

Анализ численных методов прогнозирования устойчивости элементов ферменных металлических конструкций машин

С.А. Соколов^а, М.Г. Борисов^б

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург

^а sokolov-sa@rambler.ru, ^б borisovmg138rus@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-7130-1597>, ^б <https://orcid.org/0009-0004-5798-3535>

Статья поступила 12.01.2026, принята 04.02.2026

Основными условиями работоспособности, которые используются при проектировании металлических ферменных конструкций, являются условия прочности, упругой устойчивости и жёсткости. В отдельных случаях, при интенсивном нагружении требуется обеспечить сопротивление усталости. Все эти критерии в нормативной литературе сформированы в расчёте на традиционный аналитический метод расчёта. Повсеместное использование численных методов требует адаптации нормативных методик к современным методам численного анализа. В данной работе проанализированы методы инженерного анализа устойчивости элементов ферменных конструкций их возможности, достоинства и недостатки. Показано, что численные методы расчёта на устойчивость не соответствуют нормативным методикам, которые включают возможность учёта погрешностей изготовления стержней и неточности их осевого нагружения. Прямое использование линейного алгоритма Buckling в ситуациях, когда критические напряжения близки к пределу текучести стали, могут привести к существенным погрешностям не в запас надёжности конструкции. Однако важнейшим достоинством этого алгоритма является возможность адекватного учёта особенностей ферменной конструкции и условий закрепления и нагружения расчётного стержня. Предложена методика использования результатов расчёта по алгоритму Buckling в методике нормативного аналитического метода расчёта, которая существенно повышает точность оценки устойчивости элементов ферменных конструкций. Проанализированы возможности нелинейного численного анализа устойчивости стержней (NLStatic). Отмечена специфика этого алгоритма и сложность его применения в инженерных расчётах. Для получения адекватных результатов анализа по нелинейному алгоритму необходимо отразить в модели возможные дефекты изготовления фермы, искривления стержней и эксцентриситеты узлов, что значительно осложняет процесс разработки модели. Однако нелинейный алгоритм позволяет более обосновано определить параметры и условия достижения предельного состояния ферменной конструкции. Наиболее эффективно возможно нелинейного алгоритма расчёта проявляются при анализе особо ответственных конструкций. Применение различных методов расчёта продемонстрировано на тестовой модели ферменной конструкции.

Ключевые слова: металлическая конструкция; устойчивость стержней; упругопластическое деформирование; критерии работоспособности; прочность; упругая устойчивость; метод конечных элементов.

Analysis of numerical methods for predicting the stability of elements of truss metal machine structures

S.A. Sokolov^а, M.G. Borisov^б

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, Russia

^а sokolov-sa@rambler.ru, ^б borisovmg138rus@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-7130-1597>, ^б <https://orcid.org/0009-0004-5798-3535>

Received 12.01.2026, accepted 04.02.2026

The primary performance criteria used in the design of metal truss structures include strength, elastic stability, and rigidity. In some cases, fatigue resistance is required under intense loading. All of these criteria in regulatory literature are based on traditional analytical calculation methods. The widespread use of numerical methods requires the adaptation of regulatory methodologies to modern numerical analysis techniques. This paper analyzes engineering stability analysis methods for truss elements, including their capabilities, advantages, and disadvantages. It is shown that numerical stability analysis methods are inconsistent with regulatory methodologies, which include the ability to account for member manufacturing errors and axial loading inaccuracies. Direct use of the linear Buckling algorithm in situations where critical stresses are close to the yield strength of steel can lead to significant errors that undermine the structural safety margin. However, the most important advantage of this algorithm is its ability to adequately account for the characteristics of the truss structure and the conditions of the supporting and loading of the design member. A method for utilizing Buckling algorithm calculation results in a normative analytical calculation method is proposed. This method significantly improves the accuracy of truss element stability assessment. The capabilities of nonlinear numerical analysis of member stability (NLStatic) are analyzed. The specifics of this algorithm and the complexity of its application in engineering calculations are highlighted. To obtain adequate analysis results using a nonlinear algorithm, it is necessary to reflect possible truss manufacturing defects, member curvatures, and node eccentricities in the model, which significantly complicates the model development process. However, a nonlinear algorithm allows for a more reliable determination of the parameters and conditions for reaching the ultimate limit state of a truss structure. The capabilities of a nonlinear calculation algorithm are most effective when analyzing critical structures. The application of various calculation methods is demonstrated using a test model of a truss structure.

Keywords: metal structure, rod stability, elastic-plastic deformation, serviceability criteria, strength, elastic stability, finite element method.

Введение. В настоящее время при создании машин повсеместно внедряются системы автоматизированного проектирования с использованием численного анализа напряжённо-деформированного состояния твёрдых тел. В наибольшей степени это повлияло на методику проектирования металлических конструкций машин, которые имеют сложную форму, требуют анализа многовариантного нагружения и использования различных критериев работоспособности. Основным расчётным инструментом становится метод конечных элементов (МКЭ), который значительно лучше аналитических методов учитывает сложную форму металлических конструкций машин, условия их закрепления и нагружения. Однако внедрение новых вычислительных алгоритмов приводит к противоречию с устоявшимися нормативными критериями работоспособности конструкций, которые ориентированы на аналитические методы расчёта. Этому способствует во многих случаях неосведомленность расчётчиков о моделях и допущениях, заложенных в алгоритмы программных комплексов. Для рационального применения новых расчётных возможностей необходимо анализировать численные расчётные методики и с учётом этого совершенствовать всю систему критериев работоспособности конструкций.

