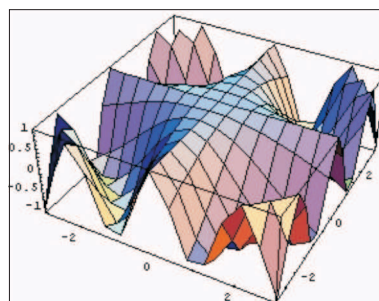


ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ



УДК 69.04/531.64

Л.Ю. СТУПИШИН, М.Л. МОШКЕВИЧ

ЗАДАЧА ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ «СЛАБОГО ЗВЕНА» В КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ КРИТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ

Предложена постановка задачи об определении «слабого звена» конструкции. В основе методики лежит критерий критических уровней внутренней потенциальной энергии деформации тела. Показано, что предельное состояние в деформируемой системе можно представить как самонапряженное состояние конструкции на критическом уровне энергии. Переход через критический уровень сопровождается потерей связей и появлением нового состояния самосопряжения. Математической моделью задачи является задача на собственные значения. Решена задача, иллюстрирующая предложенную методику на примере плоской статически неопределимой стержневой системы в форме метода сил. Показаны главные векторы вариаций перемещений и соответствующие им распределения усилий. Дан алгоритм нахождения элементов, в которых ранее других наступит предельное состояние по обобщенным внутренним усилиям. Предложенная методика позволяет не только находить «слабое звено» системы, но и служит основой для исследования конструкций на прогрессирующее разрушение. Постановка задачи позволяет строить алгоритмы проектирования систем регулирования усилий в зданиях и сооружениях, а также «умных» конструкций зданий и сооружений. Преимуществом постановки задачи является отсутствие внешних воздействий, что позволяет использовать ее для решения нелинейных задач температурных и других воздействий, неконсервативных задач со «следящей» нагрузкой.

Ключевые слова: критерий критических уровней энергии, самонапряжение, предельное состояние, стержневые системы, матричные методы, задача на собственные значения.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-746-2-11-23

В процессе эксплуатации здания (сооружения) его элементы накапливают дефекты, появляются воздействия, негативно влияющие на параметры несущих конструкций. Учитывая, что нормативная документация обновляется несколько раз в течение жизненного цикла здания, проектные параметры системы конструкций, а также действующие нагрузки могут выйти из разряда

© Ступишин Л.Ю., Мошкевич М.Л., 2021

допустимых. Потребуется детальное обследование и перерасчет проекта на предмет остаточной несущей способности [1–4].

Строго говоря, возведенная конструкция и ее проект по-разному воспринимают нагрузки и имеют разные параметры напряженно-деформированного состояния даже на начальном этапе эксплуатации, когда, как мы считаем, дефекты отсутствуют. В процессе строительства меняется расчетная схема здания, нагрузки и другие факторы, влияющие на то, что возведенная конструкция работает иначе, чем рассчитанная в проекте [5]. Причиной этому могут служить осадки фундаментов и оснований в процессе строительства, накопление геодезической ошибки в процессе возведения здания и другие технологические ошибки. Поэтому расчетная схема конструкции даже в начальный период эксплуатации отличается от исходной запроектированной. В ряде случаев следует проводить поверочные расчеты вновь возведенных зданий высокой ответственности на остаточную несущую способность.

Современные расчетные практики строятся таким образом, что проектировщик получает расчетные данные для заданного вида нагружения и параметров расчетной схемы. Чтобы изменить один из параметров (прогиб, внутреннее усилие в элементе или механические характеристики материала), требуется полный перерасчет проекта, что даже при современных быстродействующих программных средствах представляет собой непростую задачу [6–8]. Теория управления параметрами конструкции и теория оптимального проектирования пока не достигли желаемого уровня для практического инженерного использования [9, 10].

Для здания, перенесшего запроектные или аварийные воздействия, как и во всех упомянутых выше случаях, отказ нести нагрузку одного или нескольких элементов конструкции может привести к прогрессирующему разрушению всей конструкции [11, 12]. Конструктор, ведущий перерасчет несущих конструкций здания, осознает, что весь объем расчетной работы необходим лишь для одного: определения положения и расчетных (экстремальных) величин усилий и деформаций одного или нескольких элементов. В этих элементах будут нарушены условия предельного состояния с наибольшей вероятностью [4, 13–16].

Задача значительно упрощается, если существует методика расчета, позволяющая найти элементы, в которых нарушены условия предельного состояния в первую очередь. Такие элементы мы будем называть «слабым звеном» конструкции здания (сооружения), а постановку задачи – задачей о слабом звене системы (конструкции).

