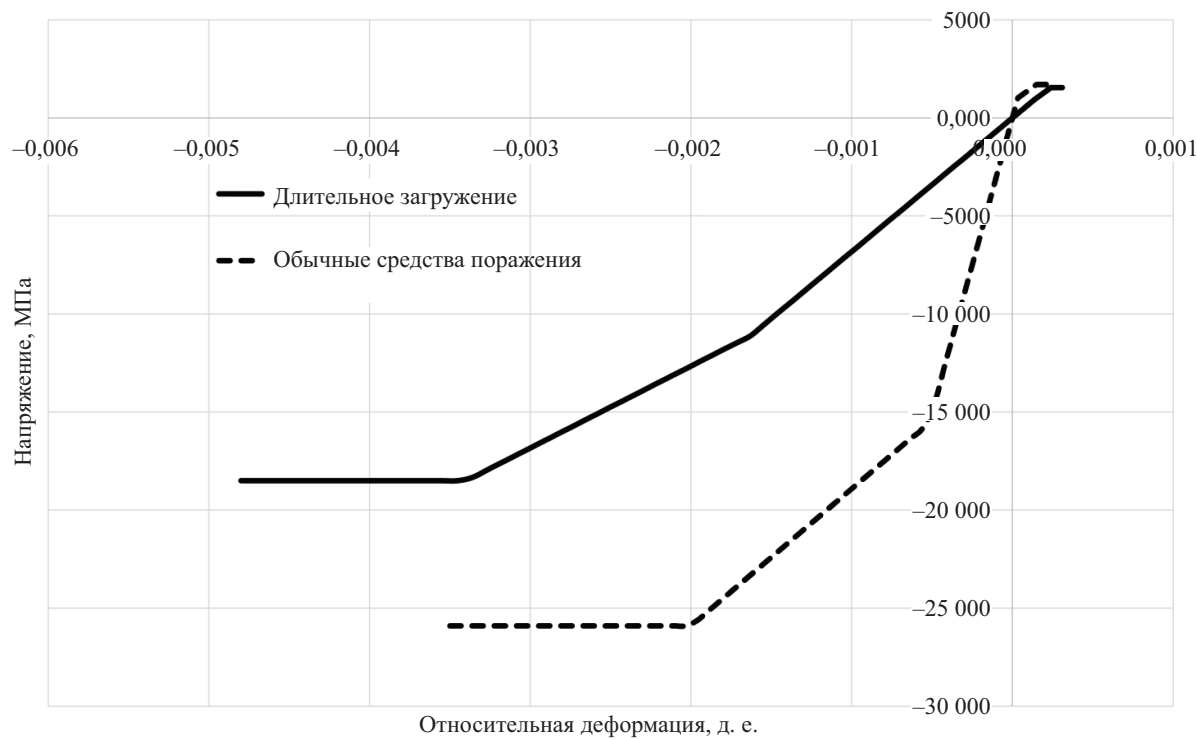


Рис. 2. Диаграмма работы бетона В25

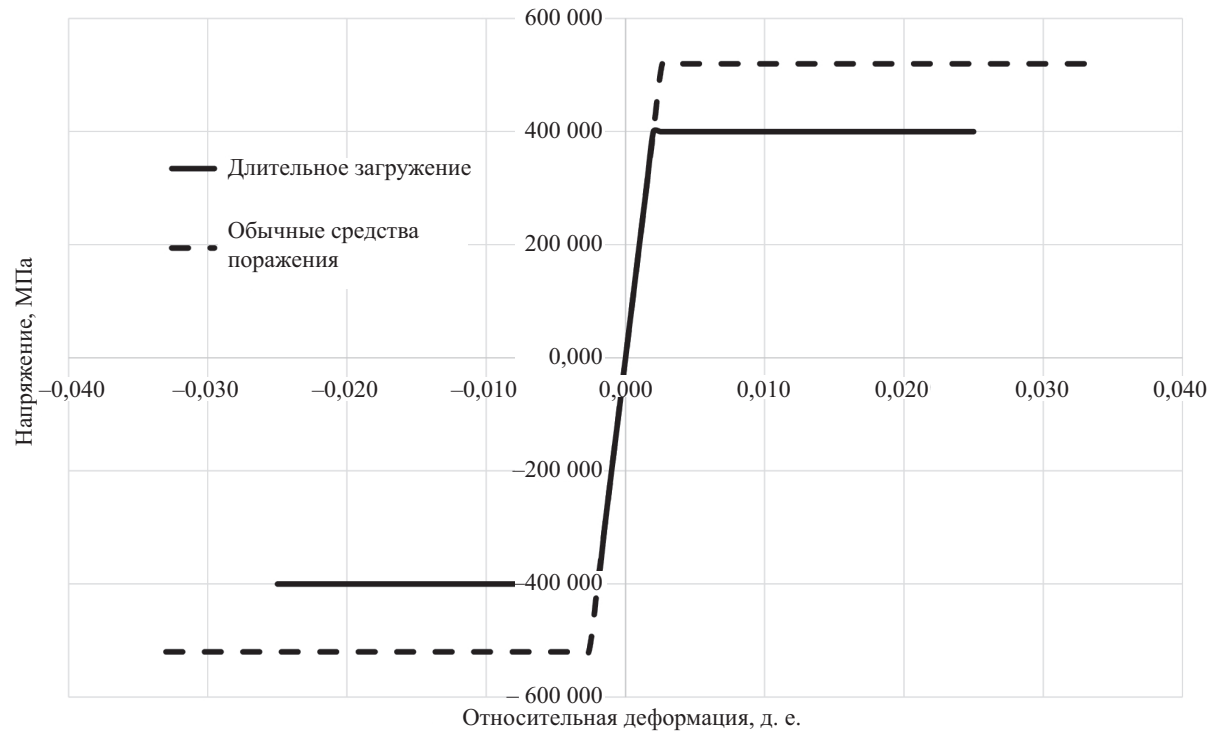


Рис. 3. Диаграмма работы стали класса А400

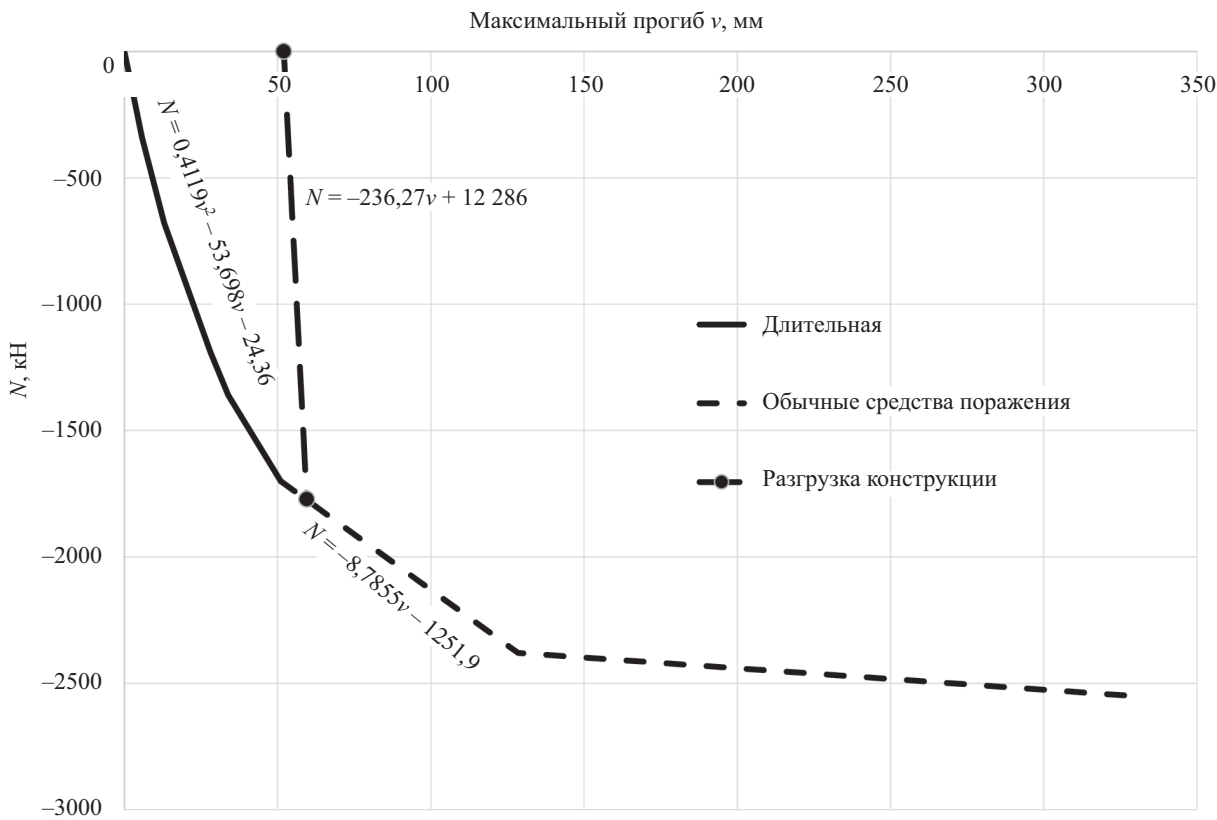


Рис. 4. График взаимодействия внешнего воздействия N , кН, с максимальным прогибом v , мм

ме загрузки) принимаем по п. 6.1.14 СП 63.13330: $\varepsilon_{b0} = 0,002$ при осевом сжатии и $\varepsilon_{b0} = 0,0001$ при осевом растяжении.

Принятые для расчета диаграммы показаны на рис. 2, 3.

Результаты численного расчета по приведенной ранее методике представлены на рис. 4.

Для участка с режимом воздействия ОСП из рис. 4 можно записать:

$$N = -8,7855v - 1251,9. \quad (16)$$

Линия разгрузки будет иметь вид:

$$N = -236,27v - 12,286. \quad (17)$$

Решив уравнения (16) и (17), находим, что при остаточном прогибе 52 мм величина воздействия составила 1703 кН.