Одним из основных критериев работоспособности металлических конструкций является условие упругой устойчивости сжатых и сжато-изогнутых стержней, пластин и оболочек. Нарушение этого критерия может привести к локальным необратимым деформациям или потере несущей способности конструкции в целом. Настоящая работа посвящена анализу методов прогнозирования устойчивости стержневых систем с применением МКЭ. Рассмотрены возможности линейных и нелинейных алгоритмов и сопоставлены результаты их применения с требованиями нормативных методов.

Обзор существующих методов расчёта. Для инженерного анализа устойчивости стержневых конструкций используются нормативные аналитические методы, учитывающие геометрию конструкции, допустимые отклонения от проектной формы и упругопластические свойства материала [1, 2, 3]. В основе этих методов лежит модель устойчивости одиночного стержня с упруго защемлёнными концами, нагруженного продольной силой. Упругие защемления характеризуют взаимодействие этого стержня с остальной конструкцией. Влияние упругопластических свойств материала для стержней малой гибкости учитывается с помощью специального алгоритма в зависимости от формы сечения стержня. Совершенствованию методов анализа устойчивости и развитию численных алгоритмов посвящены работы [4–14].

В настоящее время для анализа устойчивости используются возможность метода конечных элементов. Для конечно-элементного анализа устойчивости фермы не требуется слишком мелкая разбивка, и вполне допустимо использование стержневых конечных элементов. Однако результат расчёта существенно зависит от точности моделирования конструкции узлов фермы. Если, например, в трубчатой ферме стержни соединены в узлах непосредственно, то есть без косынок, то и в модели

стержни соединяются в узле жёстко. Если же в ферме использована конструкция узла с косынками, то это надо учесть в модели, так как косынка существенно снижает жёсткость закрепления стержня в узле при потере устойчивости из плоскости фермы. Игнорирование косынок в модели может привести к погрешности расчёта на 10–25 % не в запас надёжности.

Метод конечных элементов даёт два подхода к оценке упругой устойчивости элементов конструкций. Один из них реализует линейный алгоритм (Buckling), другой – нелинейный (Non Linear Static) [6, 15].

При линейном расчёте (Buckling) выполняется анализ собственных форм колебаний конструкции и определяется критическая нагрузка, при которой та или иная форма будет менее энергоёмкой, чем исходная плоская или прямолинейная форма [15, 16, 17]. В результате расчёта выдается форма потери устойчивости и вычисляется коэффициент устойчивости k_{ei} , который показывает, во сколько раз надо увеличить все компоненты комбинации нагрузок (собственный вес, технологическую нагрузку, ветровое давление и т. д.), чтобы получить критическую комбинацию, приводящую к потере устойчивости по данной (i -той) форме, то есть

$$k_{ei} = \frac{F_{cei}}{F}, \quad (1)$$

где F_{cei} – критическое значение нагрузки, при которой произойдет потеря устойчивости по i -той форме; F – действующая нагрузка (комбинация нагрузок).

Данный алгоритм базируется на допущениях о том, что материал конструкции идеально упругий, деформации конструкции весьма малы и приложенные силы не меняют своего направления в процессе деформирования конструкции. Недостатком этого метода является то, что он игнорирует геометрические погрешности конструкции, отклонение от прямолинейности стержня, эксцентриситет нагружения и поперечные нагрузки (от веса, ветра и пр.). Кроме того, он не учитывает упругопластические свойства материала. В связи с этим в большинстве случаев, результаты расчёта по линейному алгоритму Buckling существенно расходятся с расчётами по нормативным методикам, особенно для стержней малой гибкости.

Достоинство этого метода заключается в том, что анализируется конструктивная система в целом с учётом взаимодействия всех её элементов. При этом расчёт даёт возможность установить наименее устойчивый элемент (или область конструкции) в системе. Расчёт производится довольно быстро, алгоритм работает на моделях из стержневых, пластинчатых и твёрдотельных конечных элементах.

Второй вариант анализа устойчивости – нелинейный расчёт по алгоритму NLStatic [15, 18, 19]. Он обеспечивает пошаговое нагружение конструкции и расчёт процесса её деформирования с учётом перемещений, полученных на предыдущих шагах нагружения. То есть, проводится расчёт по деформированной модели. Конечно-

элементная модель может быть геометрически и физически нелинейной. Этот расчёт не даёт значение критического напряжения или критической силы. На основании анализа результатов расчёта инженер должен решить, допустимы ли полученные напряжения и деформации для данной конструкции или нет.

