

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/14SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/14SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/14SATS220>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кузнецов Д.Н. Инженерная методика проверки местной устойчивости стенки стальных двутавровых балок по распределенным полям напряжений // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/14SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/14SATS220

For citation:

Kuznetsov D.N. (2020). Engineering methodology for checking the local stability of the wall of steel I-beams in distributed stress fields. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/14SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/14SATS220

УДК 624.014

Кузнецов Дмитрий Николаевич

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

Старший преподаватель кафедры «Металлических и деревянных конструкций»

E-mail: kuznecov82@bk.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6648-1511>

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=166226

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57205444205>

Инженерная методика проверки местной устойчивости стенки стальных двутавровых балок по распределенным полям напряжений

Аннотация. Многие годы нормативные методики разрабатывались и применялись для стержневой схематизации расчета несущих конструкций. С увеличением вычислительной мощности компьютерной техники и развитием расчетных программ, становится возможным рассмотрение расчетных ситуаций для несущих конструкций, смоделированных в трехмерном виде. Результаты расчета механических систем трехмерных конечно-элементных моделей в вычислительных комплексах представлены в виде полей распределения: напряжений, деформаций, перемещений. Напряжения могут быть распределены на плоскости для пластинчатых моделей или в объеме для моделей из объемных конечных элементов. Для корректной работы с результатами расчетов трехмерных компьютерных моделей нормативные методики расчета нуждаются в качественном обновлении и адаптации к новым уровням автоматизации проектирования.

В работе рассмотрен порядок определения значений средних напряжений в стенке разбитой на отсеки конечно-элементной модели стальной балки, при проверки местной устойчивости. Автором выполнен расчет стальной двутавровой балки перекрытия пролетом 18 метров в вычислительном комплексе SCAD Office. Геометрия балки смоделирована из конечных элементов оболочки с нулевой гауссовой кривизной. В статье рассматривается пример определения значений средних напряжений в рядовом отсеке балки. В примере, указан порядок определения средних напряжений в стенке стальной балки по распределенным полям для последующей подстановки в нормативное условие проверки местной устойчивости. Предлагается определять средние значения напряжений пропорционально площади распределения в конечных элементах вдоль рассматриваемого отсека или участка отсека, по

горизонтальным рядам. В рассмотренном методе достаточно определить средние значения напряжений для двух горизонтальных рядов, далее предлагается линейно интерполировать или экстраполировать требуемое напряжение по высоте поперечного сечения. В статье предлагается инженерная методика проверки местной устойчивости для применения в практике проектирования.

Ключевые слова: стальная балка; стенка стального двутавра; местная устойчивость; расчетная модель балки; проверка местной устойчивости; среднее значение напряжения; поля напряжений

Введение

Стальные двутавровые балки широко применяются в качестве несущих элементов строительных конструкций для сооружений различного назначения. Сварные двутавры имеют ряд преимуществ перед прокатными профилями, в их числе: более точное соответствие требуемым геометрическим характеристикам, применение менее дорогого сортового проката и другие. Экономическая эффективность сварного двутавра возрастает с уменьшением толщины стенки. Но тонкая стенка может выпучиваться из своей плоскости – терять местную устойчивость [1; 2]. Если поверхности выпучивания подкреплены ребрами жесткости, тогда напряжение, при котором происходит потеря местной устойчивости стенки, увеличивается. Шаг ребер жесткости для стальных балок не должен превышать значения, ограниченные нормами СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции». Но тонкая стенка, оконтуренная полками и ребрами жесткости, может терять местную устойчивость внутри отсека [3; 4].

При решении задач общей устойчивости или прочности, в проектировании широко закрепилась практика получения внутренних силовых факторов с помощью численных методов, реализующих метод конечных элементов (МКЭ) [5; 6]. Результаты вычислений в программах используют в нормированных методиках проверки условий устойчивости и прочности несущих конструкций для характерных сечений. Такой подход вполне оправдан возможностью анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) системы, который позволяет: находить слабые места конструкции, управлять процессами назначения сечений, вносить изменения в расчетную схему. При проверке местной устойчивости описанный алгоритм также широко применяется, но только для стержневых расчетных схем. Схематизация несущих элементов конструкций в виде стержней является наиболее частой практикой расчета. С увеличением вычислительной мощности компьютерной техники появились возможности выполнять расчеты несущих конструкций в виде трехмерных моделей [7; 8]. При подготовке геометрии расчетной модели сплошная среда конструкции разбивается на подобласти в виде конечных элементов (КЭ) соединяемых между собой в узловых точках – узлах. В каждом узле рассчитанной КЭ-модели должны выполняться условия равновесия и совместности (непрерывности перемещений). Условие равновесия всей механической системы, также должно быть выполнено. Вычисленные напряжения в КЭ модели образуют поля распределения напряжений в отдельных элементах конструкции, в том числе, в стенке рассчитанной несущей стальной балки. Согласно пункту 8.5.3 СП 16.13330 для изгибаемых элементов значения напряжений необходимо включать в условие проверки местной устойчивости стенки. Но порядок определения величин напряжений в нормах прописан только для стержневых схем. Напряжения в КЭ трехмерной модели балки, в целом, близки к соответствующим напряжениям в стержневой схеме, но могут отличаться по характеру распределения для некоторых сечений. Наиболее существенная разница выявлена в опорном отсеке [9; 10]. Различия в результатах расчетов трехмерных КЭ-моделей и стержневых расчетных схем, связаны с тем, что геометрия трехмерных моделей приближена к реальной конструкции. Методика адаптации результатов

