

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04:531.64

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.689-700

Предельное состояние стержневой конструкции в состоянии самонапряжения

Леонид Юлианович Ступишин¹, Мария Леонидовна Мошкевич²

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

² *Филиал «Академия ТОП Курск» Автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Академия ТОП»; г. Курск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Предлагается развитие теории предельного состояния конструкций. До настоящего времени каждый вид предельного состояния описывается отдельной теорией. Раскрывается методика постановки задач предельного состояния конструкций, позволяющая представить все возможные формулировки с единых позиций, на основе единой математической модели. Следствием является методика определения остаточной несущей способности в детерминированном виде, тогда как существующие подходы дают возможность оценить остаточную несущую способность конструкции только в вероятностном виде.

Материалы и методы. В основе теории лежат несколько основных предпосылок. Поля внешних воздействий на конструкцию и поле деформаций несущей системы имеют разное происхождение и законы существования. Экстремальные величины параметров деформируемой конструкции ограничены предельными величинами внешних воздействий. Экстремальные величины параметров поля деформаций могут быть найдены из задачи на собственные значения для матриц жесткости или податливости конструкции. Результат решения этой задачи совпадает с решением задачи оптимизации конструкции. Решение задачи на собственные значения дает возможность получить глобальный экстремум и учесть решения на границе области допустимых значений. Постановка задачи позволяет найти максимально и минимально возможные значения реактивного отклика конструкции на внешние воздействия. Последние формируют область допустимых значений для внутренних параметров несущей системы. Разница между предельными параметрами и работой внешних сил дает величину остаточной несущей способности конструкции.

Результаты. Рассматривается задача расчета двух стержневой системы. Показано, что предельные состояния 1-й и 2-й группы могут быть представлены в виде эллипса предельных состояний. Определены величины остаточной несущей способности в перемещениях, усилиях и энергии деформации.

Выводы. Предложена новая постановка задач о предельном состоянии конструкций. Методика расчета позволяет найти не только предельно возможные параметры конструкции, но и остаточную несущую способность конструкции в детерминированном виде.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: предельное состояние, самонапряжение, критические уровни энергии, энергетические методы, матричные методы, стержневая конструкция

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ступишин Л.Ю., Мошкевич М.Л. Предельное состояние стержневой конструкции в состоянии самонапряжения // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 689–700. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.689-700

Автор, ответственный за переписку: Леонид Юлианович Ступишин, StupishinLyu@mgsu.ru.

Limit state of a bar structure under self-stress conditions

Leonid Yu. Stupishin¹, Mariia L. Moshkevich²

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

² *Branch “TOP Academy Kursk” of the Autonomous Non-Commercial Organization of Continuing Professional Education “TOP Academy”; Kursk, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The paper deals with the development of the theory of the limit state of structures. The method is proposed for determining the limit state of the structure, allowing to describe all possible formulations from a single position, based on a single mathematical model.

Materials and methods. The theory is based on several basic assumptions. The fields of external actions on the structure and the deformation field of the supporting system have different origins and laws of existence. The extreme values of the parameters of the deformable structure are limited by the limiting values of external influences. The extreme values of the deformation field parameters can be found from the eigenvalue problem for the stiffness or flexible matrices of the structure. The result of solving this problem coincides with the solution of the design optimization problem. Solving the eigenvalue problem makes it possible to find the global extremum and take into account solutions at the boundary of the feasible region. The formulation of the problem makes it possible to find the maximum and minimum possible values of the reactive response of the structure to external influences. These values form the domain of admissible values for the internal parameters of the supporting system. The difference between the limiting parameters and the work of external forces gives the value of the residual bearing capacity of the structure.

Results. The problem of calculating a two-bar system is considered. The results are given in the form of an ellipse of limit states, and the values of residual bearing capacity in displacements, forces and deformation energy.

Conclusions. The new formulation of limit states problems is proposed. The calculation method allows finding not only the maximum possible parameters of the structure, but also the residual bearing capacity of the structure in a deterministic form.

KEYWORDS: limit state, self-stress, critical energy levels, energy methods, matrix methods, bar structure

FOR CITATION: Stupishin L.Yu., Moshkevich M.L. Limit state of a bar structure under self-stress conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):689-700. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.689-700 (rus.).

Corresponding author: Leonid Yu. Stupishin, StupishinLYU@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительный прогресс в области теории расчета конструкций в строительстве, вряд ли можно говорить о завершенности изучения понятия «пределное состояние». Нормативная литература определяет «пределное состояние конструкции» как состояние, «после достижения которого, невозможна или нецелесообразна дальнейшая нормальная эксплуатация конструкций». Почти каждому виду предельных состояний соответствует своя теория. Большое внимание уделяется исследованию предельных состояний конструкций, работающих в пластической стадии [1–8], стадии ползучести [9], при хрупком разрушении от статических и сейсмических воздействий [10–17]. Пределные состояния конструкций при температурных воздействиях так же находятся в фокусе исследований [18–20]. Активно ведется поиск новых подходов к формулированию понятия «пределное состояние» [21–28], однако единый подход к описанию предельного состояния конструкции отсутствует. Превалирующей остается вероятностная формулировка как в оценке надежности конструкций зданий и сооружений [29–34], так и их остаточного ресурса [35].

В рамках постановки задачи строительной механики на основе минимума полной энергии деформации [36] едва ли можно построить теорию предельных состояний конструкций на единой физико-математической основе. Гипотезы первой группы предельных состояний связаны с вопросами потери прочности, устойчивости, появлением и развитием трещин, усталостью материала, упомянутыми выше. Гипотезы второй группы рассматривают такое состояние, которое не удовлетворяет эксплуатационным требованиям к конструкциям здания [37].

Такое толкование явления потери несущей способности вызывает серьезные проблемы при формализации предельных состояний какими-либо математическими и физическими моделями с единых позиций. Поэтому и существует мнение об отсут-

ствии теории предельных состояний как систематизированного подхода к предмету изучения.

В статье развивается подход, основанный на разделении полей деформации конструкции и полей внешних воздействий. В неравенствах, описывающих условия предельного состояния конструкции [38–40]:

$$\xi_{extr} \leq \xi_p; \Phi_{extr} \leq \Phi_p; U_{extr}(\xi, \Phi) \leq U_p, \quad (1)$$

в левой части содержатся экстремальные величины энергии деформации U_{extr} или обобщенных параметров перемещений ξ_{extr} и усилий Φ_{extr} . Экстремальные величины внутренних параметров поля деформаций конструкции определяются формой конструкции, геометрическими и механическими характеристиками, а также условиями опирания. Их физический смысл — величины главных значений реактивного отклика конструкции на возможные внешние воздействия.

В правой части выражения (1) располагаются величины параметров — ограничений U_p, ξ_p, Φ_p , которые, как правило, предписываются нормативными документами, расчетными процедурами определения предельных величин нагрузок (например, сейсмических) или экспериментальными данными.