Особенностью этого алгоритма является то, что для исследования устойчивости необходимо задать некоторые условия, провоцирующие потерю устойчивости. Например, при расчёте по этому алгоритму центрально сжатого прямого стержня он останется прямым при любой нагрузке. Для получения адекватного результата необходимо задать некоторое несовершенство формы стержня (неточность изготовления) или минимальную боковую силу. В инженерной практике это вызывает определённые сложности, так как задаваемые параметры несовершенств влияют на результат расчёта, но в реальности они являются случайными величинами. Для решения этой проблемы можно использовать то, что наиболее опасным вариантом несовершенства прямолинейных и плоских элементов будет задание исходного искривления, соответствующего форме потери их устойчивости [21]. Эту форму можно получить путём анализа собственных форм и нормировать их с учётом допусков на изготовление.

Достоинством этого алгоритма расчёта является наибольшее приближение к реальным процессам деформирования элементов конструкций с учётом упругопластических свойств материала, неточностей изготовления, больших деформаций и различных видов потери устойчивости. Данный расчёт в наибольшей степени соответствует концепции метода предельных состояний, так как позволяет оценить степень опасности, создаваемых расчётными нагрузками.

Исследование устойчивости стержней ферм. Для оценки возможностей этих алгоритмов и соответствия их нормативным требованиям выполнены расчёты устойчивости элементов модели ферменной конструкции и проанализированы их результаты. В качестве тестовой конструкции использована простейшая раскосная консольная ферма, состоящая из трёх панелей (рис. 1). Стержни имеют двутавровое сечение с наименьшей жёсткостью на изгиб в плоскости фермы, поэтому потеря устойчивости всех стержней происходит в этой плоскости. Такая конструкция выбрана для тестовой модели, так как она очень чувствительна к потере устойчивости стержней.

Высота и длина всех панелей составляла $a = 2000$ мм. Все стержни жёстко соединены в узлах. Сечение стержней имеет размеры: $b = 80$ мм, $h = 100$ мм, $t = 10$ мм (рис. 1). Площадь сечения стержней составляет $A = 32$ см², момент инерции $J = 85$ см⁴. Было использовано три варианта указанной модели, с прямым раскосом $\delta = 0$ (модель 1) и с раскосом, имеющим искривление в средней части, создающее стрелу прогиба раскоса $\delta = 3$ мм (модель 2) и $\delta = 10$ мм (модель 3) (рис. 1, а).

Модель фермы закреплена в точке B от перемещений по осям X, Y, Z , в точке C по осям X и Z и закреплена от вращения относительно оси Y . В конечно-элементной модели этой фермы стержни корневой панели смодели-

рованы пластинчатыми элементами (типа Plate) размером 10 мм, а остальные – стержневыми элементами (типа Bar) с размером 100 мм. Материал модели – сталь с модулем упругости $E = 210\,000$ МПа. Расчёты выполнены для двух вариантов значения предела текучести $\sigma_T = 200$ МПа и $\sigma_T = 300$ МПа. Вертикальная нагрузка $F = 300$ кН, приложенная на конце консоли, создаёт сжатие нижнего пояса и раскоса. Продольное усилие в нижнем поясе корневой панели, вычисленное по шарнирной расчётной схеме, составляет $S_f = 2F = 600$ кН, а в раскосе $S_d = F/\sin 45^\circ = 424$ кН. Соответственно, номинальное напряжение в поясе от продольных сил $\sigma_f = 188$ МПа в раскосе $\sigma_d = 133$ МПа. Максимальные напряжения будут больше, так как добавляются напряжения от изгиба стержня.

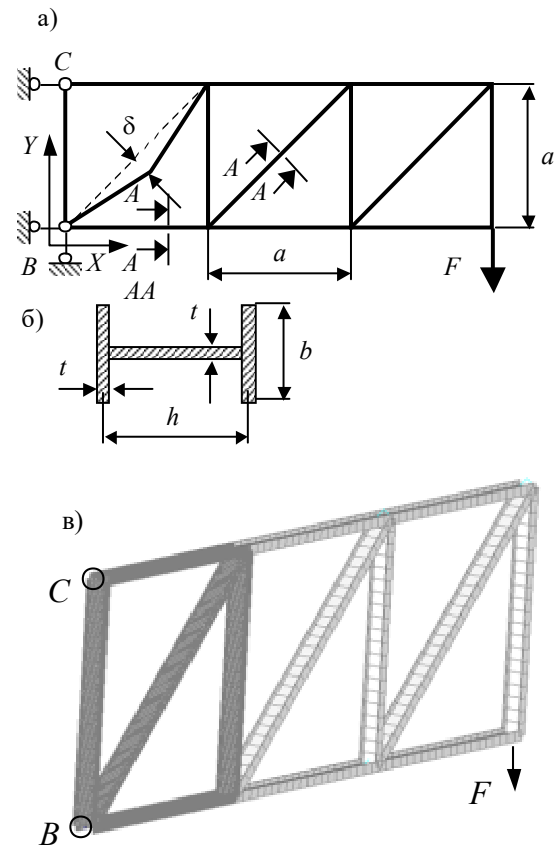


Рис. 1. Схема модели фермы (а), сечения стержней (б) и конечно-элементная модель (в)

Критические напряжения вычисляются по аналитическим нормативным методикам [1, 2] с использованием метода предельных состояний как

$$\sigma_c = \varphi \frac{\sigma_T}{\gamma_c \gamma_m}; \quad (2)$$

где φ – коэффициент снижения допускаемых (предельных) напряжений; γ_c и γ_m – коэффициенты условий работы и надёжности по материалу. В данной работе для удобства сравнения расчётных методик принято $\gamma_c = \gamma_m = 1$.