Результаты расчета выполнены в VBA и показаны на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика расчета позволяет определить несущую способность и устойчивость сжатого изгибаемых элементов в физически и геометрически нелинейной постановке при воздействии обычных средств поражения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Travush V.I., Belostosky A.M., Akimov P.A. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. P. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012029
2. Римшин В.И., Амелин П.А. Численный расчет изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения в программной среде ABAQUS // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 6. С. 552–563. DOI: 10.22363/1815-5235-2022-18-6-552-563. EDN WCRNSY.
3. Kolchunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037
4. Кабанцев О.В., Тонких Г.П. О деформативности и сейсмостойкости конструкций из каменной кладки // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 9. С. 51–58. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.09.51-58. EDN ZFCOVN.
5. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н. Особое предельное состояние железобетонных конструкций при аварийных воздействиях // Вестник НИЦ Строительство. 2018. № 1 (16). С. 120–125. EDN YNSGFA.
6. Мкртычев О.В., Дорожнинский В.Б. Анализ подходов к определению параметров взрывного воздействия // Вестник МГСУ. 2012. № 5. С. 45–49. EDN PDBNCF.
7. Mondrus V., Kulikov V. An algorithm for analyzing the reactive behavior of structural elements of panel buildings // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 410. P. 03031. DOI: 10.1051/e3sconf/202341003031
8. Tamrazyan A.G., Zubareva S. Optimal design of reinforced concrete structures taking into account the particular calculation for progressive destruction // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00163. DOI: 10.1051/matecconf/201711700163
9. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н. Особое предельное состояние железобетонных конструкций и его нормирование // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 4–9. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.05.04-09. EDN LMCXHX.
10. Тонких Г.П., Белов Н.Н., Югов Н.Т., Пляскин А.С., Бабарыкина А.И. Экспериментальные исследования защитных свойств композитных бетонов при действии обычных средств поражения // Технологии гражданской безопасности. 2024. Т. 21. № 1 (79). С. 34–44. EDN SHCIEG.
11. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Петров А.Н. Малоитерационный подход к физически нелинейному расчету железобетона с трещинами // Строительные материалы. 2012. № 6. С. 7–9. EDN PCFXYP.
12. Шевченко А.В., Давидюк А.А., Баглаев Н.Н. Метод итераций для расчета железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 3. С. 13–18. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.13-18. EDN PJZDHL.
13. McCracken D.D., Dorn W.S. Numerical methods and FORTRAN programming: with applications in engineering and science. Wiley, 1965. 457 p.
14. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Квазилинейные уравнения силового сопротивления и диаграмма σ – ε бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 6. С. 40–44. EDN SYZJHL.
15. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. М. : ООО «ТИД «Студент», 2015. 111 с. EDN VSMWDX.
16. Fedorova N.V., Phan D.Q., Korenkov P.A. Indirect Reinforcement of Reinforced Concrete Elements as a Means of Protecting a Constructive System from a Progressive Collapse // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032032. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032032

17. Halahla A. Study the Behavior of Reinforced Concrete Beam Using Finite Element Analysis // World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering. 2018. DOI: 10.11159/icsenm18.103

18. De Santana Gomes W.J. Reliability analysis of reinforced concrete beams using finite element models // Proceedings of The XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. 2017. DOI: 10.20906/CPS/CILAMCE2017-0145

19. Ribeiro R.R.J., Diógenes H.J.F., Nóbrega M.V., El Debs A.L.H.C. A survey of the mechanical properties of concrete for structural purposes prepared on construction sites // Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2016. Vol. 9. Issue 5. Pp. 722–744. DOI: 10.1590/S1983-41952016000500005

20. Pangaribuan G. An Introduction to Excel for Civil Engineers: From Engineering Theory to Excel Practice. 2016. 387 p.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 25 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 25 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Иванович Римшин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заведующий лабораторией мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; РИНЦ ID: 420903, Scopus: 56258934600, ResearcherID: P-4928-2015, ORCID: 0000-0002-9084-4105; v.rimshin@niisf.ru;

Андрей Викторович Шевченко — кандидат технических наук, главный инженер; **Конструкторско-технологическое бюро Железобетон (КТБ Железобетон)**; 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, стр. 64; SPIN-код: 9509-5666, РИНЦ ID: 712777; shevchenko@ktbbeton.com;

Эльвира Рафаэлевна Кузяхметова — главный специалист; **Конструкторско-технологическое бюро Железобетон (КТБ Железобетон)**; 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, стр. 64; SPIN-код: 1949-1140, РИНЦ ID: 934567, Scopus: 57920114400, ResearcherID: HJI-1854-2023, ORCID: 0000-0002-0907-786X; e.kuzhahmetova@ktbbeton.com;

Алексей Николаевич Выдрин — аспирант лаборатории мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; aleksey-vydrin@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

In the course of recent events, various types of conventional means of destruction (hereinafter — CMD) attack existing buildings and structures of different purposes: civilian (residential buildings, public buildings and other) and industrial (plants, factories) on the territory of the Russian Federation. The mentioned operating buildings and structures after CMD damage represent an object with different degree of destruction, which is classified according to GOST R 42.2.01¹: weak, medium, strong degree and complete destruction. Often the destruction of buildings (structures) is characterized by a weak or medium degree of destruction, i.e. a part of load-bearing building struc-

tures such as slabs, beams, transoms, columns, walls, etc. is damaged, and there is no danger of their collapse. In this case, it is considered economically feasible to fully restore partially destroyed building structures of buildings after the main means of defeat with minimum costs. Hence it is necessary to assess and assign the category of technical condition (TC) of load-bearing building structures (structures) according to GOST 31937².

Damaged building structures are immediately inspected according to the general rules for inspection and monitoring of TC of structures and facilities in accordance with the specified normative document GOST 31937. As a result of the survey, volume-planning solutions of the building (structure) are determined, connecting nodes of load-bearing building structures, actual strength of building materials, real operating loads

¹ GOST R 42.2.01–2014. Civil defence. Assessment of the condition of potentially hazardous facilities, defence and security facilities under the impact of defeat factors of conventional means of defeat. Calculation methods. Moscow, Standardinform, 2019.