Пределное состояние конструкции отождествляется с состоянием самонапряжения конструкции на критическом уровне энергии, параметры которого находятся в левой части неравенств (1). В правой части может быть величина, ограничивающая параметры деформируемой несущей системы, по предельным состояниям как первой, так и второй группы. Это соответствует факту независимого существования параметров внутреннего поля деформаций и полей внешних воздействий, порождаемых различными физическими явлениями. Математическая модель задач прочности, жесткости, как и устойчивости и динамики несущих систем, представляет собой задачу на собственные значения.

Экстремальные величины параметров конструкции позволяют найти не только максимально (мини-

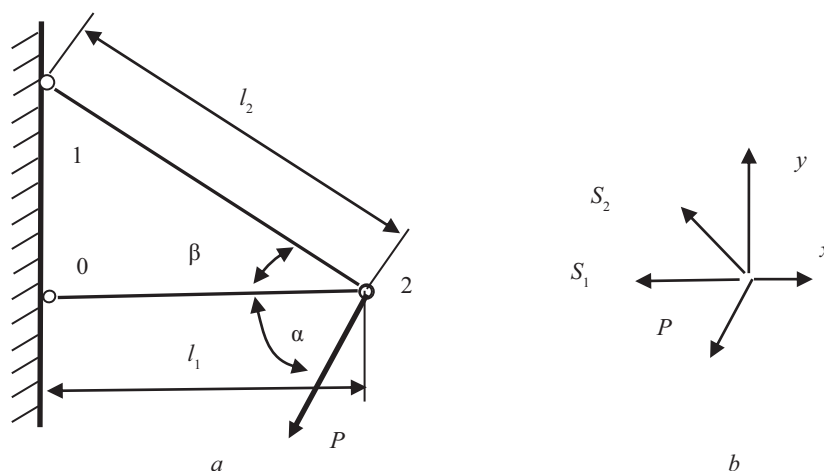


Рис. 1. Расчетная схема задачи оптимизации стержневой несущей системы

Fig. 1. Computational scheme for the optimization problem of a bar load-bearing system

мально) возможные их величины, но и остаточную несущую способность конструкции в детерминированном (не вероятностном) виде.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В традиционной (классической) строительной механике для конструкции заданной геометрии, подверженной действию внешней нагрузки, различают три вида постановки задач: проверочная, проектная и оптимизационная. Сравним классический подход с развиваемым авторами статьи на примере двух стержневой системы, показанной на рис. 1. Предельные состояния конструкции удобнее представить с помощью оптимизационной задачи по установлению максимальных величин узловых перемещений и реакций.

Оптимизационная задача

Для несущей системы, представленной на рис. 1, с заданным углом наклона стержней и условиями

опирания, требуется найти максимально (минимально) возможные перемещения узла 2 и реактивный отклик конструкции. Соотношение длин стержней и соотношение площадей поперечных сечений задано. Материал одинаковый.

Поскольку перемещения считаются бесконечно малыми, план перемещений содержит прямые, перпендикулярные возможным удлинениям (укорочениям) стержней (рис. 2).

Все возможные перемещения узла 2, обозначенные как AB , ограничены предельно допустимой величиной Δ_{AB} . Эти перемещения для любого состояния деформированной системы определяются из группы однородных уравнений совместности деформаций. Несложно убедиться из решения задач для разных направлений заданной в узле 2 силы (см. рис. 1), что проверкой правильности решения будет условие для бесконечно малых перемещений стержней:

$$\delta_{0-2}^2 + \delta_{1-2}^2 = \Delta_{AB}^2 \quad (2)$$

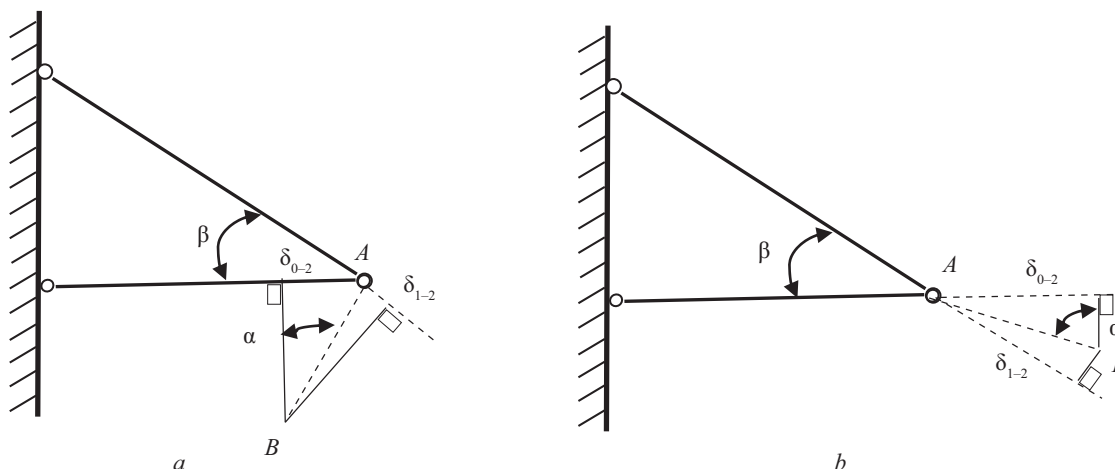


Рис. 2. Некоторые варианты планов бесконечно малых возможных перемещений двухстержневой деформируемой системы

Fig. 2. Some variants of plans for infinitesimally small possible displacements of a two-bar deformable system

которое в работах [28, 29] авторы настоящей статьи называли условием нормировки.

Перемещения характерного узла фермы можно найти с помощью интеграла Мора:

$$\delta_{iF} = \sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \frac{N_{kF} \bar{N}_{ki}}{E_k A_k} dx; \quad k = 1, 2; \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

где N_{kF} — продольное усилие в k -м элементе от нагрузки; \bar{N}_{ki} — усилие от единичной силы, приложенной в направлении i .

Усилия в стержнях, вызванные реактивной силой системы, находятся из рассмотрения узла на рис. 1, b :

$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & -N_1 - N_2 \cos \beta - P \cos \alpha = 0; \\ \Sigma Y = 0; & N_2 \sin \beta - P \sin \alpha = 0; \\ N_2 = P \sin \alpha / \sin \beta; & N_1 = -P(\sin \alpha \cos \beta / (\sin \beta + \cos \alpha)). \end{aligned} \quad (4)$$

Усилия в стержнях от горизонтального направления единичной силы:

$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & -\bar{N}_{1r} - \bar{N}_{2r} \cos \beta + 1 = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \bar{N}_{2r} \sin \beta = 0; \\ \bar{N}_{2r} = 0; & \bar{N}_{1r} = 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Усилия в стержнях от вертикального направления единичной силы:

$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & -\bar{N}_{1b} - \bar{N}_{2b} \cos \beta = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \bar{N}_{2b} \sin \beta - 1 = 0; \\ \bar{N}_{2b} = 1 / \sin \beta; & \bar{N}_{1b} = -\cos \beta / \sin \beta = -\operatorname{ctg} \beta. \end{aligned} \quad (6)$$