При значении предела текучести $\sigma_T = 200$ МПа критическое напряжение, вычисленное по этой методике для пояса, получилось равным $\sigma_{cf} = 87$ МПа (при $\varphi = 0,44$) и критическое усилие в поясе $S_{cf} = 279$ кН. Критическое напряжение для раскоса $\sigma_{cd} = 67$ МПа (при $\varphi = 0,34$) и критическое усилие $S_{cd} = 216$ кН. При значении предела текучести $\sigma_T = 300$ МПа критическое напряжение для пояса составляет $\sigma_{cf} = 98$ МПа (при $\varphi = 0,33$) и критическое усилие $S_{cf} = 315$ кН. Для раскоса критическое напряжение $\sigma_{cd} = 74$ МПа (при $\varphi = 0,24$) и критическое усилие $S_{cd} = 236$ кН.

Расчёт конечно-элементной модели по линейному алгоритму Buckling даёт коэффициент устойчивости по собственным формам конструкции k_{ei} (1), который не зависит ни от предела текучести, ни от искривления раскоса. Получены значения коэффициента устойчивости $k_{e1} = 1,42$, $k_{e2} = 1,65$, $k_{e3} = 1,74$, соответствующие формам потери устойчивости, показанным на рис. 2. Видно, что в первой форме потери устойчивости активное участие принимает раскос, стойка и пояс первой панели, хотя инициатором, вероятно, является раскос. Вторая и третья формы инициированы потерей устойчивости раскосов в других панелях. С учётом полученных результатов по алгоритму Buckling критическое напряжение для первого раскоса вычислим как $\sigma_{cd} = 133 \cdot 1,42 = 189$ МПа, соответственно, критическое усилие $S_{cd} = 605$ кН. Если считать, что в этой форме потери устойчивости принимает участие и пояс, то его критическое напряжение составит $\sigma_{cf} = 188 \cdot 1,42 = 267$ МПа и критическое усилие $S_{cf} = 854$ кН.

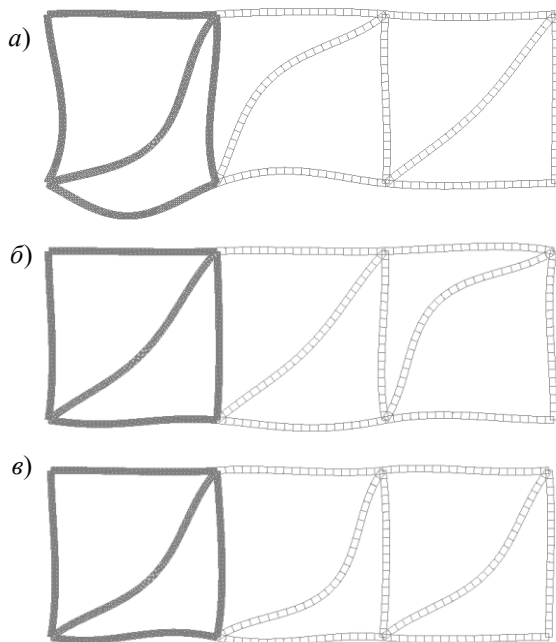


Рис. 2. Формы потери устойчивости ферменной конструкции

Следующим вариантом расчёта устойчивости стержней является алгоритм нелинейного анализа NLStatic. В этих расчётах значение предела текучести варьировалось, использовались значения $\sigma_T = 200$ МПа или $\sigma_T = 300$ МПа. Как уже отмечалось, данный алгоритм не даёт

значения критической нагрузки или напряжения, он моделирует процесс упругопластического деформирования конструкции под действием заданной нагрузки. В качестве показателя нагруженности стержня используем максимальное напряжение в нём, возникающее в том месте, где действует наибольший изгибающий момент (рис. 3). Как видно из графика, в ферме из прямых стержней напряжения от изгиба в поясе и в раскосе весьма малы, и процесс нагружения близок к линейному (кривые с символами \bullet). Искривление раскоса приводит к существенному росту напряжений в этом элементе от изгиба, и суммарные напряжения изменяются нелинейно (кривые с символами \blacktriangle , \blacklozenge). Искривление раскоса практически не повлияло на рост напряжений в поясе.

Анализ результатов. В результате расчёта и численного исследования получены оценки устойчивости стержней тестовой фермы по трём различным методикам. Каждая из использованных методик имеет свои допущения и условности. Результаты вычисления критического усилия в поясе и раскосе по нормативной методике [1, 2] показаны на графиках линиями 3 (рис. 3). Нормативная методика имеет общее признание и большой опыт использования, что косвенно свидетельствует о её консервативности. Проанализируем возможности уточнения методов оценки устойчивости с применением численных алгоритмов в инженерной практике.