расчетов КЭ-моделей для проверки местной устойчивости стенки стальных двутавровых балок была предложена в работах [10; 11]. Указанная методика эффективна, показывает высокую сходимость и соответствует требованиям пунктов аналитического метода проверки, прописанного в нормах для стержневых схем. В предлагаемой методике реализована возможность находить значения средних напряжений на проверяемых участках стенки, без привязки к кратности размера КЭ. Но рассмотренный метод имеет высокую трудоемкость из-за необходимости построения эпюры напряжений по всей высоте поперечного сечения и хорошо подходит для проверки не рядовых, например, опорных отсеков. Для проверки отсеков с классическим распределением напряжений по высоте стенки указанный подход, при реальном проектировании, займет у инженера-проектировщика много времени. Поэтому, в данной работе предлагается развитие адаптации метода проверки местной устойчивости стенки по распределенным полям напряжений трехмерных КЭ-моделей для увеличения скорости выполнения инженерных расчетов. Материалы данной статьи являются частью более общей тематики диссертационного исследования устойчивости и совместности, в процессе силовой работы стальных изгибаемых элементов двутаврового поперечного сечения, выполняемого автором.

1. Методика проведения исследования

Рассмотрена тестовая модель стальной двутавровой балки перекрытия пролетом 18 м. Шаг рам в поперечном направлении 6 м. Материал балки: сталь С255. Предварительно, рассчитав аналитическим методом двухопорную шарнирно-опертую балку в виде стержня, работающего на изгиб, подобрано поперечное сечение (рис. 1). Двутавровая балка имеет следующие геометрические параметры, мм (рис. 1; 2): стенка – 1100x8, симметричные полки – 300x20, опорные ребра – 300x20, ребра жесткости – 140x12 (шаг 2000 мм). Далее, в вычислительном комплексе SCAD Office [12] выполнен расчет стальной балки смоделированной из КЭ оболочки с нулевой гауссовой кривизной. Размерность модели: 4572 четырех-узловых КЭ (тип элемента 44 – четырехугольные КЭ оболочки). Каждый узел КЭ-модели имеет по шесть (три линейных, три угловых) степеней свободы. Геометрические граничные условия балки, следующие: левая опора шарнирно-неподвижная, запрещающая вертикальные и горизонтальные (по осям болтов) перемещения; правая опора шарнирно-подвижная, запрещающая вертикальные перемещения. Балка имеет раскрепляющие связи с шагом 6 м, в виде ограничения линейных перемещений из плоскости (по оси Y). Раскрепляющие связи установлены в средние узлы верхней полки (рис. 2). Балка рассчитана на сочетание следующих нагрузок: постоянная – 4,605 кПа (4,605 кН/м²), временная длительная – 0,26 кПа (0,26 кН/м²), временная кратковременная – 2,40 кПа (2,40 кН/м²). К верхнему поясу балки в плоскости стенки прикладывалась распределенная расчетная вертикальная нагрузка общей интенсивностью: $q = 7,265 \text{ кН/м}^2 \times 6 \text{ м} = 43,59 \text{ кН/м}$.

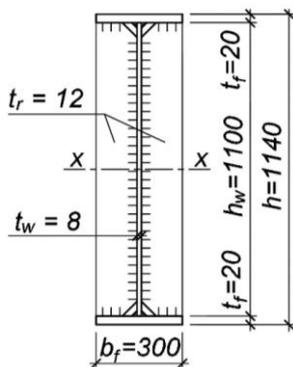


Рисунок 1. Вид сечения балки (разработано автором)

Ребра жесткости разбивают стенку балки на отдельные отсеки. Отсеки стенки балки имеют длину 2000 мм и замаркированы из условия симметрии: 5Л, 4Л, 3Л, 2Л, 1, 2П, 3П, 4П, 5П. В каждом отсеке действуют нормальные и касательные напряжения. Известно, что в середине пролета несущей балки максимальные величины имеют нормальные напряжения, касательные напряжения стремятся к нулю. В опорных отсеках, напротив, отмечаются пиковые величины касательных напряжений, а нормальные напряжения принимают минимальные значения.