Горизонтальное перемещение узла 2 от реактивного усилия системы определяется по формуле Мора:

$$\begin{aligned} \delta_r = \frac{N_1 \bar{N}_{1r}}{E_1 A_1} l_1 + \frac{N_2 \bar{N}_{2r}}{E_2 A_2} l_2; \\ \delta_r = -\frac{l_1 R (\operatorname{ctg} \beta \sin \alpha + \cos \alpha)}{E_1 A_1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Вертикальное перемещение узла 2 от реактивного усилия системы:

$$\begin{aligned} \delta_b = \frac{N_1 \bar{N}_{1b}}{E_1 A_1} l_1 + \frac{N_2 \bar{N}_{2b}}{E_2 A_2} l_2; \\ \delta_b = \frac{l_1 R}{E_1 A_1} [(\operatorname{ctg} \beta \sin \alpha + \cos \alpha) \operatorname{ctg} \beta + \\ + \frac{l_2 E_1 A_1}{l_1 E_2 A_2} \frac{1}{\sin^2 \beta} \sin \alpha]. \end{aligned} \quad (8)$$

После учета соотношений длин, поперечных сечений стержней и введения безразмерных величин перемещений получим:

$$\begin{aligned} \bar{\delta}_r = \delta_r \frac{EA}{lR}; \quad \bar{\delta}_b = \delta_b \frac{EA}{lR}; \\ b = \operatorname{ctg} \beta; \quad b_1 = \frac{1}{\cos \beta \sin^2 \beta}; \quad \eta = \frac{E_1 A_1}{E_2 A_2}; \end{aligned}$$

$$\bar{\delta}_r = -(b \sin \alpha + \cos \alpha); \quad (9)$$

$$\bar{\delta}_b = -[(b \sin \alpha + \cos \alpha)b + \eta b_1 \sin \alpha].$$

Безразмерная величина перемещения узла 2 определится как:

$$\begin{aligned} \bar{\delta}^2 = \bar{\delta}_r^2 + \bar{\delta}_b^2; \\ \bar{\delta} = \sqrt{(b \sin \alpha + \cos \alpha)^2 + [(b \sin \alpha + \cos \alpha)b + \eta b_1 \sin \alpha]^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Далее необходимо записать условие для установления экстремальных величин перемещений:

$$\frac{d\bar{\delta}}{da} = 0 \quad (11)$$

и найти соответствующие углы наклона экстремальных перемещений к горизонтали, по ним вычислить перемещения узла и узловую реакцию системы.

Критические уровни энергии деформации

Покажем методику решения задачи (рис. 3) по поиску самонапряженных состояний несущей системы на критических уровнях энергии. Для этого задаем вариации усилий (перемещений) в направлении первоначально выбранных степеней свободы в обобщенных усилиях $\delta \Phi_i$ или перемещениях $\delta \xi_i$.

На рис. 3, b показан вырезанный узел и возможные направления внутренних усилий, вызываемые вариациями силовых или кинематических воздействий.

Состояние самонапряжения любой деформируемой системы выявляется через группу уравнений строительной механики представленных в форме метода сил или перемещений [38]:

$$[\mathbf{L}]\{\delta \mathbf{R}\} = \{\delta \xi\}, \quad (12)$$

где $[\mathbf{L}]$ — матрица податливости конструкции; $\{\delta \mathbf{R}\}$ — вариация вектора узловых реакций несущей системы; $\{\delta \xi\}$ — бесконечно малый вектор узловых вариаций обобщенных перемещений узла 2 несущей системы, который в условиях самонапряжения конструкции или отсутствия внешней нагрузки можно принять нулевым.

Экстремальные состояния конструкции на критических (предельных) уровнях энергии могут быть найдены как собственные значения матрицы податливости конструкции:

$$[\mathbf{L}]\{\delta \mathbf{R}\} = [\lambda^1]\{\delta \mathbf{R}\}, \quad (13)$$

где $[\lambda^1]$ — собственные значения матрицы податливости, определяющие экстремальные величины перемещений, матрица собственных векторов $[\varphi^1]$ образует с единичной величиной вариации реактивных усилий $\{\mathbf{I}\}$ векторную матрицу узловой реакции $\{\delta \mathbf{R}\} = [\varphi^1]\{\mathbf{I}\}$ несущей системы.

Матрицу податливости удобно находить через матрицу жесткости несущей системы:

$$[\mathbf{L}] = [\mathbf{K}]^{-1}, \quad (14)$$

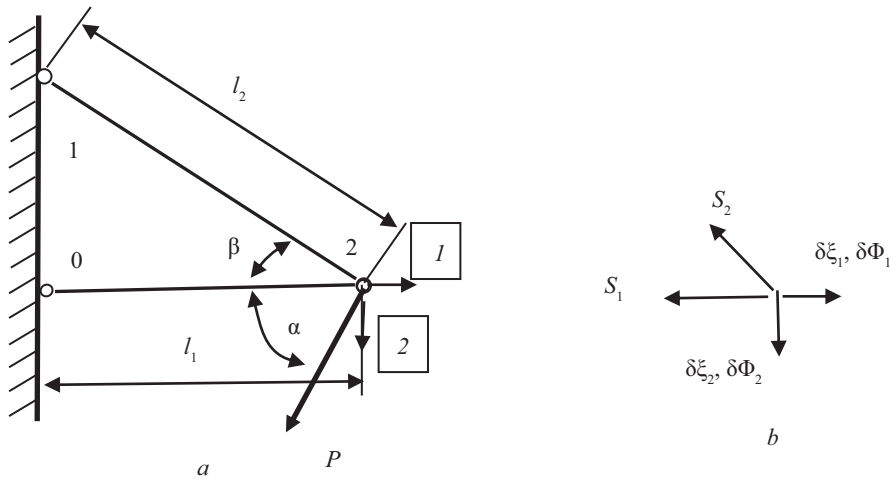


Рис. 3. Двухстержневая деформируемая система
Fig. 3. Two-bar deformable system

а матрицу жесткости конструкции вычисляют по статической матрице $[A]$ (см. уравнения (4)) и матрице внутренней жесткости $[C]$ конструкции:

$$[K] = [A][C][A]^T, \quad (15)$$

где T — транспонирование.

Из двойственных к уравнениям (12) соотношений следует:

$$[K]\{\delta\xi\} = \{\delta R\}, \quad (16)$$

откуда имеем соотношения:

$$[K]\{\delta\xi\} = [\lambda^K]\{\delta\xi\}, \quad (17)$$

где матрица собственных векторов $[\varphi^K]$ образует с единичной величиной вариации узловых перемещений $\{I\}$ векторную матрицу узловых перемещений $\{\xi\} = [\varphi^K]\{I\}$ несущей системы. Векторная матрица $[\varphi^K]$ собственных векторов задачи, как будет видно далее, имеет физический смысл углов наклона узловой реакции по отношению к первоначально выбранным направлениям степеней свободы, которые выше были обозначены как α .

Как известно [39, 40], векторы $\{R\}$ и $\{\xi\}$ образуют ортогональную систему, а значения углов в векторных матрицах $[\varphi^K]$ и $[\varphi^L]$ отличаются знаками.