² GOST 31937–2011. Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition. Moscow, Standardinform, 2014.

and impacts are analyzed, taking into account the actual picture of defects and damages of building structures.

During the survey, all the results obtained are recorded in a technical report for further verification calculation, which is one of the fundamental factors for assigning the category of technical condition of load-bearing building structures (see CP 13-102–2003³). For accurate and correct verification calculation for establishing the strength of damaged structures from CMD it is necessary to develop a calculation methodology on the example of a rod element with a compression-bending stress-strain state (SSS). It is necessary to identify the degree of impact of the CMD of the specified element taking into account the different nonlinearity of the material.

Physical nonlinearity (PN) of reinforced concrete is characterized by inelastic deformations of concrete and reinforcement in bar elements and their nodal junctions, as well as the occurrence and development of cracks in them. PN is taken into account and accepted according to construction norms: CP 63.13330⁴ and Manual to CP 63.13330⁵. Geometric nonlinearity (GN) is a nonlinear relationship between the external influence and displacement, which is caused by additional force during deformation of load-bearing building structures.

The aim of the study is to determine the degree of impact from conventional means of impact of a compression-bending element taking into account the physical and geometrical nonlinearity of the material.

At present, the issues of the dynamics of structures under emergency impacts related to the effects of explosions and propagation of air shock waves on buildings, including the use of nonlinear approaches, are dealt with: P.A. Akimov [1], V.I. Rimshin [2], V.I. Kolchunov [3], O.V. Kabantsev [4], E.N. Kodysh [5], O.V. Mkrtychev [6], V.L. Mondrus [7], A.G. Tamrazyan [8], N.N. Trekin [9], G.P. Tonkikh [10], V.I. Travush [1] and others. Significant difficulties in modelling the explosive impact should be noted.

MATERIALS AND METHODS

The materials used for the study are normative and technical documents of the Russian Federation, scientific books and articles. To determine the deformations of reinforced concrete elements, the method of initial parameters (MIP) is adopted as an alternative variant of calculation of vertical compression-bending rod element by the method of integration of the differential equation

³ CP 13-102–2003. Rules for inspection of load-bearing building structures of buildings and structures. Moscow, Gosstroy of Russia, GUP CPP, 2004.

⁴ CP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Updated edition of SNiP 52-01–2003. Moscow, JSC “SIC “Construction”, 2019; 124.

⁵ Manual to CP 63.13330. Methodological manual. Calculation of reinforced concrete structures without reinforcement prestressing.

of the curved axis of the rod element to determine the deformation specified in the Manual to CP 63.13330.

The above methods have their advantages and disadvantages, which are discussed in detail in scientific books “Resistance of Materials”. However, there are similar limitations to the application of the above methods:

- the structure under consideration is a rod element;
- the material of the structure is homogeneous over its entire length (height);
- the rod is straight;
- the cross-section of the structure has a constant shape;
- the hypothesis of flat solutions is valid, i.e. sections flat before deformation remain flat after deformation, and stresses are distributed uniformly within the sections.

The calculation engineer uses the integration method and the initial parameter method based on the initial data of the problem (project), the duration of the numerical calculation time, the design time and other factors. Both methods of calculation for the establishment of the second group of limit states (deformation) can be used as a verification calculation. It is known that the method of initial parameters is one of the relatively simple ways to calculate angular and linear displacements in bending, compression of rod elements with any number of accepted sections along its length. Initially, in the MIP it is necessary to determine the choice of the origin of coordinates in the calculation scheme, the conditions of fixation of the considered rod element.

The paper presents a numerical calculation methodology for determining the deformations for compression-bending elements taking into account the physical and geometrical nonlinearity from the CMD. The algorithm of calculation of the specified problem is carried out in several stages. As boundary conditions for a compression-bending rod, we assume hinge fixings, a hinge-unmovable support at the bottom, and a hinge-movable support with ends and loaded forces at the top (Fig. 1).

Let us divide the reinforced concrete vertical rod element of length L into separate n sections of equal length l_n . The stiffness coefficients of each n section compressed in the plane of symmetry of the cross-section of the reinforced concrete element and the location of the axis X in this plane, we find from the general system of equations (1) and (2):

$$D_{11} \cdot 1/\rho_x + D_{13} \cdot \varepsilon_0 = M_x; \quad (1)$$

$$D_{31} \cdot 1/\rho_x + D_{33} \cdot \varepsilon_0 = N, \quad (2)$$

where $1/\rho_x$ is the curvature of the compression-bending element; D_{11} , $D_{13} = D_{13}$, D_{33} are the stiffness characteristics of the cross-sectional area of the reinforced concrete vertical element.