Статья посвящена методике расчета несущих конструкций зданий (сооружений) с целью выявления ее «слабого звена». При этом мы не будем строить алгоритмы пересчета конструкций на основе методик существующих программных комплексов или использовать теорию управления параметрами конструкций, как и теорию оптимального проектирования. В основе предлагаемой методики лежит критерий критических уровней внутренней потенциальной энергии системы [17].

Для использования предлагаемого подхода будем опираться на такие фундаментальные понятия строительной механики, как «снятие связей» в

системе, находящейся в предельном состоянии, и «самоуравновешенное состояние конструкции» [6, 18]. Отметим, что места проявления предельных состояний (точки и сечения в конструкции) и содержание гипотез о причинах потери несущей способности связаны между собой единственным фактом: предельное состояние наступает в местах появления экстремальных величин энергии деформации конструкции, и как следствие наибольших деформаций (напряжений).

В строительной механике существуют критерии предельного состояния, базирующиеся на феноменологических явлениях потери устойчивости конструкцией или возникновения резонанса, которые образно можно сформулировать как «в какой-то момент все пошло не так, как раньше». С точки зрения теории предельных состояний конструкции к этой категории задач можно отнести и задачи потери прочности конструкцией. А если считать, что понятие предельного состояния выбирает проектировщик в соответствии с поставленными перед проектом целями, то и параметры второго предельного состояния можно отнести к сформулированной категории задач. Благодаря постановке проблемы в виде задач на собственные значения можно получить обобщенный подход к построению математической модели физических явлений, связанных с понятием «предельное состояние».

Если предельное состояние ведет к снятию связей в системе, то следует обратиться к кинематическому анализу систем для принятия решения о неизменяемости конструкции. Для простоты дальнейшие рассуждения будем вести на примере плоских стержневых систем. Тогда в любом поперечном сечении статически определимой конструкции имеем соединение с минимальным числом необходимых связей, показанное на рис. 1.

Диски I и II соединены тремя связями 1, 2, 3 таким образом, что перемещения невозможны. Система становится геометрически изменяемой при снятии хотя бы одной связи, при этом образуется центр вращения, находящийся на пересечении осей оставшихся целыми двух связей из трех (1, 2 или 3). Учитывая, что связи имеют бесконечно малые размеры, получаем центр вращения в рассматриваемом сечении. Заметим, что идея снятия связей не нова и лежит в основе кинематического метода построения линий влияния и других методов строительной механики [19, 20].

Превращение статически неопределимой конструкции в геометрически изменяемую систему может моделировать переход от предельного состояния к потере несущей способности. Очевидно, что шарнир есть идеализация процессов, приводящих к разрушению связей в опасном сечении, и не обязательно появляется вследствие развития пластических деформаций [21, 22]. Тем не менее, в теории предельного равновесия систем, деформирующихся в пластической стадии, этот процесс достаточно глубоко и убедительно описан. Это и общепринятое в строительной механике понятие «пластический шарнир», и понятие «формы разрушения» конструкций, имеющих различные расчетные схемы [18, 23, 24].

Представляется, что все теории, описывающие разрушение системы,

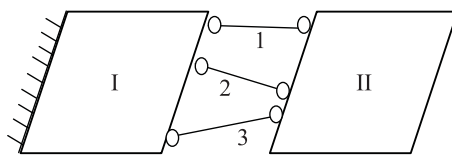


Рис. 1. Связи в опасном сечении (1, 2, 3).
Диски (I, II)

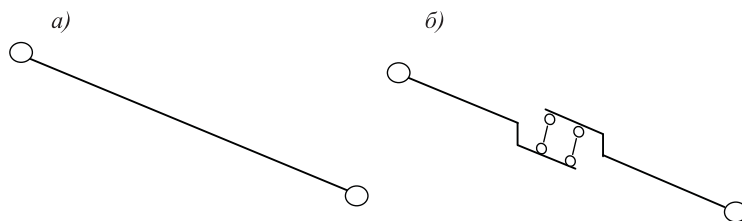


Рис. 2. Стержневой элемент (а) и элемент со снятой продольной связью (б)

с точки зрения строительной механики в конечном итоге приведут к формализации, связанной с понятием снятия связей. Поскольку в дальнейшем мы будем иллюстрировать излагаемую теорию на примере стержневых систем, на рис. 2 приведем схему выключаемой связи в стержне.

Таким образом, чтобы формализовать понятие отказа конструкции удовлетворять эксплуатационным требованиям с точки зрения строительной механики, можно принять его эквивалентным удалению связей системы с последующим превращением конструкции в геометрически изменяемую систему [4].