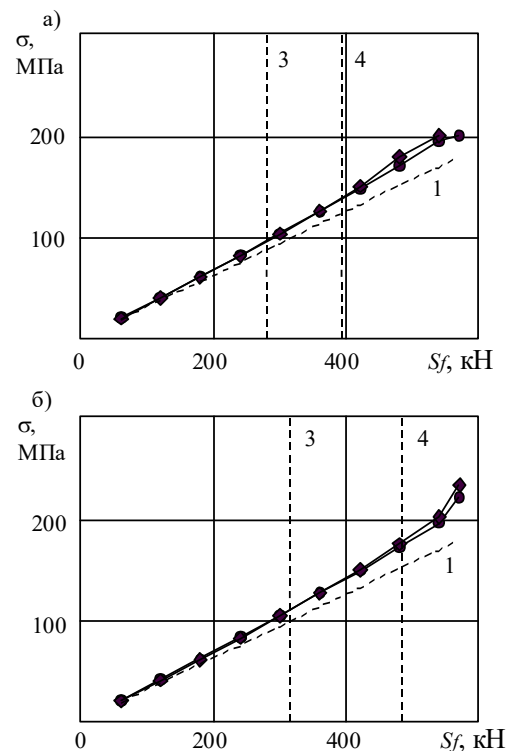


Рис. 3. Графики зависимости максимальных напряжений в поясе тестовой фермы от продольного усилия при значении предела текучести стали $\sigma_T = 200$ МПа (а) и $\sigma_T = 300$ МПа (б). \bullet , \blacktriangle , \blacklozenge – при стреле изгиба раскоса 0, 3 и 10 мм. 1 – номинальное напряжение в поясе и раскосе; 3 – критическая нагрузка в стержне, вычисленная по нормативной методике (1); 4 – то же, но с использованием численной оценки условной гибкости

Значения критических напряжений, вычисленных по линейному численному алгоритму Bucklin, получились существенно выше, чем по аналитической нормативной методике. При этом критические напряжения для пояса

превысили предел текучести $\sigma_T = 200$ МПа, а для раскоса – приблизились к этому значению. Здесь проявилась линейность этого алгоритма и отсутствие учёта пластических свойств материала. Однако это не исключает возможность эффективного применения этого метода в инженерной практике.

Достоинством этого алгоритма является его способность учитывать связь и взаимодействие всех элементов конструкции, а не состояние одного расчётного стержня, как в нормативной методике. Из расчёта Bucklin можно получить фактическую гибкость стержня в составе конструкции. Эта величина существенно зависит от значения коэффициента μ для определения расчётных (или эффективных) длин стержневых элементов $L_e = \mu L$ (L – фактическая длина стержня). В нормативных методиках используются рекомендуемые значения, которые составляют для пояса $\mu = 1$, а для раскоса $\mu = 0,85$. Эти значения не учитывают конструктивные особенности ферменной конструкции.

Для определения гибкости стержня можно использовать результат расчёта фермы по линейному алгоритму Buckling. В соответствии с известным решением задачи об устойчивости сжатого упругого стержня, критическое напряжение вычисляется как [2]

$$\sigma_{ce} = \frac{\pi^2}{\bar{\lambda}^2} \sigma_T \quad (3)$$

Здесь $\bar{\lambda} = \frac{\mu L}{\rho} \sqrt{\frac{\sigma_T}{E}}$ – условная гибкость стержня, ко-

торая зависит от типа сечения и размеров стержня, условий его закрепления в ферме и жёсткости соседних элементов; ρ – радиус инерции сечения стержня.

В результате конечно-элементного анализа по алгоритму Buckling находится коэффициент устойчивости k_e , который позволяет вычислить упругое критическое напряжение $\sigma_{ce} = k_e \sigma_n$ (σ_n – номинальное напряжение сжатия в расчётном стержне от заданной нагрузки). Подставив это выражение в формулу (3), найдём условную гибкость расчётного элемента в составе конструкции

$$\bar{\lambda} = \pi \sqrt{\frac{\sigma_T}{k_e \sigma_n}} \quad (4)$$

Дальнейший расчёт производится по нормативной методике, которая учитывает допустимые дефекты изготовления и пластические свойства стали [1, 2, 3]. Применяя выражение (4) к расчёту тестовой фермы, найдём для пояса $\bar{\lambda} = 3,3$ (вместо $\bar{\lambda} = 4,6$ в нормативном расчёте), а для раскоса получено $\bar{\lambda} = 4,0$ (вместо $\bar{\lambda} = 5,6$ в нормативном расчёте). Полученные значения $\bar{\lambda}$ позволяют вычислить коэффициент приведения длин μ как

$$\mu = \frac{\bar{\lambda} \rho}{L} \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}}$$

По этому выражению устанавливаем, что результаты численного расчёта соответствуют для пояса значению $\mu = 0,72$, вместо $\mu = 1$, и для раскоса $\mu = 0,60$, вместо $\mu = 0,85$, рекомендуемых в нормативных документах [1,2].