Условия предельного состояния

На полученных экстремальных величинах векторов узловых перемещений $\{\xi\} = \{\delta\}$ и усилий $\{R\}$, как на осях, можно построить эллипсы предельных состояний конструкции (рис. 4).

С помощью эллипсов можно находить величины предельных перемещений (реакций) узла [40] в любом, интересующем нас направлении. Например, предельная величина перемещения узла от сосредоточенной силы, приложенной под углом α (см. рис. 1, а), может быть найдена по формуле:

$$\delta_{extr}^\alpha = \frac{\delta_{max} \delta_{min}}{\sqrt{\delta_{max}^2 (\sin\alpha)^2 + \delta_{min}^2 (\cos\alpha)^2}}. \quad (18)$$

В случае отыскания реактивных величин внутренних усилий в формуле (16) следует заменить перемещения на узловые реакции конструкции.

Остаточная величина несущей способности в перемещениях δ_{res} и реактивных усилиях R_{res} определится как:

$$\Delta_{res} = \delta_{extr} - \delta_p; R_{res} = R_{extr} - P, \quad (19)$$

где δ_p — перемещение узла, вызванное внешней нагрузкой; P — величина внешней нагрузки.

Максимально возможная энергия деформации несущей системы может быть найдена по формулам:

$$U^K = \{\delta_{extr}\}^T [K] \{\delta_{extr}\} / 2; \\ U^L = \{R_{extr}\}^T [L] \{R_{extr}\} / 2. \quad (20)$$

Работа внешней силы определяется следующим образом:

$$W_P^K = \{\delta^P\}^T [K] \{\delta^P\} / 2; \\ W_P^L = \{P\}^T [L] \{P\} / 2. \quad (21)$$

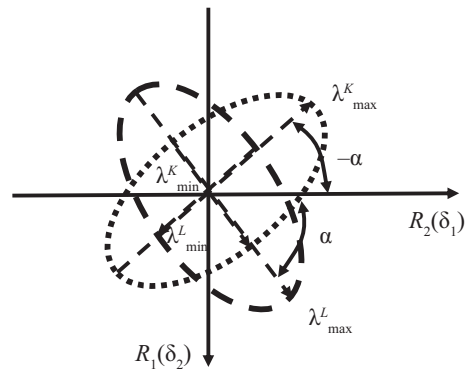


Рис. 4. Эллипсы внешней жесткости (точки) и внешней податливости (пунктир) несимметричной системы
Fig. 4. Ellipses of external stiffness (solid lines) and external compliance (dotted lines) for an asymmetric system

В случае установления остаточной несущей способности конструкции от нагрузки, приложенной в направлении α , имеем энергию:

$$U_{res} = U_{\alpha}^{KL} - W_p. \quad (22)$$

Энергия остаточной несущей способности может быть вычислена как:

$$\begin{aligned} U_{\alpha}^K &= \{\delta_{res}^{\alpha}\}^T [\mathbf{K}] \{\delta_{res}^{\alpha}\} / 2; \\ U_{\alpha}^L &= \{\mathbf{R}_{res}^{\alpha}\}^T [\mathbf{L}] \{\mathbf{R}_{res}^{\alpha}\} / 2. \end{aligned} \quad (23)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оптимизационная задача

Примем следующие исходные величины $\beta = 60^\circ$, $l_1 = l$, $l_2 = l_1 / \cos \beta$, $E_1 = E_2 = E$, $A_1 = A$, $A_2 = 1,5A$. Решим задачу (11) графически. На рис. 5 показан график изменения перемещений в зависимости от угла α .

Максимальная податливость достигается при угле наклона реакции системы к горизонтالي $\alpha \approx 0,392$ рад и составляет в безразмерном виде $\bar{\delta} \approx 2,35$. Используя обозначения, принятые в выражении (9), получаем величину реакции конструкции на действие нагрузки под углом $\alpha \approx 0,392$ рад в виде $\bar{R} = 1/\bar{\delta} = 0,425$; $R = 0,425 \frac{EA}{l}$. Перемещения узла изменяются с периодом $\pi/2$ от максимальных до минимальных значений. Поэтому график можно представить в виде эллипса предельных перемещений (см. рис. 4), который описывает предельные величины перемещений узла при текущем положении нагрузки под углом α [39].

Очевидно, что в случае более сложных расчетных схем несущих конструкций задача оптимизации приведет к сложным выкладкам и использованию итерационных процедур решения нелинейной задачи.

Критические уровни энергии

Условия самонапряжения конструкции на критическом уровне энергии позволяют получить те же результаты в алгоритмичном, общем и простом виде. Учитывая заданные соотношения между жесткостями стержней, имеем матрицу внутренней жесткости в виде:

$$[\mathbf{C}] = \frac{EA}{l} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0,75 \end{vmatrix}. \quad (24)$$

Матрица внешней жесткости определится как:

$$[\mathbf{K}] = \frac{EA}{l} \begin{vmatrix} 1,188 & 0,3248 \\ 0,3248 & 0,5625 \end{vmatrix}. \quad (25)$$

Матрица податливости конструкции запишется следующим образом:

$$[\mathbf{L}] = \frac{l}{EA} \begin{vmatrix} 1 & -0,5774 \\ -0,5774 & 2,111 \end{vmatrix}. \quad (26)$$

Собственные значения матрицы податливости:

$$[\lambda^L] = [\delta_{\min}^L] = \frac{l}{EA} \begin{vmatrix} 0,7543 & 0 \\ 0 & 2,357 \end{vmatrix}. \quad (27)$$

Векторная матрица собственных значений:

$$[\alpha^L] = \begin{vmatrix} -0,9202 & 0,3915 \\ -0,3915 & -0,9202 \end{vmatrix}. \quad (28)$$

Несложно видеть совпадение решений, полученных на основе двух различных постановок задач.

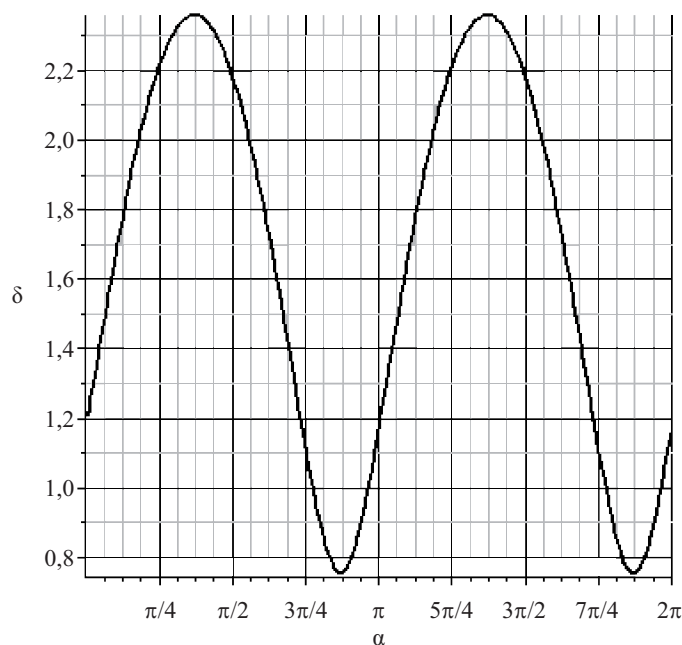


Рис. 5. Определение экстремальных величин перемещений

Fig. 5. Determination of Extreme Displacement Values

Однако второй способ дает возможность программирования предложенной методики в машинных кодах для различных видов несущих систем по единому алгоритму.