Причина удаления связи определяется требованиями к элементам конструкции. Это может быть потеря прочности при растяжении или сжатии стержня вследствие появления деформаций текучести. Это может быть потеря устойчивости или хрупкое разрушение вследствие появления и развития трещин и т.п. Теоретически любой критерий, соответствующий понятию «предельное состояние», может быть использован.

Понятие самонапряжения конструкции введено уже почти век назад, но используется разными авторами для пояснения физических явлений, происходящих в твердом деформируемом теле в зависимости от решаемой проблемы. Так, в [18, 19] утверждается, что состояние самонапряжения может возникать только в статически неопределимых системах от нестыковки элементов или воздействия температуры. В [6] говорится о состоянии самонапряжения при исследовании геометрической неизменяемости, в [25] вводится эквивалентное понятие самоуравновешенной системы и используется понятие амплитуд самоуравновешенных сил при расчете статически неопределимых систем.

Критерий критических уровней энергии требует понимания состояния самонапряжения как объективно существующего состояния всей деформируемой конструкции в целом на любом этапе ее нагружения. Это состояние определяется геометрией конструкции, геометрическими и механическими характеристиками ее элементов и условиями опирания. Распределение усилий в исследуемой системе определяется конструктивной схемой элементов здания (сооружения) и изменяется подобным образом до момента достижения критического уровня внутренней потенциальной энергии. После удаления связи, вследствие перехода критического уровня, изменяется расчетная схема конструкции и состояние самонапряжения.

Выявляется состояние самонапряжения путем варьирования перемещений или усилий в узлах соединения элементов, при этом величина вариаций не оговаривается, так как энергетические уровни представляют собой дис-

критный набор критических значений однородной задачи. Состояние самонапряжения, в смысле распределения усилий в элементах конструкции или их деформаций, существует как при отсутствии нагружения, так и при любом неразрушающем уровне нагружения. Важнейшим свойством самоуравновешенных усилий или перемещений является то, что они описываются ортонормированной системой функций [6, 19]. Предельные состояния системы можно сопоставить с прохождением системой критических уровней энергии, что приводит к снятию связей. В этом случае критерий критических уровней энергии позволяет с единых позиций описывать предельные состояния математической моделью задач на собственные значения.

Проведем рассуждения для системы с сосредоточенными параметрами в несколько отличном виде, чем это дано в [17]. Если обратиться к записи задачи в форме метода сил, легко видеть, что основных систем метода сил может быть бесконечное множество, в том числе исходная статически неопределимая система. Тогда мы имеем уравнения метода сил в виде

$$[L]_i \{\Phi_{in}\}_i = \{\delta_{k\Phi^{ex}}\}, \quad i = 1, 2, \dots, \infty. \quad (1)$$

Здесь $[L]_i$ – матрица внешней податливости конструкции на i -м этапе расчета; $\{\Phi_{in}\}_i$ – вектор обобщенных усилий в элементах системы на i -м этапе расчета;

$\{\delta_{k\Phi^{ex}}\}$ – вектор перемещений, вызванный внешними воздействиями. Знак минус учтен в значениях компонент вектора.

Поскольку вид и величины внешних воздействий не оговаривались заранее, они могут быть любыми, включая 1 и 0. Тогда свободный член $\{\delta_{k\Phi^{ex}}\}$ в уравнении (1) отсутствует при нулевых внешних воздействиях. Здесь следует напомнить, что принцип начального нулевого напряженно-деформированного состояния системы относится к проблеме выбора начала координат. Поэтому, когда мы условно принимаем исходное расчетное состояние конструкции ненапряженным с нулевыми начальными усилиями, то пренебрегаем величинами внутренних усилий самонапряжения системы.

Все возможные матрицы податливости $[L]_i$ для исследуемой нами деформируемой системы, положительно определенные до момента появления геометрической изменчивости, имеют один набор собственных значений. То есть среди всех возможных состояний самонапряжения, отвечающих рассматриваемой системе, имеются такие, которые являются особенными – главными.

После варьирования вектора обобщенных усилий $\{\delta\Phi_{in}\}$ поставленная задача приобретает вид

$$[L]_i \{\delta\Phi_{in}\}_i = [\lambda] \{\delta\Phi_{in}\}, \quad i = 1, 2, \dots, \infty. \quad (2)$$

Здесь в правой части выражения имеем компоненты главных виртуальных обобщенных перемещений узлов конструкции.