При подстановке скорректированных значений $\bar{\lambda}$ в нормативную методику получим при значении предела текучести $\sigma_T = 200$ МПа критическое напряжение для пояса $\sigma_{cf(200)} = 123$ МПа (критическое усилие $S_{cf(200)} = 394$ кН) и для раскоса $\sigma_{cd(200)} = 105$ МПа (критическое усилие $S_{cd(200)} = 335$ кН). При $\sigma_T = 300$ МПа критическое напряжение для пояса составляет $\sigma_{cf(300)} = 152$ МПа ($S_{cf(300)} = 486$ кН) и для раскоса $\sigma_{cd(300)} = 123$ МПа ($S_{cd(300)} = 394$ кН). Эти значения критического усилия указаны на графиках (рис. 3 и 4, линии 4). Оценки критических напряжений, полученные с использованием результатов численного анализа, являются менее консервативными и обеспечат меньшую металлоёмкость конструкции.

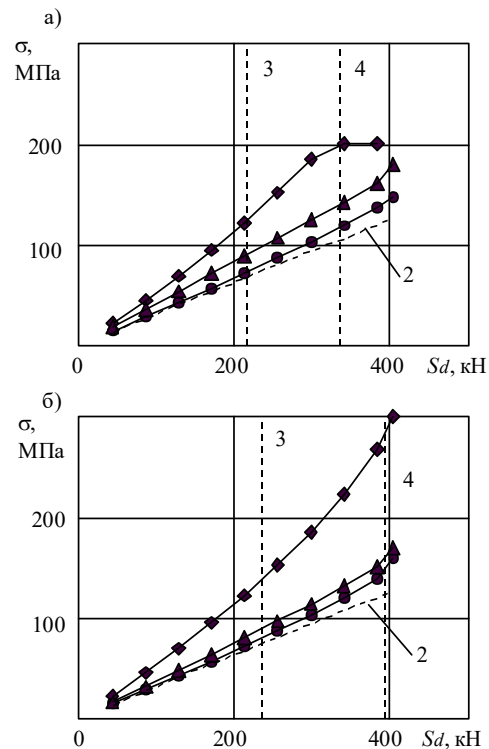


Рис. 4. Графики зависимости максимальных напряжений в раскосе тестовой фермы от продольного усилия: 2 – номинальное напряжение в раскосе. Остальные обозначения приведены на рис. 3

Нелинейный численный анализ даёт процесс изменения нормальных напряжений в стержнях, которые складываются из номинальных напряжений сжатия и изгибных напряжений. Изгиб стержней фермы возникает в результате жёсткого соединения в узлах и исходного искривления стержней. Первый вид изгиба концентрируется вблизи закреплений, поэтому мало влияет на устойчивость стержней по первой форме. Второй вид влияет значительно больше, но он характеризуется случайными параметрами и трудно моделируется.

На графиках (рис. 3 и 4) показаны напряжения в наиболее нагруженном конечном элементе соответствующего стержня. Изгибные напряжения в поясе и в раскосе равны разности графиков максимальных и номинальных (кривые 1 и 2) напряжений. Как видно в данной модели изгибные напряжения в поясе не зависят от искривления раскоса, возникают только от жёст-

кого соединения в узлах и составляют 15–17 % от номинальных напряжений (рис. 3, а). Примерно такой же уровень изгибных напряжений наблюдается и на не искривлённом раскосе (рис. 3, б). Но, если раскос искривлён, то изгибные напряжения существенно возрастают, так как форма искривления близка к первой форме колебаний стержня (символы ▲, ◆). Рассмотрено два случая исходного искривления раскоса с относительным прогибом $3/2830 = 0,0011$ и $10/2830 = 0,0036$. Первый случай близок к нормативным требованиям ГОСТ 34587-2019, который задаёт допуск формы 0,0015. Второй вариант соответствует случаю не очень качественной конструкции. Напряжения в искривлённом раскосе значительно выше, они достигают предела текучести $\sigma_T = 200$ МПа и создают пластическую деформацию. Если же предел текучести $\sigma_T = 300$ МПа, то рост напряжений при достижении нормативного критического усилия становится прогрессирующим.

Представленные материалы позволяют утверждать, что расчёт по нормативной методике (2) может давать избыточно консервативные оценки. Критические значения номинальных напряжений и усилий в стержнях, вычисленные по нормативной аналитической методике с применением гибкости, полученной из расчёта Bucklin, соответствуют нагрузкам, которые не создают в стержнях фермы никаких опасностей, если их искривления не превосходят допустимого значения. Если же искривление стержней превышает нормативные допуски, то в таком стержне может возникнуть упругопластическая потеря устойчивости. Таким образом, корректировка нормативного расчёта с применением результатов численного анализа даёт более адекватную оценку устойчивости элементов ферменных конструкций.

Нелинейный алгоритм численного анализа эффективен только в тех случаях, когда в модели может быть реализована фактическая форма стержней с учётом их искривления, погрешностей изготовления или наличия эксплуатационных повреждений. При использовании нелинейного алгоритма расчётчик должен сам определять значение предельного (или критического) напряжения. Для этого можно использовать условие прочности по максимальным напряжениям в конструкции. При этом следует учитывать степень опасности, которую со-

здаёт предельное состояние. Например, в данной модели из материала с пределом текучести $\sigma_T = 200$ МПа при действии максимальной нагрузки возникает текучесть и в раскосе, и в поясе. Это весьма опасная ситуация повреждения двух элементов в одном сечении фермы, которая может привести к нарушению несущей способности конструкции в целом.