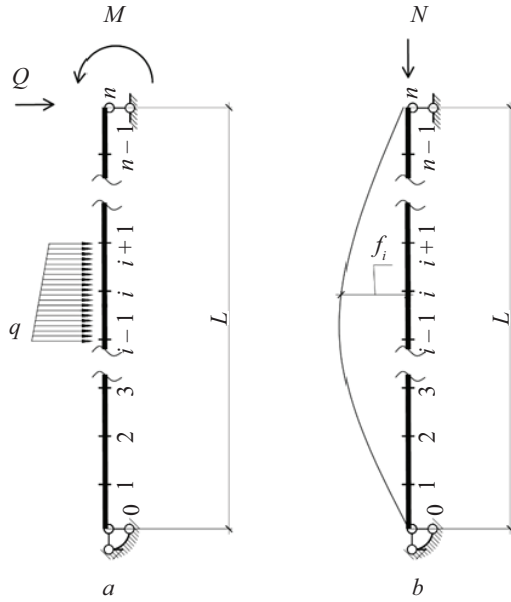


Fig. 1. Calculation diagrams of vertical rod element: *a* — bent rod; *b* — compressed rod; *M* — bending moment; *Q* — transverse force; *N* — longitudinal force; *q* — bending moment; *L* — total rod length; *f_i* — rod deflection

In general, the solution at each *k* step can be written in terms of subsequent iterations (loadings) [11–13]:

$$\begin{aligned} (1/\rho_x)_j^{(k)} &= \\ &= \frac{M_{x,j}}{D_{11,j}^{(k-1)}} - \left(\frac{D_{13,j}^{(k-1)}}{D_{11,j}^{(k-1)}} \right) (\epsilon_0)_j^{(k-1)}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} (\epsilon_0)_j^{(k)} &= \\ &= \frac{N}{D_{33,j}^{(k-1)}} - \left(\frac{D_{31,j}^{(k-1)}}{D_{33,j}^{(k-1)}} \right) (1/\rho_x)_j^{(k-1)}, \end{aligned} \quad (4)$$

where (*k*) is the iteration number; *j* is the loading step.

Equations (1)–(4) are solved by the stepwise iterative method [14–19] with correction of stiffness characteristics *D* and consideration of additional moments *M* in longitudinal bending.

The linear and angular displacements are the sum of the deflections due to bending moments and the deflections of the rod due to the compressive load *N*. In general, the calculation of linear *y* and angular Θ displacements at each *k* steps can be solved by the method of initial parameters:

$$y_n^{(k)} = A_{y,n}^{(k)} \cdot y_0^{(k)} + B_{y,n}^{(k)} \cdot \theta_0^{(k)} + C_{y,n}^{(k)}; \quad (5)$$

$$\theta_i^{(k)} = A_{\theta,i}^{(k)} \cdot y_0^{(k)} + B_{\theta,i}^{(k)} \cdot \theta_0^{(k)} + C_{\theta,i}^{(k)}. \quad (6)$$

The coefficients of equations (5) and (6) are expressed by the following relationships:

- for linear displacements *y*:

$$A_{y,i}^{(k)} = A_{y,i-1}^{(k)} + A_{\theta,i-1}^{(k)} \cdot L_{i-1}^{(k)}; \quad (7)$$

$$B_{y,i}^{(k)} = B_{y,i-1}^{(k)} + B_{\theta,i-1}^{(k)} \cdot L_{i-1}^{(k)}; \quad (8)$$

$$C_{y,i}^{(k)} = C_{y,i-1}^{(k)} + C_{\theta,i-1}^{(k)} \cdot L_{i-1}^{(k)}; \quad (9)$$

- for rotation angles Θ :

$$A_{\theta,i}^{(k)} = A_{\theta,i-1}^{(k)}; \quad (10)$$

$$B_{\theta,i}^{(k)} = B_{\theta,i-1}^{(k)}; \quad (11)$$

$$C_{\theta,i}^{(k)} = C_{\theta,i-1}^{(k)}; \quad (12)$$

where $A_{y,i}^{(k)} - C_{\theta,i}^{(k)}$ are indices of the method of displacement (MD) describing linear displacements and rotation angles in recurrence form.

For longitudinal bending, the value of the bulge displacements can be found from the following relationships:

$$\begin{aligned} \left(\frac{f_0}{L} \right)^2 &= \\ &= -\frac{9}{2} \frac{\cos\left(\frac{\chi L}{2}\right)}{\frac{\chi^2 L^2}{4} \left(2 - 3 \cos\left(\frac{\chi L}{2}\right) + \left(\cos\left(\frac{\chi L}{2}\right) \right)^3 \right)}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\chi^2 = \frac{N_{cr}}{D_i}, \quad (14)$$

where *f₀* is the maximum deflection in the middle of the span under the action of the critical force *N_{cr}*; *L* is the total length of the considered element.

Then the distribution of deflections at the origin of coordinates at one of the ends of the rod is found by the formula:

$$f_i = \frac{N}{N_{cr}} \sin\left(\frac{\pi x_i}{L}\right), \quad (15)$$

where *x_i* is the coordinate of the section where deflections are determined.

The compression-bending vertical rod element is calculated in the following order:

- 1) divide the rod element into equal sections, an even number;
- 2) determine the internal forces from the action of transverse load;
- 3) calculate the additional bending moment from the compressive force;
- 4) determine deflections according to formulas (5)–(15);