Максимальное собственное значение дает главный вектор обобщенных перемещений узлов, при которых в элементах системы реализуются максимальные внутренние обобщенные усилия. Среди полученных величин внутренних усилий можно указать элемент системы, в котором предельное состояние наступит раньше, чем в других. Это первая связь, которая будет потеряна конструкцией, и называется «слабым звеном» системы. Очевидно,

что следующая расчетная схема, полученная из рассматриваемой конструкции путем удаления связи, также потеряет «слабое звено» и т.д. У проектировщика, создавшего расчетную схему будущего здания (сооружения), появляется возможность заранее найти «слабое звено системы» при назначенных им геометрических и механических характеристиках и определить эксплуатационные требования ко всей системе.

Алгоритм задачи о «слабом звене» легко реализуется в матричном виде или в форме метода конечных элементов. Приведем некоторые известные формулы строительной механики [6, 19], записанные в матричном виде. Матрицу податливости системы можно получить, используя выражение

$$[L] = ([A]^T [B] [A])^{-1}. \quad (3)$$

Здесь $[B]$ – матрица внутренней податливости;

$[A]$ – статическая матрица системы;

T – означает транспонирование.

Решая задачу на собственные значения (2) для выражения (3), получаем главные величины вариаций податливости системы $\{\delta u\}$. Максимальное значение податливости системы и соответствующий собственный вектор используем для нахождения экстремального распределения внутренних усилий в системе

$$[N] = -[B]^{-1} [A]^T \{\delta u\}. \quad (4)$$

В случае, если предельное состояние описывается предельным значением внутреннего обобщенного усилия, выбираем стержень, который исключается из работы системы.

Если предельное состояние задается через деформации системы, находим деформации стержней по формуле

$$\{\varepsilon\} = [B]\{N\}. \quad (5)$$

Новая система без удаленной связи должна быть геометрически неизменяемой. Для нее находим матрицу податливости, собственные значения и выбираем удаляемую связь. Цикл продолжается до момента, пока система с отброшенными связями не станет геометрически изменяемой.

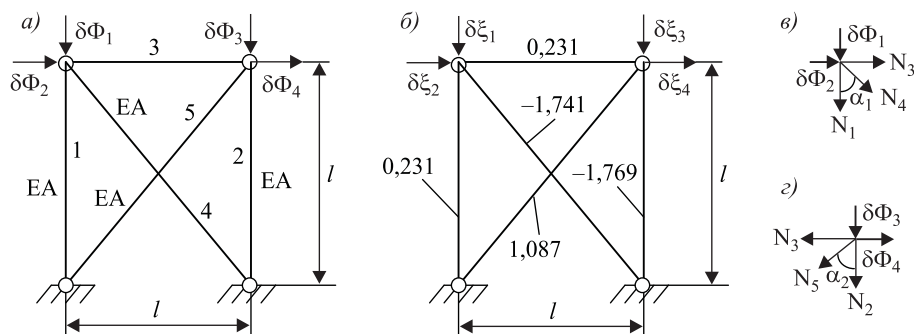


Рис. 3. Ферма

a – расчетная схема с начальными, произвольно выбранными направлениями степеней свободы в узлах в виде вариации внешних сил; б – начальные вариации перемещений в узлах, а также безразмерные усилия в стержнях фермы от единичных сил, приложенных в направлении степеней свободы (поделенные на EA/l); в, г – вырезанные узлы с вариациями усилий для построения статической матрицы

В качестве примера рассмотрим один раз статически неопределимую пятистержневую ферму на рис. 3, которая рассматривалась в [6, 19, 26]. Величина суммарной предельной силы, разрушающей систему, определяется в соответствии с гипотезой прочности или теорией предельного состояния, для которой выбираются механические характеристики системы, находящейся в критическом состоянии.

На рис. 4 приведены результаты расчета фермы. Стрелками указаны положения главных вариаций степеней свободы системы для вычисленных собственных значений. Знак компоненты положительный при вращении по часовой стрелке по отношению к начальному положению.

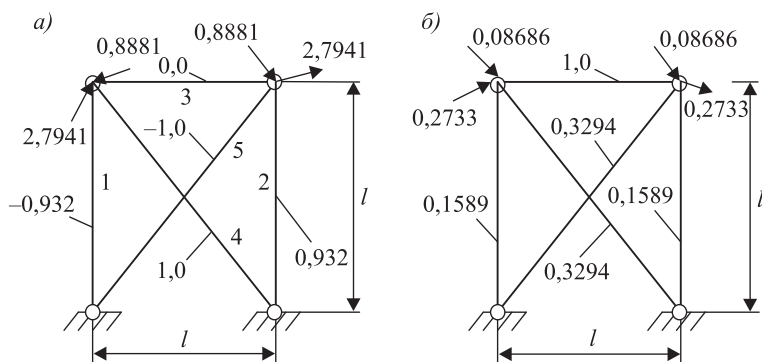


Рис. 4. Расчет фермы

a – первый главный вектор и соответствующие ему нормированные усилия (максимальные); b – второй главный вектор и соответствующие ему нормированные усилия (минимальные)

Первое собственное значение соответствует максимальной податливости системы на первом уровне критической энергии системы. Если нагружение системы вести таким образом, что результирующие внешней нагрузки будут направлены как первый собственный вектор, то усилия и деформации в системе будут изменяться подобным образом с коэффициентом, равным первому собственному значению. Первому собственному значению (уровню энергии системы) соответствует первый вид самонапряжения (см. рис. 4, a), где усилия возникают в симметрично расположенных стержнях, а в третьем стержне – нулевое.