Нелинейный анализ целесообразно использовать для оценки устойчивости элементов особо ответственных конструкций. Во-первых, модели таких конструкций прорабатываются более детально, и в них можно учесть возможные отклонения от проектной геометрии, что позволит более точно прогнозировать работоспособность и надёжность конструкции. Во-вторых, в этих расчётах рекомендуется использовать метод расчёта по предельным состояниям. В этом случае используются максимальные нагрузки, и нелинейный алгоритм расчёта позволяет более надёжно учесть взаимовлияние нагрузочных факторов и оценить опасность предельного состояния.

Заключение. Расчёт на устойчивость фермы по линейному алгоритму Buckling не соответствует требованиям нормативных документов, так как не учитывает геометрических несовершенств конструкции и упругопластических свойств материала. Этот расчёт может быть использован только во вспомогательных целях.

Линейный алгоритм Buckling целесообразно использовать для выявления стержней или зон ферменной конструкции, которые имеют наименьший запас устойчивости, а также вычисления коэффициентов устойчивости и условной гибкости для этих стержней. Проверку устойчивости выявленных элементов конструкции следует производить по нормативной методике, в которой использовать значение условной гибкости, вычисленное с использованием результатов конечно-элементного анализа.

Нелинейный конечно-элементный расчёт для оценки устойчивости элементов фермы целесообразно выполнять в том случае, если в модели могут быть отражены все фактические или возможные геометрические несовершенства конструкции и заданы параметры упругопластических свойств материала. Расчёт следует проводить по предельным состояниям. Анализ результатов расчёта следует выполнять по условию прочности.

Литература

- ГОСТ 33169-2014 Краны грузоподъёмные. Металлические конструкции. Подтверждение несущей способности. М. : Стандартинформ, 2014. 88 с.
- СП 16.13330.2017 Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. 2017. 42 с.
- ISO 20332:2015 Cranes – Proof of competence of steel structures.
- Качо М., Лопез-Рейес П.М., Лоренцана А. Точная постановка задачи об устойчивости стержневых систем и прямой метод численного решения. Известия Российской академии наук. Механика твёрдого тела. 2014. № 3. С. 114–123.
- Солдатов А.Ю., Лебедев В.Л., Семёнов В.А. Анализ устойчивости стальных стержневых систем с учётом нелинейной диаграммы деформирования материала. Строительная механика и расчёт сооружений. 2012. № 2 (241). С. 48–52.
- Галишникова В.В. Геометрически нелинейная задача устойчивости стержневых систем: о возможностях программных комплексов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 29 (48). С. 231–243.
- Lalin V.V., Lalina I.I., Ngo H.H., Vavilova A.M. An element forces formulation of stability analysis using the finite element force method for rod systems. Innovation & Investment. 2024. № 2. С. 270–275.
- Зернов В.В., Зайцев М.Б., Анурьева Ю.В. Анализ устойчивости стержневых систем в упругопластической стадии работы. Моделирование и механика конструкций. 2017. № 6. С. 4.
- Агапов В.П., Айдемиров К.Р. Расчёт ферм методом конечных элементов с учётом геометрической нелинейности. Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 4–7.