Условия предельного состояния

Пусть условие выхода связи несущей системы из работы на нагрузку определяется достижением в одном из стержней напряжения $\sigma_{cr} = 210$ МПа. Заданная величина внешней силы $P = 0,8$ кН, с углом наклона к горизонтали $\varphi = \pi/4$. Модуль упругости материала $E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа и геометрические характеристики $A_1 = 0,785 \cdot 10^{-4}$ м², $A_2 = 1,178 \cdot 10^{-4}$ м², $J_1 = 0,04906 \cdot 10^{-8}$ м⁴, $l_1 = 1$ м, $l_2 = 2$ м.

1. Внутренние усилия от составляющих заданной нагрузки $\{P_{1,2}\} = [-565,7; 565,7]^T$ (Н), согласно выражению для определения внутренних усилий в стержнях конструкции:

$$\begin{aligned} \{N_{1,2}^p\} &= -[C][A]^T[L]\{P\} = \\ &= [-892,3; 653,2]^T \text{ (Н)}, \end{aligned} \quad (29)$$

напряжения в стержнях от внешней нагрузки $\sigma_1 = -11,37$ (МПа), $\sigma_2 = 5,545$ (МПа). Проверяем устойчивость сжатого стержня по формуле Эйлера $F_{cr} = \pi^2 EJ_1/l_1^2 = 969$ (Н). Потери устойчивости от заданной внешней нагрузки нет.

Перемещение от заданной нагрузки в направлении начально выбранных степеней свободы (9) составляет $\{\delta_{1,2}\} = [-0,5683; 0,9687]^T \cdot 10^{-4}$ (м). Суммарное перемещение $\delta_p = 0,1123 \cdot 10^{-3}$ (м) направлено под углом $30,4^\circ$ к горизонтальной начальной оси.

2. Исходя из условий самонапряжения конструкции определяем слабое звено конструкции, вычисляя усилия в стержнях от узлового реактивного вектора конструкции.

Максимальное узловое перемещение конструкции согласно выражениям (27), (28) рассчитывается по формуле:

$$\{Z_{\max}\} = [\lambda^L_{\max}] \{\varphi^L\}, \quad (30)$$

и дает величины $\{Z_{1,2}^{extr}\} = \{-0,4805; 1,501\}^T \cdot 10^{-7}$ (м) с углом наклона направления перемещений $-52,7^\circ$.

Продольные деформации стержней определяются по формуле:

$$\{\Delta_{\max}\} = -[A]^T \{Z_{\max}\}. \quad (31)$$

Продольные усилия в стержнях совпадают с полученными в выражении (29):

$$\{N\} = [C] \{\Delta_{\max}\}. \quad (32)$$

Нормируем по наибольшей величине компоненты вектора внутренних усилий несущей системы и присваиваем предельное значение максимально возможной продольной силе. Остальные величины получаем согласно нормированному вектору: $\{N_{extr}\} = \{-16 485; 12 068\}^T$ (Н).

Запас несущей способности по внутренним усилиям составит по формуле (19):

$$\begin{aligned} \{N_{res}\} &= \{N_{extr}\} - \{N_p\} = \\ &= \{-15 593; 11 415\}^T \text{ (Н)}. \end{aligned} \quad (33)$$

Очевидно, что с учетом возможности потери устойчивости первым стержнем величина первой компоненты вектора станет меньше и составит -77 Н.

Остаточная величина узловых перемещений с учетом возможности потери устойчивости может быть найдена как:

$$\begin{aligned} \{Z_{res}\} &= -([C][A]^T)^{-1} \{N_{res}\} = \\ &= \{-0,4904; 112,2\}^T \cdot 10^{-5} \text{ (м)}. \end{aligned} \quad (34)$$

Остаточная величина узлового реактивного отклика конструкции в состоянии самонапряжения (в направлении внешнего воздействия):

$$\begin{aligned} \{R_{res}\} &= -([C][A]^T[L])^{-1} \{N_{res}\} = \\ &= [5630,5; 9885,3]^T \text{ (Н)}. \end{aligned} \quad (35)$$

Остаточная величина энергии деформации составит согласно выражению (23): $U_{res} = 86,87$ (МНм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрены два подхода к постановке и решению задач строительной механики [36]. Первый — постановка задачи на основе вариационного принципа минимума полной энергии конструктивной системы. Методика представлена задачей нахождения реактивного отклика конструкции на действие узловой силы, как задача оптимального проектирования. Второй подход базируется на вариационном принципе минимума потенциальной энергии самонапряжения конструкции (вариационном принципе критических уровней энергии). Методика определения параметров самонапряжения — задача на собственные значения. Цели постановки и решения двух задач — определение экстремальных реактивных откликов конструкции на возможные внешние воздействия. Реактивный отклик представлен параметрами конструкции, располагающимися в левой части неравенств предельного состояния несущей системы (1), и содержит их предельные величины.

Постановка задачи об условиях предельного состояния конструкции может быть решена как задача исследования экстремальных величин параметров отклика конструкции на возможные внешние воздействия на критических уровнях энергии деформации в состоянии самонапряжения. Получена единая физико-математическая модель исследования конструкции, находящейся в предельном состоянии. Она охватывает предельные состояния 1-й и 2-й группы, а задачи строительной механики получают единую расчетную математическую модель в виде задач на собственные значения.

Задача о предельных состояниях несущих систем, поставленная на основе минимума энергии деформации самонапряжения, не зависит от пути нагружения (кривой равновесных состояний), отпадает необходимость развития теории с учетом истории деформирования. Используется физико-математическая модель, описывающая состояние конструкции в момент, когда конструкция находится в предельном состоянии.

Соотношения обобщенных внутренних сил, перемещений и величин потенциальной энергии деформации на критических уровнях в состоянии самонапряжения одинаковы и пропорциональны константе. Это следствие однородности функции энергии деформации.

Нелинейная задача оптимизации заменяется квазилинейной задачей исследования потенциальной энергии деформации в состоянии самонапряжения.

Упрощаются не только постановка и решение задач оптимального проектирования, но и процедура решения. В отличие от задач оптимального проектирования, задача на собственные значения позволяет отыскать решение, соответствующее глобальному экстремуму, и учесть возможные результаты на границе области допустимых значений.