Второй собственный вектор (см. рис. 4, b) дает состояние самонапряжения с минимальными усилиями. Вычисления показывают наличие усилий во всех стержнях системы, в симметрично расположенных стержнях усилия, как и в первом случае, одинаковы. Нормировка вектора ведется по максимальному значению компонент. Результаты расчета для произвольно выбранных осей, приведенные на рис. 4, b , показывают, что усилия, определенные для единичных воздействий, находятся в промежутке между максимальными и минимальными усилиями самонапряжения.

Из рис. 4, a следует, что четвертый и пятый стержень могут потерять несущую способность от одинакового усилия, но разных знаков. Будем считать, что прочность стержней на растяжение и сжатие одинакова, а потери устойчивости в сжатом стержне не будет. Пусть предельное состояние наступает вследствие потери прочности от растяжения в четвертом стержне. Тогда пер-

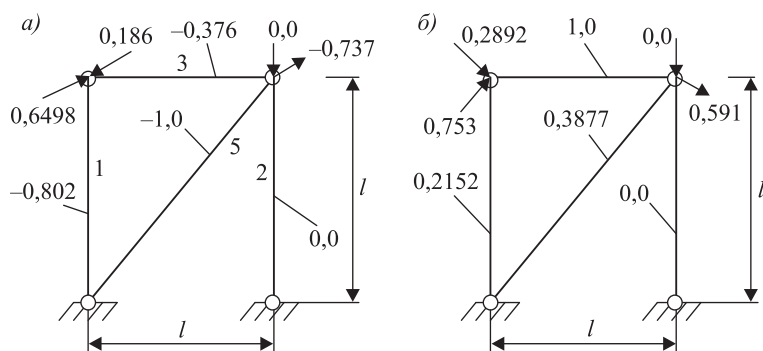


Рис. 5. Ферма без четвертого стержня

a – первый главный вектор и соответствующие ему усилия, нормированные по максимальной величине; *b* – третий главный вектор и соответствующие ему нормированные усилия

вым удаляется четвертый стержень при нормированном значении предельной силы $P_{cr} = 1,0 \times \delta\Phi$.

На втором этапе рассматривается система с удаленным четвертым стержнем, показанная на рис. 5.

Как можно видеть из рис. 5, распределение усилий для максимального и минимального собственного значения отличается. Ненормированные усилия для минимального главного вектора меньше на порядок. Поэтому рассматриваются усилия для максимального главного вектора.

Наиболее нагруженный стержень пятый наклонный с усилием $P_{cr} = 1,0 \times \delta\Phi$. Предельная нагрузка на систему за два этапа составила $P_{cr} = 2,0 \times \delta\Phi$.

Решение задачи реализует предложенную методику и алгоритм определения «слабого звена» конструкции здания (сооружения).

Критерием определения предельных состояний системы является условие критического состояния внутренней потенциальной энергии системы. Особенность критерия – независимость от внешних воздействий и исследование внутренних полей энергии деформируемого тела. Физический смысл математической модели в виде задачи на собственные значения – состояние самонапряжения системы на рассматриваемом критическом уровне.

Критерий критических уровней энергии и алгоритм позволяют решать задачи по определению элементов системы, которые первыми придут в предельное состояние. Оценивается как несущая способность здания (сооружения), так и остаточная несущая способность. Методика отыскания «слабого звена» системы становится основой для исследования прогрессирующего разрушения конструкций.

Предложенная методика позволяет решать как задачи регулирования усилий в конструкции, так и построения «умных» расчетных схем несущих конструкций зданий (сооружений) и конструкций в других областях техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добромислов А.Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам. М.: Изд-во АСВ, 2008. 72 с.