10. Турищев Л.С. О разветвленческом критерии упругопластической потери устойчивости стержневых систем. Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2007. № 3. С. 119–124.
11. Макеев С.А., Краснощёков Ю.В., Соколовский З.Н. Инженерная методика анализа пространственного деформирования упругих прямых стержней с учётом геометрической нелинейности. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 11–12 (707–708). С. 81–91.
12. Stanko Ćorić, Zoran Perović. Stability Calculation of the Plane Steel Frame Structures Using Tangent Modulus Theory. Civil Engineering. 15 July 2023 <https://doi.org/10.1155/2023/5221405>
13. H.R. Ovesy and S.A.M. Ghanndpour. Large deflection finite strip analysis of functionally graded plates under pressure loads. Int. J. of Structural Stability and Dynamics, 7(2) (2007) 193–211
14. Safa Bozkurt Coskun and Baki Öztürk. Elastic Stability Analysis of Euler Columns Using Analytical Approximate Techniques. Advances in Computational Stability Analysis. 01 August 2012. DOI: 10.5772/45940.
15. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М. : ДМК Пресс, 2013. – 784 с.
16. Mocanu Ş., Dumitriu C.Ş., Ionescu Ş.E. (2024). Finite element analysis of structural buckling. In: Tuns I., Muntean R., Radu D., Cazacu C., Galatanu T. (eds.) Proceedings of the CIBv 2023 Conference. CIBv 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 510. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60765-3_5.
17. Casciaro R. (2005). Computational asymptotic analysis of slender elastic structures after buckling. In: Pignataro, M., Gioncu, V. (eds.) Phenomenological and Mathematical Modeling of Structural Instabilities. International Centre for Mechanical Sciences CISM, Vol. 470. Springer, Vienna. https://doi.org/10.1007/3-211-38028-0_4.
18. Stanko Ćorić, Stanko Brčić, Nikolay Vatin. Elasto-Plastic Stability Analysis of the Frame Structures Using the Tangent Modulus Approach. Applied Mechanics and Materials (Volumes 725–726), Pages: 869–874. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.869>.
19. S.P. Xu, M.R. Xu, C.M. Wang. Stability Analysis of Nonlocal Elastic Columns with Initial Imperfection. Mathematical Problems in Engineering, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/341232>.
20. Sébastien Baguet, Bruno Cochelin. Stability of thin-shell structures and imperfection sensitivity analysis with the Asymptotic Numerical Method. HAL Id: hal-00623497. <https://hal.science/hal-00623497v1>. 2014.
21. Грачёв А.А., Соколов С.А. Исследование влияния криволинейности пластин на их местную устойчивость и общее напряженно-деформированное состояние. СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2008. С. 140–142.
- Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2012. Issue 29 (48). Pp. 231–243.
7. Lalin V.V., Lalina I.I., Ngo H.H., Vavilova A.M. An element forces formulation of stability analysis using the finite element force method for rod systems. Innovation & Investment. 2024. No. 2. pp. 270–275.
8. Zernov V.V., Zaitsev M.B., Anureva Yu.V. Stability analysis of rod systems in the elastic-plastic stage of operation. Modeling and mechanics of structures. 2017. No. 6. p. 4.
9. Agapov V.P., Aydemirov K.R. Finite element calculation of trusses taking into account geometric nonlinearity. Industrial and civil engineering. 2016. No. 11. pp. 4–7.
10. Turishchev L.S. On the branching criterion of elastic-plastic buckling of beam systems. Bulletin of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences. 2007. No. 3. pp. 119–124.
11. Makeev S.A., Krasnoshchekov Yu.V., Sokolovsky Z.N. Engineering methodology for analyzing spatial deformation of elastic straight beams taking into account geometric nonlinearity. Bulletin of higher educational institutions. Construction. 2017. No. 11–12 (707–708). pp. 81–91.
12. Stanko Ćorić, Zoran Perović. Stability Calculation of the Plane Steel Frame Structures Using Tangent Modulus Theory. Civil Engineering. 15 July 2023 <https://doi.org/10.1155/2023/5221405>
13. H.R. Ovesy and S.A.M. Ghanndpour. Large deflection finite strip analysis of functionally graded plates under pressure loads. Int. J. of Structural Stability and Dynamics, 7(2) (2007) 193–211
14. Safa Bozkurt Coskun and Baki Öztürk. Elastic Stability Analysis of Euler Columns Using Analytical Approximate Techniques. Advances in Computational Stability Analysis. 01 August 2012. DOI: 10.5772/45940.
15. Rychkov S.P. Modeling of structures in the Femap with NX Nastran environment. М.: ДМК Пресс, 2013. – 784 p.
16. Mocanu Ş., Dumitriu C.Ş., Ionescu Ş.E. (2024). Finite element analysis of structural buckling. In: Tuns I., Muntean R., Radu D., Cazacu C., Galatanu T. (eds.) Proceedings of the CIBv 2023 Conference. CIBv 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 510. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60765-3_5.
17. Casciaro R. (2005). Computational asymptotic analysis of slender elastic structures after buckling. In: Pignataro, M., Gioncu, V. (eds.) Phenomenological and Mathematical Modeling of Structural Instabilities. International Center for Mechanical Sciences CISM, Vol. 470. Springer, Vienna. https://doi.org/10.1007/3-211-38028-0_4.
18. Stanko Ćorić, Stanko Brčić, Nikolay Vatin. Elasto-Plastic Stability Analysis of the Frame Structures Using the Tangent Modulus Approach. Applied Mechanics and Materials (Volumes 725–726), Pages: 869–874. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.869>.
19. S.P. Xu, M.R. Xu, C.M. Wang. Stability Analysis of Nonlocal Elastic Columns with Initial Imperfection. Mathematical Problems in Engineering, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/341232>.
20. Sébastien Baguet, Bruno Cochelin. Stability of thin-shell structures and imperfection sensitivity analysis with the Asymptotic Numerical Method. HAL Id: hal-00623497. <https://hal.science/hal-00623497v1>. 2014.
21. Grachev A.A., Sokolov S.A. Study of the influence of plate curvature on their local stability and general stress-strain state. St. Petersburg. : Publishing house of the Polytechnic University, 2008. P. 140–142.

References

1. GOST 33169-2014 Overhead cranes. Metal structures. Confirmation of bearing capacity. Moscow: Standartinform, 2014. 88 p.
2. SP 16.13330.2017 Code of Practice. Steel structures. Updated version of SNIIP II-23-81*. 2017. 42 p.
3. ISO 20332:2015 Cranes – Proof of competence of steel structures.
4. Cacho M., Lopez-Reyes P.M., Lorenzana A. Exact formulation of the stability problem for beam systems and a direct method for numerical solution. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Solid State Mechanics. 2014. No. 3. Pp. 114–123.
5. Soldatov A. Yu., Lebedev V.L., Semenov V.A. Stability Analysis of Steel Rod Systems Taking into Account the Nonlinear Material Deformation Diagram. Structural Mechanics and Analysis of Structures. 2012. No. 2 (241). Pp. 48–52.
6. Galishnikova V.V. Geometrically Nonlinear Stability Problem of Rod Systems: On the Possibilities of Software Packages //