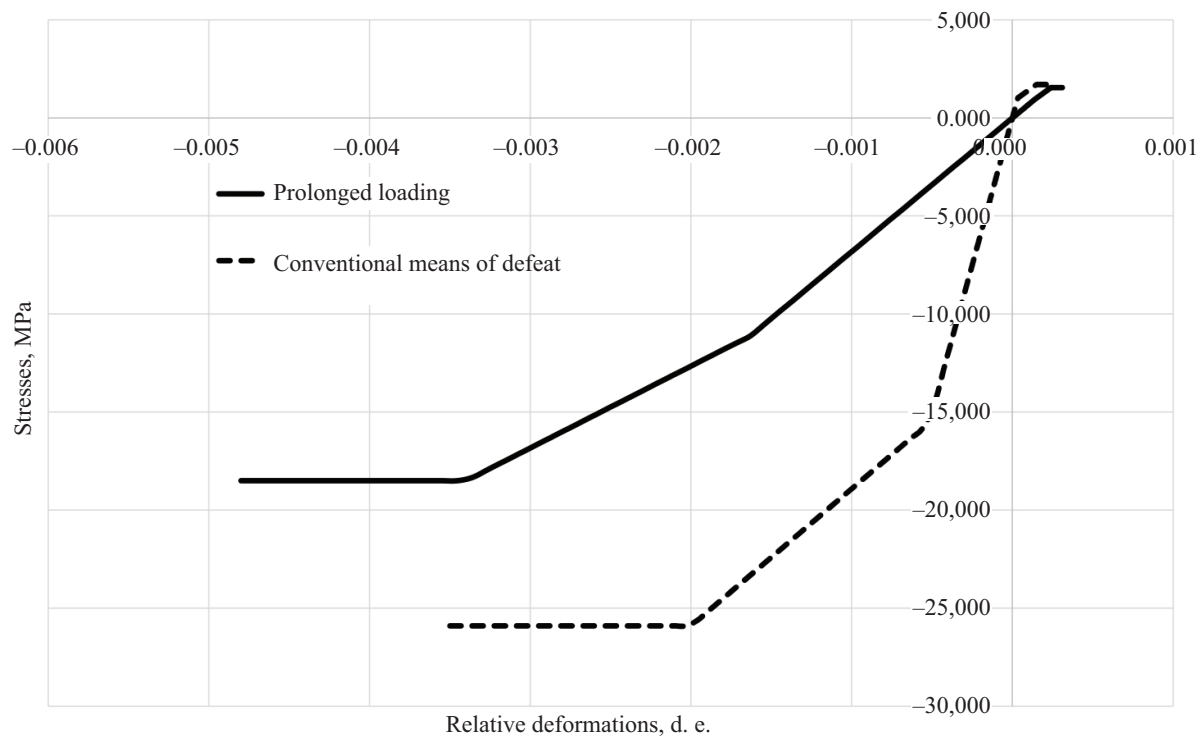


Fig. 2. Performance diagram of concrete B25

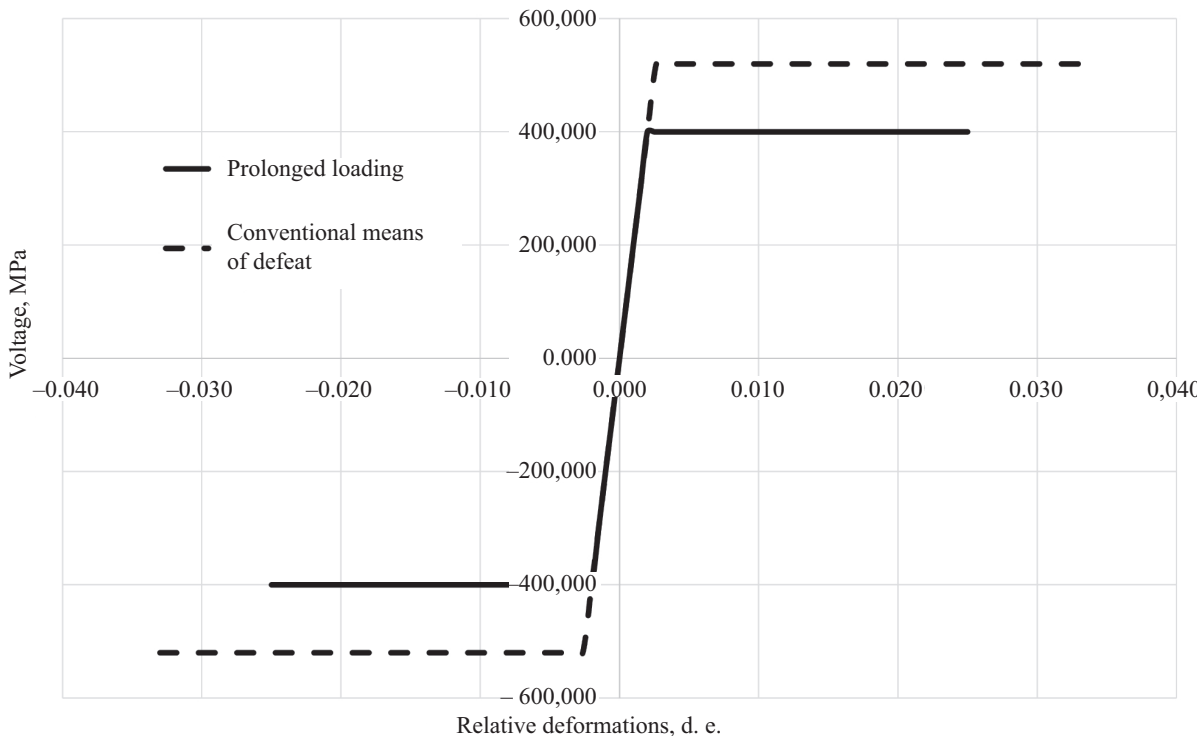


Fig. 3. Performance diagram of A400 grade steel

5) we correct the stiffness coefficients of the cross-sectional stiffness of the rod element by the following formulas (1)–(4);

6) the whole process is repeated until the accepted value converges, e.g. the maximum value of the bend-

ing moment, when checking the ultimate deformations of concrete and reinforcement.