2. *Пиеничкина В.А., Сухина К.Н., Бабалич В.С., Сухин К.А.* Оценка остаточного ресурса несущих железобетонных конструкций эксплуатируемых промышленных зданий. М.: Изд-во АСВ, 2017. 176 с.
3. *Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т.* О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 1. С. 93–102.
4. *Ступишин Л.Ю.* Оценка состояния несущих конструкций зданий и сооружений. Ресурс несущей способности конструкций с дефектами // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 10. С. 39–44.
5. *Городецкий А.С., Евзеров И.Д.* Компьютерные модели конструкций. Киев: Факт, 2001. 394 с.
6. *Перельмутер А.В., Сливкер В.И.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: ДМК Пресс, 2007. 600 с.
7. *Белостоцкий А.М., Сидоров В.Н., Акимов П.А., Каишеварова Г.Г.* Математическое моделирование техногенной безопасности ответственных строительных объектов мегаполисов // *Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций*. 2010. Т. 6, № 1-2. С. 45–64.
8. *Золотов А.Б., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Мозгалева М.Л.* Дискретнонепрерывные методы расчета сооружений. М.: Изд-во «Архитектура-С», 2010. 336 с.
9. *Lim J., You C., Dayyani I.* Multi-objective topology optimization and structural analysis of periodic spaceframe structures // *Materials and Design*. 2020. No. 190. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108552>
10. *Lin C., Sheu F.* Adaptive volume constraint algorithm for stress limit-based topology optimization // *Computer-Aided Design*. 2009. No. 41. P. 685–694. DOI:10.1016/j.cad.2009.04.011
11. *Белостоцкий А.М., Карпенко Н.И., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Карпенко С.Н., Петров А.Н., Кайтуков Т.Б., Харитонов В.А.* О методах расчета напряженно-деформированного состояния и на устойчивость к прогрессирующему обрушению пространственных плитно-оболочечных систем железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности, трещинообразования и приобретаемой анизотропии // *Междунар. журн. по расчету гражданских и строительных конструкций*. 2018. Т. 14, № 2. С. 30–47.
12. *Fu G., Dawson R., Houry M., Bullock S.* Interdependent networks: vulnerability analysis and strategies to limit cascading failure // *The european physical journal B*. 2009. No. 87. P. 10. DOI: 10.1140/epjb/e2014-40876-y
13. *Богданович А.В., Махутов Н.А.* Теория многокритериальных предельных состояний силовых систем // *Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта: Наука и транспорт*. 2016. № 1. С. 102–109.
14. *Solovyev S.A.* A probabilistic approach to estimation of the ultimate load of end-bearing piles on settlement criterion // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. No. 96(4). P. 70–78. DOI: 10.18720/MCE.96.6
15. *Смоляго Г.А., Крючков А.А.* К оценке ресурса конструктивной безопасности железобетонных конструкций по предельным состояниям II группы // *Изв. Орлов. гос. техн. ун-та. Серия: Строительство и транспорт*. 2007. № 2-14. С. 176–180.
16. *Ступишин Л.Ю.* Вариационный критерий критических уровней внутренней энергии деформируемого тела // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 8. С. 21–23.
17. *Ступишин Л.Ю.* Предельное состояние строительных конструкций и критические уровни энергии // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 10. С. 102–106.

18. *Ржаницын А.Р.* Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. М.: Госстройиздат, 1954. 283 с.
19. *Ржаницын А.Р.* Строительная механика. М.: Высш. шк., 1982. 400 с.
20. *Дарков А.В., Клейн Г.К., Кузнецов В.И., Лужин О.В., Рекач В.Г., Синельников В.В., Шапиро Г.С.* Строительная механика. М.: Высш. шк., 1976. 600 с.
21. *Schijve J.* The significance of fatigue crack initiation for predictions of the fatigue limit of specimens and structures // *International Journal of Fatigue*. 2014. No. 61. P. 39–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.10.022>
22. *Махутов Н.А., Гаденин М.М., Резников Д.О., Неганов Д.А.* Анализ напряженно-деформированных и предельных состояний в экстремально нагруженных зонах машин и конструкций // *Чебышевский сборник*. 2017. Т. 18, вып. 3. С. 394–416. DOI 10.22405/2226-8383-2017-18-3-394-416
23. *Cocchetti G., Maier G.* Elastic–plastic and limit-state analyses of frames with softening plastic-hinge models by mathematical programming // *International Journal of Solids and Structures*. 2003. No. 40. P. 7219–7244. DOI:10.1016/S0020-7683(03)00363-9
24. *Alwis W.* Limit analysis using systematically generated mechanisms // *Computers & Structures*. 1988. Vol. 28, No. 3. P. 353–359.
25. *Робинсон Дж., Хаггенмайер Г.В., Контини Р.* Статический расчет конструкций методом сил и методом перемещений как проблема собственных значений // *Расчет упругих конструкций с использованием ЭВМ*. Т. 2. Л.: Судостроение, 1974. С. 91–102.
26. *Bhatt P.* Problems in structural analysis by Matrix Methods. N. Y.: The Construction Press, 1981. 465 p.