Появляется возможность оценить остаточную несущую способность конструкции посредством сравнения параметров, определяющих состояние несущей системы в любой момент нагружения. При этом нет необходимости использовать вероятностные оценки состояния конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Faqih I., Prabowo A.R., Adiputra R., Muhayat N., Braun M., Ehlers S.* Application of the limit design state to hull-girder ultimate strength evaluations on the ship-shaped structures // *Procedia Structural Integrity*. 2023. Vol. 47. Pp. 812–819. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.038. EDN SQAOSC.
2. *Sun M.M., Fang H.Yu., Wang N.N., Du X.M., Zhao H.Sh., Zhai Ke.J.* Limit state equation and failure pressure prediction model of pipeline with complex loading // *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. Issue 1. P. 4473. DOI: 10.1038/s41467-024-48688-1. EDN CIMRWD.
3. *Youssef M.N.N., Megahed M.M., Saleh Ch.A.R., Mohammed S.N.S.* Plastic behavior and shakedown limit of defected pressurized pipe under cyclic bending moment // *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024. Vol. 71. Issue 1. P. 106. DOI: 10.1186/s44147-024-00444-4. EDN IVGHDJ.
4. *Hegyí D., Márton P., Halmos B., Armuth M.* The application of the plastic limit analysis to extend the load-bearing capacity of historical timber roofs // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. P. 105349. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105349. EDN MIISIE.
5. *Yousef-beik S.M.M., Veismoradi S., Zarnani P., Quenneville P.* Design and testing of a self-centering friction damper-brace for compression ultimate limit state: Inelastic buckling // *Structures*. 2024. Vol. 62. P. 106166. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106166. EDN VCYPDO.
6. *Setiawan R., Komara A.I., Budiwantoro B.* Numerical and experimental investigation of aluminum double arrowhead cellular structure manufactured using sheet metal forming // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. P. 104667. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104667. EDN JWXUKW.
7. *Dong Sh., Pan W., Ye L., Wang J.* Design of displacement-based viscous damper damping structures // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Issue 1. P. 11742. DOI: 10.1038/s41598-025-94016-y. EDN GXVLLZ.
8. *Zhou J., Qin Ch.* Limit state analysis of rigid retaining structures against seismically induced passive failure in heterogeneous soils // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.04.009. EDN NCXEIL.
9. *Hurtado O.D., Álvarez A., Ortiz A.R., Areiza G., Thomson P.* Evaluation of steel ratio limits for reinforced concrete beams using reliability analysis and Bayesian methods // *Structures*. 2024. Vol. 70. P. 107611. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107611. EDN WUESBZ.
10. *Rozylo P.* Limit states of thin-walled composite structures with closed sections under axial compression // *Composites Part B: Engineering*. 2024. Vol. 287. P. 111813. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111813. EDN KVFYLK.
11. *Cacho-Pérez M.* Limit analysis of 3D building structures // *Journal of Constructional Steel Research*. 2025. Vol. 234. P. 109662. DOI: 10.1016/j.jcsr.2025.109662. EDN SDSYFW.
12. *Aita D., Bruggi M., Taliercio A.* Limit analysis of masonry arches and domes with finite strength: funicular analysis versus stability area method // *Mecanica*. 2024. DOI: 10.1007/s11012-024-01781-7. EDN SMCTGP.
13. *Trentadue F., De Tommasi D., Marasciuolo N.* A new approach to the limit analysis of masonry structures as assemblies of rigid-plastic blocks with frictional sliding contacts // *Structures*. 2025. Vol. 76. P. 108895. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108895. EDN UZLPJO.
14. *Ditommaso R., Lamarucciola N., Ponzo F.C.* Prediction of the fundamental period of infilled RC framed structures considering the maximum inter-story drift at different design limit states // *Structures*. 2024. Vol. 63. P. 106422. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106422. EDN RUSRNC.
15. *Lee Do.H., Tra S.N., Kim D.J., Lee K.* Experimental observation on the seismic performance of re-

inforced concrete columns with a well-confined plastic hinge region // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Issue 1. P. 22564. DOI: 10.1038/s41598-025-05493-0. EDN GODNCT.

16. Aicher S., Münzer A., Simon K. Screw-press gluing in timber construction — press force predictions and application limits // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. P. 106499. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106499. EDN VQXRRA.

17. Long H., Liu Y., Huang Ch., Liu K. Fatigue life prediction of beam structures with breathing cracks using finite element analysis // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 28. P. 107666. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107666. EDN OWQQA.

18. Al-Hasani L.E., Park J., Brown Ja.B., Antommattei O., Cho Y.K., Gentry T.R. et al. Performance-based limit criteria and temperature mitigation alternatives for the holistic reassessment of a mass concrete structure // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. P. e03326. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03326. EDN EWDJIM.

19. Parthasarathi N., Prakash M., Kontoni D.P.N. Assessing failure mechanisms in reinforced concrete frame structures under thermos-mechanical loading using finite element analysis // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2025. Vol. 26. Issue 8. Pp. 3289–3315. DOI: 10.1007/s42107-025-01374-z. EDN DPVQVK.

20. Ferrier E., Le Roy C., Gagnon A., Leprete E., Benzarti K., Aubagnac C. Temperature dependence of the bond strength in externally bonded CFRP systems for concrete structures // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 486. P. 141933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141933. EDN UMVZZU.

21. Федотова М.И., Шмелев Г.Д., Жукова А.В. Оценка риска обрушения здания или его части по величинам контролируемых кренов и осадок // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2023. № 1 (24). С. 9–17. DOI: 10.36622/VSTU.2023.24.1.001. EDN NWQJLC.

22. Шмелев Г.Д., Ишков А.Н., Кононова М.С. Учет деградации материалов при проведении поверочных расчетов строительных конструкций // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2025. № 1 (32). С. 20–29. DOI: 10.36622/2541-9110.2025.32.1.002. EDN SBRLNZ.

23. Федосов С.В., Котлов В.Г., Поздеев А.Г., Кузнецова Ю.А., Таран А.В. Оценка коэффициентов предельных состояний деревянных конструкций на основе теории нечетких множеств // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2022. № 2. С. 36–50. DOI: 10.25686/2542-114X.2022.2.36. EDN QQXLCU.

24. Наконечный С.Н., Азовцев А.Г. К вопросу определения предельных состояний по огнестойкости строительных конструкций // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2024. № 4 (53). С. 79–84. EDN HLTCJK.

25. Голубов Е.В., Бибииков М.В. Исследование предельных состояний строительных конструкций и способов их нормирования // *Актуальные вопросы техники, науки, технологии : сб. науч. тр. национ. конф.* 2024. С. 490–492. EDN ZMVLHO.

26. 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. Issue 1. Pp. 108–116. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116. EDN EZKHRK.

27. Перельмутер А.В. Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 12. С. 1559–1566. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566. EDN PKYMMG.

28. Abdelmaksoud A.M., Oudah F. A limit state approach for considering greenhouse gas emissions in the structural design of buildings: Environmental Impact Limit State (EILS) // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 97. P. 110866. DOI: 10.1016/j.jobee.2024.110866. EDN IQIXEH.

29. Надольский В.В. Нормируемые значения вероятности отказа строительных конструкций // *Строительство и реконструкция*. 2024. № 5 (115). С. 70–81. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-115-5-70-81. EDN CDGMOD.