The magnitude of the load from the impact of CMD is found by residual deformations [12], considering the unloading of the structure as elastic.

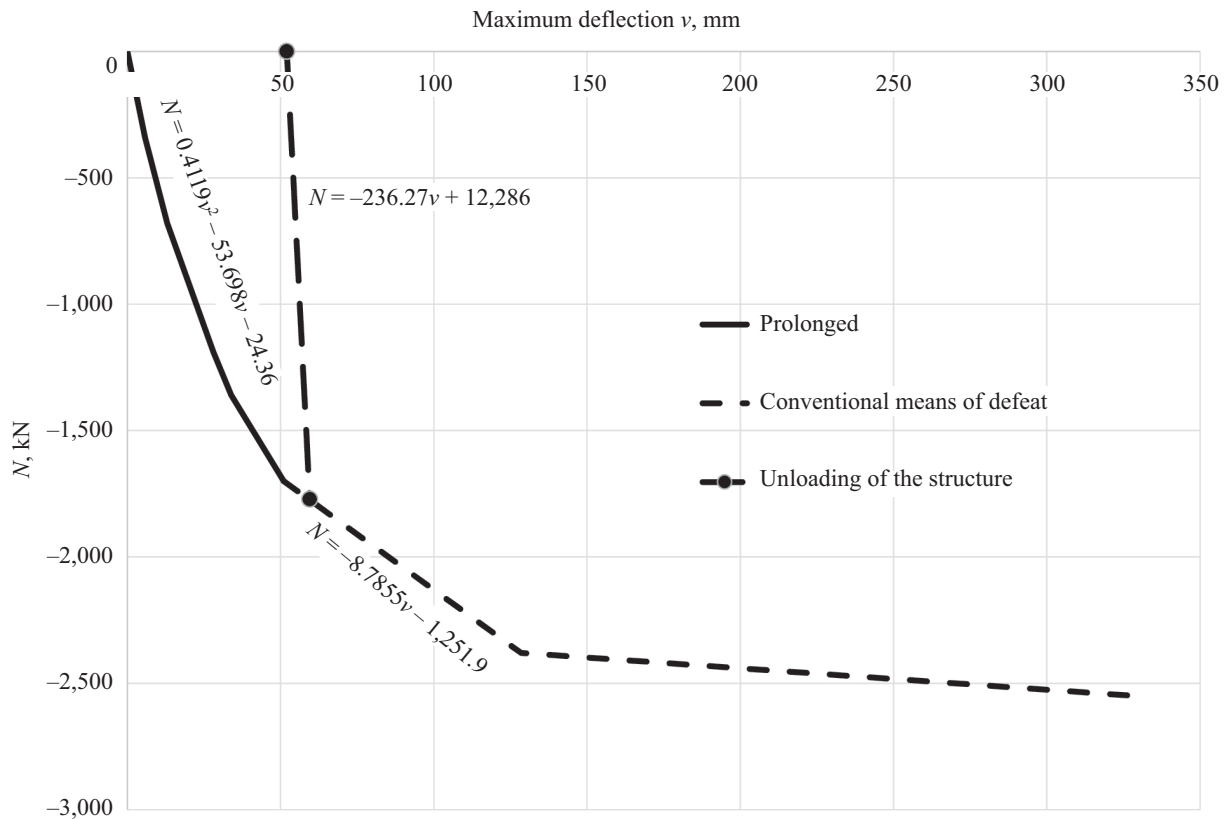


Fig. 4. Graph of interaction of external impact N , kN, with maximum deflection v , mm

For the convenience of verification calculation, the described algorithm of the methodology is automated in VBA (Visual Basic for Applications) [13, 20].

RESEARCH RESULTS

As an example of numerical calculation, consider a compression-bending rod with a square cross-section and dimensions 400×400 mm. The length of the rod is 6 m. The material of the reinforced concrete rod is heavy concrete of class B25, longitudinal reinforcement of class (4 $\varnothing$ 18) A400 according to GOST 34028–2016⁶. Longitudinal force Q and bending moment M from permanent and long-term loads (continuous action of loads) are accepted $N_l = 1,700$ kN, $M_l = 0.0$ kN. According to the results of the examination, the residual deflection (or camber) was found to be 52 mm. It is necessary to determine the magnitude of external impact from the CMD.

At the stage of impact by conventional means of defeat the value of limiting relative deformations of steel ϵ_{s2} we take 0.033 with hardening factor 1.3.

For the compressed zone of concrete of class B25 we assume a hardening factor of 1.4, and for the tensile zone of concrete we assume a hardening factor of 1.1.

⁶ GOST 34028–2016. Rolled reinforcing steel for reinforced concrete structures. Technical conditions (with Amendment). Moscow, Standardinform, 2019.

Values of limiting relative deformations of heavy concrete B25 under short-term action of external load (i.e. short-term loading mode) are taken according to p. 6.1.14 of CP 63.13330: $\epsilon_{b0} = 0.002$ in axial compression and $\epsilon_{bt0} = 0.0001$ in axial tension.

The diagrams adopted for the calculation are shown in Fig. 2, 3.

The results of numerical calculation according to the method given earlier are presented in Fig. 4.

For the site with the CMD exposure mode from Fig. 4 can be written:

$$N = -8.7855v - 1251.9. \quad (16)$$

The unloading line will be of the form:

$$N = -236.27v + 12,286. \quad (17)$$

Solving equations (16) and (17), we find that at a residual deflection of 52 mm, the magnitude of the impact was 1,703 kN.