Ступишин Леонид Юлианович, канд. техн. наук, проф.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Мошкевич Мария Леонидовна, канд. экон. наук, доц.

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Получено после доработки 22.01.2021

Stupishin Leonid Yulianovich, PhD, Professor

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Moshkevich Mariya Leonidovna, PhD, Ass. Professor

Southwest State University, Kursk, Russia

THE PROBLEM OF DETERMINING THE «WEAK LINK» BASED ON THE INTERNAL ENERGY CRITICAL LEVELS OF THE CONSTRUCTION

The formulation of the problem of determining the «weak link» of the structure is proposed. The technique is based on the criterion of critical energy levels of the internal potential energy of body deformation. It is shown that the limiting state in a deformable system can be represented as a self-stressed state of a structure at a critical energy level. The transition through the critical level is accompanied by the loss of a links and the emergence of a new self-equilibrated state. The mathematical model of the problem is the eigenvalue problem. The problem is solved, illustrating the proposed methodology on the example of a plane statically indeterminate rod system in the force method form. The main vectors of displacement variations and the corresponding force distributions are shown. An algorithm is given for finding the elements in which the limit state for generalized internal efforts will

occur earlier than others. The advantage of the problem statement is the absence of external phenomena imposed upon structures.

Key words: internal energy critical levels, self-stressed state, self-equilibrated state, limit state design, pin-jointed system, matrix methods, eigenvalue problem.

REFERENCES

1. *Dobromyslov A.N.* Otsenka nadezhnosti zdaniy i sooruzheniy po vneshnim priznakam [Assessment of the reliability of buildings and structures by external signs]. Moscow, 2008. 72 p. (in Russian)
2. *Pshenichkina V.A., Sukhina K.N., Babalich V.S., Sukhin K.A.* Otsenka ostatochnogo resursa nesushchikh zhelezobetonnykh konstruktsiy ekspluatiruemyykh promyshlennykh zdaniy [Estimation of the residual life of load-bearing reinforced concrete structures of operated industrial buildings]. Moscow, 2017. 176 p. (in Russian)
3. *Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T.* O sovremennykh metodakh obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy [On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and construction]. 2015. No. 1. Pp. 93–102. (in Russian)
4. *Stupishin L.Yu.* Otsenka sostoyaniya nesushchikh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy. Resurs nesushchey sposobnosti konstruktsiy s defektami [Assessment of the state of the supporting structures of buildings and structures. Resource bearing capacity of structures with defects]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2017. No. 10. Pp. 39–44. (in Russian)
5. *Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D.* Komp'yuternyye modeli konstruktsiy [Computer models of structures]. Kiyev, 2001. 394 p. (in Russian)
6. *Perelmuter A.V., Slivker V.I.* Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza [Calculation models of structures and the possibility of their analysis]. Moscow, 2007. 600 p. (in Russian)
7. *Belostotskiy A.M., Sidorov V.N., Akimov P.A., Kashevarova G.G.* Matematicheskoye modelirovaniye technogennoy bezopasnosti otvetstvennykh stroitel'nykh ob'ektov megapolisov [Mathematical modeling of technogenic safety of critical construction projects in megalopolises]. *Mezhdunarodnyy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitel'nykh konstruktsiy* [International journal for the calculation of civil and building structures]. 2010. Vol. 6, No. 1-2. Pp. 45–64. (in Russian)
8. *Zolotov A.B., Akimov P.A., Sidorov V.N., Mozgaleva M.L.* Diskretnokontinual'nyye metody rascheta sooruzheniy [Discrete-Continuous Methods for Structural Analysis]. Moscow, 2010. 336 p. (in Russian)
9. *Lim J., You C., Dayyani I.* Multi-objective topology optimization and structural analysis of periodic spaceframe structures. *Materials and Design*. 2020. No. 190. Pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108552>
10. *Lin C., Sheu F.* Adaptive volume constraint algorithm for stress limit-based topology optimization. *Computer-Aided Design*. 2009. No. 41. Pp. 685–694. doi:10.1016/j.cad.2009.04.011
11. *Belostotskiy A.M., Karpenko N.I., Akimov P.A., Sidorov V.N., Karpenko S.N., Petrov A.N., Kaytukov T.B., Kharitonov V.A.* O metodakh rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i na ustoychivost' k progressiruyushchemu obrushe-niyu prostranstvennykh plitno-obolocheynykh sistem zhelezobetonnykh konstruktsiy s uchetom fizicheskoy nelineynosti, treshchinoobrazovaniya i priobretaemoy anizotropii [Methods for calculating the stress-strain state and resistance to progressive collapse of spatial slab-and-shell reinforced concrete structures, taking into account