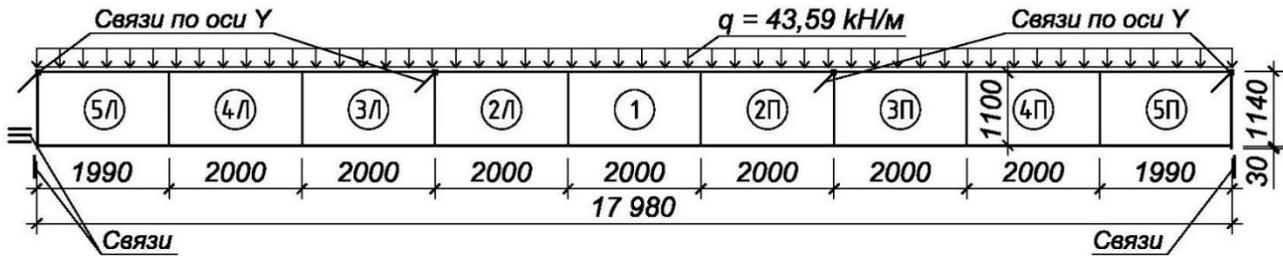


Рисунок 2. Расчетная модель балки (разработано автором)

При симметричной нагрузке возможно использовать геометрическое свойство симметрии и принято проверять местную устойчивость в отсеках только левой или правой части балки. Но как показано в работах [8; 9] в опорных отсеках из-за отличий в геометрических граничных условиях имеет место разница в распределении напряжений в стенке. Стержневые схемы указанную разницу не учитывают. Следовательно, в опорных отсеках необходимо делать проверку отдельно для двух условий закрепления (левый и правый отсек).

В работах [10; 11] авторами предложено, по результатам расчетов моделей строить эпюры вычисляя средние значения напряжений в отсеке (или участке отсека) по рядам КЭ, поэлементно суммируя величины интенсивности напряжений пропорционально площади распределения на целом КЭ или его части:

$$\sigma_{mid} = \left(\sum_{i=1}^n \left(\sigma_i A_i \right) \right) / A_{rank}; \quad (1)$$

$$\tau_{mid} = \left(\sum_{i=1}^n \left(\tau_i A_i \right) \right) / A_{rank}, \quad (2)$$

где σ_{mid} и τ_{mid} – средние значения нормальных и касательных напряжений в некотором горизонтальном ряду КЭ; σ_i и τ_i – нормальные и касательные напряжения в i -ом КЭ; A_i – площадь i -ого КЭ или части КЭ; A_{rank} – суммарная площадь i -ых КЭ, расположенных в ряду проверяемого отсека (или участка отсека); n – количество КЭ в одном ряду проверяемого отсека (или участка отсека).

По указанной методике мы получаем эпюры средних значений напряжений для всех горизонтальных рядов КЭ по высоте сечения стенки проверяемого отсека (или участка отсека). Это соответствует требованиям п. 8.5.3 СП 16.13330, но займет у конструктора при реальном проектировании много времени. Для проверки отсеков с классическим распределением напряжений по высоте стенки предложим методику более быстрого поиска средних значений напряжений в отсеке. Требуемое среднее значение нормальных напряжений в крайнем волокне стенки предлагается определять экстраполяцией значений по величинам напряжений, посчитанным для двух верхних рядов КЭ участка отсека «2Л», выражение (3). Для нахождения средних значений касательных напряжений, необходимо интерполировать требуемую величину по средним величинам первого (отсчет нумерации рядов ведем от горизонтальной оси симметрии поперечного сечения) ряда КЭ и верхнего ряда КЭ стенки проверяемого участка отсека «2Л», согласно выражению (4):

$$\sigma = \sigma_{mid,m} + \left(\sigma_{mid,m} - \sigma_{mid,m-1} \right) / 2; \quad (3)$$

$$\tau = \left(\tau_{mid,1} + \tau_{mid,m} \right) / 2, \quad (4)$$

где σ и τ – средние значения нормальных и касательных напряжений в стенке отсека (или участка), для подстановки в условие (80) нормативной методики СП 16.13330; $\sigma_{mid,m}$ и $\sigma_{mid,m-1}$ – средние значения нормальных напряжений в крайнем (верхнем) и предшествующим рядах КЭ в стенке; $\tau_{mid,m}$ и $\tau_{mid,1}$ – средние значения касательных напряжений в крайнем (верхнем) и первым (от горизонтальной оси x-x) рядах КЭ в стенке; m – число горизонтальных рядов КЭ в стенке целого отсека или участке отсека, отсчитываемых от горизонтальной оси симметрии (x-x) поперечного сечения стальной симметричной двутавровой балки (рекомендуется принимать четное число рядов КЭ по высоте стенки).