30. Соловьев С.А., Соловьева А.А., Умнякова Н.П., Кочкин А.А. Анализ проблем оценки индекса надежности элементов строительных конструкций // *Жилищное строительство*. 2022. № 7. С. 32–39. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-7-32-39. EDN HYDHNH.

31. Соловьев С.А., Копейкин О.Е., Соловьева А.А. Вероятностный метод проектирования стальных ферм на заданный уровень надежности и долговечности // *Вестник МГСУ*. 2025. Т. 20. № 5. С. 655–666. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.655-666. EDN YHRGTU.

32. Герасимов Е.П. Нормирование надежности строительных конструкций по деформациям исходя из эстетико-психологических требований // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24. № 2. С. 87–94. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-87-94. EDN TGSQKB.

33. Сафаров А.Р., Дорожнинский В.Б., Андреев В.И. Оценка живучести железобетонной рамы в нелинейной динамической постановке методом статистических испытаний // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 12 (792). С. 43–55. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-792-12-43-55. EDN СПАНМ.

34. Шмелев Г.Д., Сазонов Э.В. Теоретические предпосылки оценки технического риска для строительных конструкций эксплуатируемых объектов // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфра-*

структура. 2023. № 3 (26). С. 9–16. DOI: 10.36622/VSTU.2023.26.3.001. EDN SYRQZH.

35. Смоляго Г.А., Демин В.О., Фролов Н.В., Дрокин С.В. Оценка остаточного срока службы железобетонных перекрытий с коррозионными повреждениями // *Строительство и архитектура*. 2023. Т. 11. № 3. С. 17. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-17-17. EDN FVRYOY.

36. Ступишин Л.Ю., Никитин К.Е. Принципы минимума полной энергии деформации и критических уровней энергии как основа методик решения задач строительной механики // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2025. № 3 (320). С. 32–41. DOI: 10.37538/0039-2383.2025.3.32.41. EDN PUASVE.

37. Way A., Bakker F., Proske D., Viljoen C. Serviceability limit state target reliability for concrete struc-

tures // *Structural Safety*. 2025. Vol. 114. P. 102572. DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102572. EDN MHHEUP.

38. Ступишин Л.Ю., Мошкевич М.Л. Решение задач об изгибе балки на основе вариационного критерия критических уровней энергии // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 3. С. 306–316. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316. EDN NCBVQD.

39. Stupishin L., Moshkevich M.L., Rynkovskaya M. Critical Strain Energy Levels Criterion for Structures with Lumped Parameters // *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2025. Vol. 11. Issue 1. Pp. 253–263. DOI: 10.22055/jacm.2024.46807.4598

40. Stupishin L., Moshkevich M. Limit states design theory based on critical energy levels criterion in force method form // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. No. 3 (111). DOI: 10.34910/MCE.111.1. EDN EBEHQM.

Поступила в редакцию 10 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 12 января 2026 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Леонид Юлианович Ступишин — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной и теоретической механики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 56035058900, ResearcherID: F-8492-2015, ORCID: 0000-0002-1794-867X; StupishinLyu@mgsu.ru;

Мария Леонидовна Мошкевич — кандидат экономических наук, доцент, руководитель учебной части; Филиал «Академия ТОП Курск» Автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Академия ТОП»; 305004, г. Курск, ул. Ленина, д. 60; SPIN-код: 3330-0309, РИНЦ ID: 616600, Scopus: 56189158100, ResearcherID: F-6741-2016, ORCID: 0000-0001-8749-2252; mmoshkevich@mail.ru.

Вклад авторов:

Ступишин Л.Ю. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Мошкевич М.Л. — участие в разработке примеров и их реализации, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Faqih I., Prabowo A.R., Adiputra R., Muhayat N., Braun M., Ehlers S. Application of the limit design state to hull-girder ultimate strength evaluations on the ship-shaped structures. *Procedia Structural Integrity*. 2023; 47:812-819. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.038. EDN SQAOSC.

2. Sun M.M., Fang H.Yu., Wang N.N., Du X.M., Zhao H.Sh., Zhai Ke.J. Limit state equation and failure pressure prediction model of pipeline with complex loading. *Nature Communications*. 2024; 15(1):4473. DOI: 10.1038/s41467-024-48688-1. EDN CIMRWD.

3. Youssef M.N.N., Megahed M.M., Saleh Ch.A.R., Mohammed S.N.S. Plastic behavior and shakedown limit of defected pressurized pipe under cyclic bending moment. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024; 71(1):106. DOI: 10.1186/s44147-024-00444-4. EDN IVGHDJ.

4. Hegyi D., Márton P., Halmos B., Armuth M. The application of the plastic limit analysis to extend

the load-bearing capacity of historical timber roofs. *Results in Engineering*. 2025; 26:105349. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105349. EDN MIISIE.

5. Yousef-beik S.M.M., Veismoradi S., Zarnani P., Quenneville P. Design and testing of a self-centering friction damper-brace for compression ultimate limit state: Inelastic buckling. *Structures*. 2024; 62:106166. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106166. EDN VCYPDO.

6. Setiawan R., Komara A.I., Budiwantoro B. Numerical and experimental investigation of aluminum double arrowhead cellular structure manufactured using sheet metal forming. *Results in Engineering*. 2025; 26:104667. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104667. EDN JWXUKW.

7. Dong Sh., Pan W., Ye L., Wang J. Design of displacement-based viscous damper damping structures. *Scientific Reports*. 2025; 15(1):11742. DOI: 10.1038/s41598-025-94016-y. EDN GXVLLZ.