- physical nonlinearity, cracking and acquired anisotropy]. *Mezhdunarodnyy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitel'nykh konstruksiy* [International journal for the calculation of civil and building structures]. 2018. Vol. 14, No. 2. Pp. 30–47. (in Russian)
12. *Fu G., Dawson R., Houry M., Bullock S.* Interdependent networks: vulnerability analysis and strategies to limit cascading failure. *The european physical journal B*. 2009. No. 87. P. 10. DOI: 10.1140/epjb/e2014-40876-y
 13. *Bogdanovich A.V., Makhutov N.A.* Teoriya mnogokriterial'nykh predel'nykh sostoyaniy silovykh sistem [Theory of multicriteria limiting states of power systems]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport]. 2016. No. 1. Pp.102–109. (in Russian)
 14. *Solovyev S.A.* A probabilistic approach to estimation of the ultimate load of end-bearing piles on settlement criterion. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. No. 96(4). Pp. 70–78. DOI: 10.18720/MCE.96.6
 15. *Smolyago G.A., Kryuchkov A.A.* K otsenke resursa konstruktivnoy bezopasnosti zhelezobetonnykh konstruksiy po predel'nym sostoyaniyam II gruppy [To the assessment of the resource of the structural safety of reinforced concrete structures according to the limiting states of the II-nd group]. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport* [Bulletin of the Oryol State Technical University. Series: Construction and transport]. 2007. No. 2-14. Pp. 176–180. (in Russian)
 16. *Stupishin L.Yu.* Variatsionnyy kriteriy kriticheskikh urovney vnutrenney energii deformiruemogo tela [Variational criterion for critical levels of internal energy of a deformed body]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2011. No. 8. Pp. 21–23. (in Russian)
 17. *Stupishin L.Yu.* Predel'noye sostoyaniye stroitel'nykh konstruksiy i kriticheskie urovni energii [Structural Limit State and Critical Energy Levels]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2018. No. 10. Pp. 102–106. (in Russian)
 18. *Rzhanitsin A.R.* Raschet sooruzheniy s uchetom plasticheskikh svoystv materialov [Calculation of structures taking into account the plastic properties of materials]. Moscow, 1954. 283 p. (in Russian)
 19. *Rzhanitsin A.R.* Stroitel'naya mekhanika [Structural mechanics]. Moscow, 1982. 400 p. (in Russian)
 20. *Darkov A.V., Kleyn G.K., Kuznetsov V.I., Luzhin O.V., Rekach V.G., Sinelnikov V.V., Shapiro G.S.* Stroitel'naya mekhanika [Structural mechanics]. Moscow, 1976. 600 p. (in Russian)
 21. *Schijve J.* The significance of fatigue crack initiation for predictions of the fatigue limit of specimens and structures. *International Journal of Fatigue*. 2014. No. 61. Pp. 39–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.10.022>
 22. *Makhutov N.A., Gadenin M.M., Resnikov D.O., Neganov D.A.* Analiz napryazhenno-deformirovannykh i predel'nykh sostoyaniy v ekstremal'no nagruzhennykh zonakh mashin i konstruksiy [Analysis of stress-strain and limit states in extremely loaded zones of machines and structures]. *Chebyshevskiy sbornik* [Chebyshev collection]. 2017. Vol. 18, Iss. 3. Pp. 394–416. (in Russian) DOI 10.22405/2226-8383-2017-18-3-394-416
 23. *Cocchetti G., Maier G.* Elastic-plastic and limit-state analyses of frames with softening plastic-hinge models by mathematical programming. *International Journal of Solids and Structures*. 2003. No. 40. Pp. 7219–7244. DOI:10.1016/S0020-7683(03)00363-9

24. *Alwis W.* Limit analysis using systematically generated mechanisms. *Computers & Structures*. 1988. Vol. 28. No. 3. Pp. 353–359.
 25. *Robinson D., Haggemayer G.V., Kontini R.* Sticheskiy raschet konstruktsiy metodom sil i metodom peremeshcheniy kak problema sobstvennykh znacheniy [Static analysis of structures by the force and displacement method as an eigenvalue problem]. *Raschet uprugikh konstruktsiy s ispol'zovaniyem EVM* [Calculation of elastic structures using a computer]. Vol. 2. Leningrad, 1974. Pp. 91–102. (in Russian)
 26. *Bhatt P.* Problems in structural analysis by Matrix Methods. New-York, 1981. 465 p.
-