The calculation results were performed in VBA and are shown in Fig. 4.

CONCLUSION

The developed calculation procedure allows to determine the load-bearing capacity and stability of compression-bending elements in physically and geometrically nonlinear formulation under the impact of conventional means of defeat.

REFERENCES

1. Travush V.I., Belostosky A.M., Akimov P.A. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modeling. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018; 456:012029. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012029
2. Rimshin V.I., Amelin P.A. Numerical calculation of bent reinforced concrete elements of rectangular section in the ABAQUS software. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022; 18(6):552-563. DOI: 10.22363/1815-5235-2022-18-6-552-563. EDN WCRNSY. (rus.).
3. Kolchunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037
4. Kabantsev O.V., Tonkikh G.P. Deformability and seismic resistance of masonry constructions. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 9:51-58. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.09.51-58. EDN ZFCOVN. (rus.).
5. Kodysh E., Trekin N. Particular limit state of reinforced concrete structures under emergency exposure. *Bulletin of the Scientific Research Center Construction*. 2018; 1(16):120-125. EDN YNSGFA. (rus.).
6. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B. Analysis of Approaches to Identification of Parameters of Blast Effects. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 5:45-49. EDN PDBNCF. (rus.).
7. Mondrus V., Kulikov V. An algorithm for analyzing the reactive behavior of structural elements of panel buildings. *E3S Web of Conferences*. 2023; 410:03031. DOI: 10.1051/e3sconf/202341003031
8. Tamrazyan A.G., Zubareva S. Optimal design of reinforced concrete structures taking into account the particular calculation for progressive destruction. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00163. DOI: 10.1051/mateconf/201711700163
9. Trekin N.N., Kodysh E.N. Special limit condition of reinforced concrete structures and its normalization. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 5:4-9. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.05.04-09. EDN LMCXHX. (rus.).
10. Tonkikh G.P., Belov N.N., Yugov N.T., Plyaskin A.S., Babarykina A.I. Experimental studies of the composite concretes protective properties under the action of conventional means of destruction. *Civil Security Technology*. 2024; 21(1):(79):34-44. EDN SHCIEG. (rus.).
11. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Petrov A.N. A low-iterative approach to the physically nonlinear calculation of reinforced concrete with cracks. *Construction Materials*. 2012; 6:7-9. EDN PCFXFY. (rus.).
12. Shevchenko A.V., Davidyuk A.A., Baglaev N.N. Iteration method for the calculation of reinforced concrete elements based on a nonlinear deformation model. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 3:13-18. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.13-18. EDN PJZDHL. (rus.).
13. McCracken D.D., Dorn W.S. *Numerical methods and FORTRAN programming: with applications in engineering and science*. Wiley, 1965; 457.
14. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Linear equations of force resistance and diagram σ - ϵ of concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2014; 6:40-44. EDN SYZJHL. (rus.).
15. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. *Dissipative theory of the force resistance of reinforced concrete*. Moscow, OOO TID Student, 2015; 111. EDN VSMWDX. (rus.).
16. Fedorova N.V., Phan D.Q., Korenkov P.A. Indirect Reinforcement of Reinforced Concrete Elements as a Means of Protecting a Constructive System from a Progressive Collapse. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032032. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032032
17. Halahla A. Study the Behavior of Reinforced Concrete Beam Using Finite Element Analysis. *World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*. 2018. DOI: 10.11159/icseem18.103
18. De Santana Gomes W.J. Reliability analysis of reinforced concrete beams using finite element models. *Proceedings of The XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*. 2017. DOI: 10.20906/CPS/CILAMCE2017-0145
19. Ribeiro R.R.J., Diógenes H.J.F., Nóbrega M.V., El Debs A.L.H.C. A survey of the mechanical properties of concrete for structural purposes prepared on construction sites. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2016; 9(5):722-744. DOI: 10.1590/S1983-41952016000500005
20. Pangaribuan G. *An Introduction to Excel for Civil Engineers: From Engineering Theory to Excel Practice*. 2016; 387.

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on December 25, 2024.

Approved for publication on January 25, 2025.

BIONOTES: **Vladimir I. Rimshin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Housing and Communal Services; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research Univer-**

sity) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Laboratory for Monitoring Housing and Public Utilities and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 420903, Scopus: 56258934600, ResearcherID: P-4928-2015, ORCID: 0000-0002-9084-4105; v.rimshin@niisf.ru;

Andrey V. Shevchenko — Candidate of Technical Sciences, chief engineer; **Design and Technology Bureau Reinforced Concrete**; build. 64, 6 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; SPIN-code: 9509-5666, ID RSCI: 712777; shevchenko@ktbbeton.com;

Elvira R. Kuzhakhmetova — chief specialist; **Design and Technology Bureau Reinforced Concrete**; build. 64, 6 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; SPIN-code: 1949-1140, ID RSCI: 934567, Scopus: 57920114400, ResearcherID: HJI-1854-2023, ORCID: 0000-0002-0907-786X; e.kuzhahmetova@ktbbeton.com;

Alexey N. Vydrin — postgraduate student of the Laboratory for Monitoring Housing and Public Utilities and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; aleksey-vydrin@yandex.ru.

Contribution of the authors: the authors have made an equivalent contribution to the manuscript.

The authors declare that there is no conflict of interest.