8. Zhou J., Qin Ch. Limit state analysis of rigid retaining structures against seismically induced passive failure in heterogeneous soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.04.009. EDN NCXEIL.
9. Hurtado O.D., Álvarez A., Ortiz A.R., Areiza G., Thomson P. Evaluation of steel ratio limits for reinforced concrete beams using reliability analysis and Bayesian methods. *Structures*. 2024; 70:107611. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107611. EDN WUESBZ.
10. Rozylo P. Limit states of thin-walled composite structures with closed sections under axial compression. *Composites Part B: Engineering*. 2024; 287:111813. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111813. EDN KVFYLK.
11. Cacho-Pérez M. Limit analysis of 3D building structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2025; 234:109662. DOI: 10.1016/j.jcsr.2025.109662. EDN SDSYFW.
12. Aita D., Bruggi M., Taliercio A. Limit analysis of masonry arches and domes with finite strength: funicular analysis versus stability area method. *Meccanica*. 2024. DOI: 10.1007/s11012-024-01781-7. EDN SMCTGP.
13. Trentadue F., De Tommasi D., Marasciuolo N. A new approach to the limit analysis of masonry structures as assemblies of rigid-plastic blocks with frictional sliding contacts. *Structures*. 2025; 76:108895. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108895. EDN UZLPJO.
14. Ditommaso R., Lamarucciola N., Ponzo F.C. Prediction of the fundamental period of infilled RC framed structures considering the maximum inter-story drift at different design limit states. *Structures*. 2024; 63:106422. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106422. EDN RUSRNC.
15. Lee Do.H., Tra S.N., Kim D.J., Lee K. Experimental observation on the seismic performance of reinforced concrete columns with a well-confined plastic hinge region. *Scientific Reports*. 2025; 15(1):22564. DOI: 10.1038/s41598-025-05493-0. EDN GODNCT.
16. Aicher S., Münzer A., Simon K. Screw-press gluing in timber construction — press force predictions and application limits. *Results in Engineering*. 2025; 27:106499. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106499. EDN VQXRRA.
17. Long H., Liu Y., Huang Ch., Liu K. Fatigue life prediction of beam structures with breathing cracks using finite element analysis. *Results in Engineering*. 2025; 28:107666. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107666. EDN OWQQA.
18. Al-Hasani L.E., Park J., Brown Ja.B., Antommattei O., Cho Y.K., Gentry T.R. et al. Performance-based limit criteria and temperature mitigation alternatives for the holistic reassessment of a mass concrete structure. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20:e03326. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03326. EDN EWDJIM.
19. Parthasarathi N., Prakash M., Kontoni D.P.N. Assessing failure mechanisms in reinforced concrete frame structures under thermos-mechanical loading using finite element analysis. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2025; 26(8):3289-3315. DOI: 10.1007/s42107-025-01374-z. EDN DPVQVK.
20. Ferrier E., Le Roy C., Gagnon A., Leprete E., Benzarti K., Aubagnac C. Temperature dependence of the bond strength in externally bonded CFRP systems for concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2025; 486:141933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141933. EDN UMVZZU.
21. Fedotova M.I., Shmelev G.D., Zhukova A.V. Assessment of the risk of collapse of a building or its part according to the values of controlled lurch and subsidence. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2023; 1(24):9-17. DOI: 10.36622/VSTU.2023.24.1.001. EDN NWQJLC. (rus.).
22. Shmelev G.D., Ishkov A.N., Kononova M.S. Consideration of materials degradation during verification calculations of building structures. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2025; 1(32):20-29. DOI: 10.36622/2541-9110.2025.32.1.002. EDN SBRLNZ. (rus.).
23. Fedosov S.V., Kotlov V.G., Pozdeev A.G., Kuznetsova Iu.A., Taran A.V. Coefficient estimation of limit states in wooden structures based on the theory of fuzzy sets. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2022; 2:36-50. DOI: 10.25686/2542-114X.2022.2.36. EDN QXQLCU. (rus.).
24. Nakonechnyy S.N., Azovtsev A.G. On the issue of determining limit states for fire resistance of building structures. *Modern Problems of Civil Protection*. 2024; 4(53):79-84. EDN HLTCJK. (rus.).
25. Golubov E.V., Bibikov M.V. Investigation of the limiting conditions of building structures and ways of their normalization. *Current Issues of Engineering, Science, Technology : collection of scientific papers of the national conference*. 2024; 490-492. EDN ZMVLHO. (rus.).
26. 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; 17(1):108-116. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116. EDN EZKHRK.
27. Perelmuter A.V. Using the criterion of resistibility to assess of a structural limit state. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(12):1559-1566. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566. EDN PKYMMG. (rus.).
28. Abdelmaksoud A.M., Oudah F. A limit state approach for considering greenhouse gas emissions in the structural design of buildings: Environmental Impact Limit State (EILS). *Journal of Building Engineering*. 2024; 97:110866. DOI: 10.1016/j.jobee.2024.110866. EDN IQIXEH.

29. Nadolski V.V. Standardized values of the failure probability of building structures. *Building and Reconstruction*. 2024; 5(115):70-81. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-115-5-70-81. EDN CDGMOD. (rus.).
30. Soloviev S.A., Solovieva A.A., Umniakova N.P., Kochkin A.A. Analysis of the problems of assessing the reliability index of elements of building structures. *Housing Construction*. 2022; 7:32-39. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-7-32-39. EDN HYDHNH. (rus.).
31. Solovyev S.A., Kopeykin O.E., Solovyeva A.A. Probabilistic method of designing steel trusses for a given level of reliability and durability. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):655-666. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.655-666. EDN YHRGTU. (rus.).
32. Gerasimov E.P. Building reliability specification by deformation based on aesthetic and psychological requirements. *Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24(2):87-94. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-87-94. EDN TGSQKB. (rus.).
33. Safarov A.R., Dorozhinskiy V.B., Andreev V.I. Assessment of robustness of reinforced concrete frame in a nonlinear dynamic statement by statistical test method. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 12(792):43-55. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-792-12-43-55. EDN CIIAHM. (rus.).
34. Shmelev G.D., Sazonov E.V. Theoretical prerequisites for the assessment of technical risk for building structures of operated facilities. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2023; 3(26):9-16. DOI: 10.36622/VSTU.2023.26.3.001. EDN SYRQZH. (rus.).
35. Smolyago G., Demin V., Frolov N., Drokin S. Assessment of the residual service life of reinforced concrete slabs with corrosion damage. *Construction and Architecture*. 2023; 11(3):17. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-17-17. EDN FVRYOY. (rus.).
36. Stupishin L.Y., Nikitin K.E. The principle of minimum total strain energy and critical energy levels as the basis of the methodology for solving problems of structural mechanics. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2025; 3(320):32-41. DOI: 10.37538/0039-2383.2025.3.32.41. EDN PUASVE. (rus.).
37. Way A., Bakker F., Proske D., Viljoen C. Serviceability limit state target reliability for concrete structures. *Structural Safety*. 2025; 114:102572. DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102572. EDN MHHEUP.
38. Stupishin L.Yu., Moshkevich M.L. Problems of beam bending solution on the basis of variation criterion of critical energy levels. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):306-316. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316. EDN NCBVQD. (rus.).
39. Stupishin L., Moshkevich M.L., Rynkovskaya M. Critical Strain Energy Levels Criterion for Structures with Lumped Parameters. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2025; 11(1):253-263. DOI: 10.22055/jacm.2024.46807.4598
40. Stupishin L., Moshkevich M. Limit states design theory based on critical energy levels criterion in force method form. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 3(111). DOI: 10.34910/MCE.111.1. EDN EBEHQM.

Received January 10, 2026.

Adopted in revised form on January 12, 2026.

Approved for publication on January 29, 2026.

B I O N O T E S : **Leonid Yu. Stupishin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 56035058900, ResearcherID: F-8492-2015, ORCID: 0000-0002-1794-867X; StupishinLyu@mgsu.ru;

Mariia L. Moshkevich — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Academic Department; **Branch “TOP Academy Kursk” of the Autonomous Non-Commercial Organization of Continuing Professional Education “TOP Academy”**; 60 Lenin st., Kursk, 305040, Russian Federation; SPIN-code: 3330-0309, ID RSCI: 616600, Scopus: 56189158100, ResearcherID: F-6741-2016, ORCID: 0000-0001-8749-2252; mmoshke-vich@mail.ru.

Contribution of the authors:

Leonid Yu. Stupishin — supervision, conceptualization, methodology, writing the original text, final conclusions.

Mariia L. Moshkevich — data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.