2. Результаты

В результате расчета мы получаем нормальные (см. рис. 3) и касательные (см. рис. 4) напряжения в КЭ модели балки, отвечающие распределенному полю напряжений в реальной конструкции.

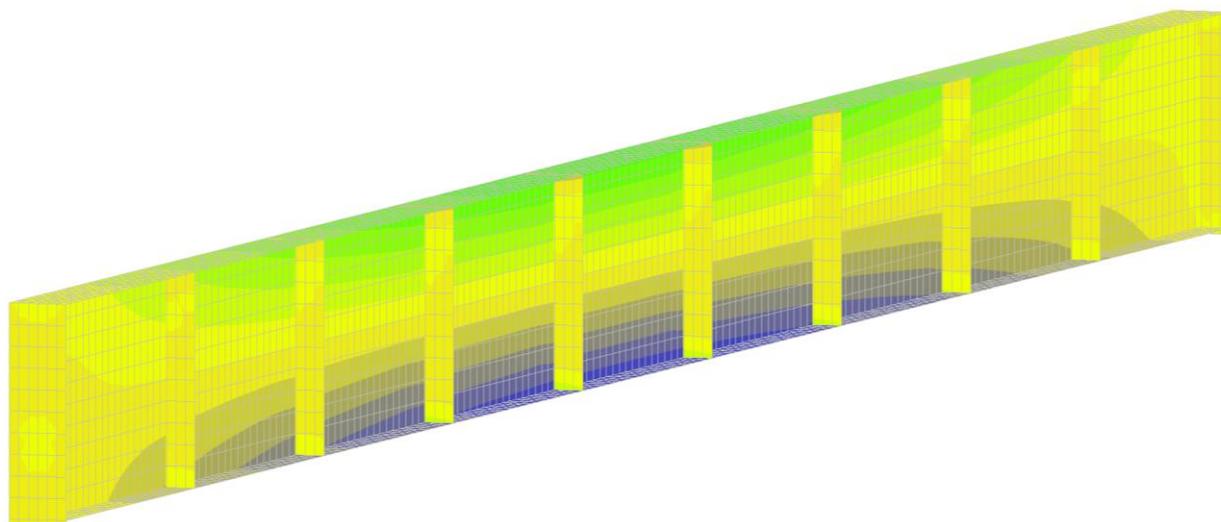


Рисунок 3. Общий вид распределения полей нормальных напряжений (разработано автором)

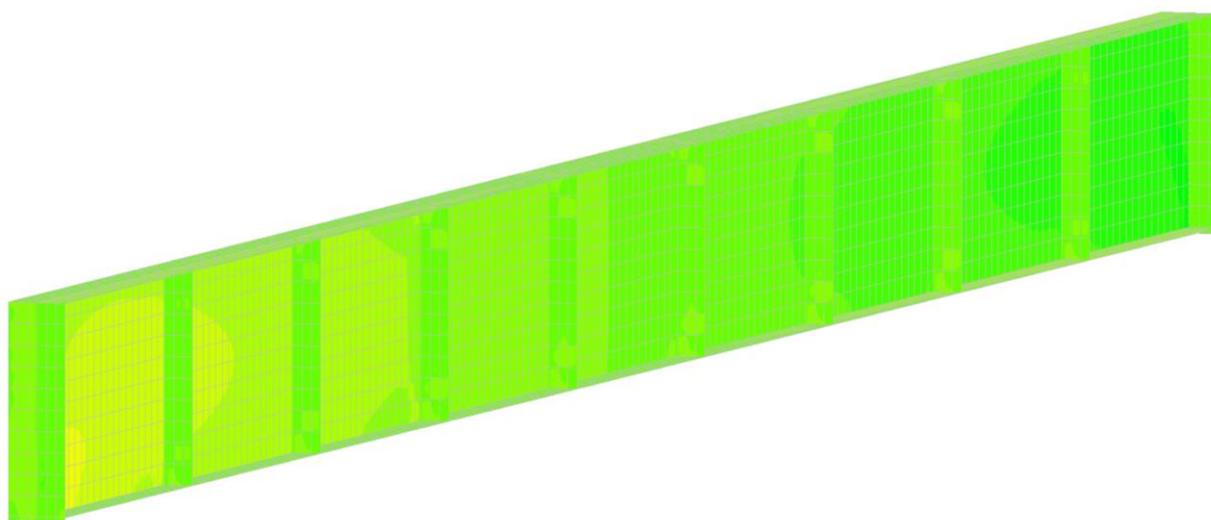


Рисунок 4. Общий вид распределения полей касательных напряжений (разработано автором)

Рассмотрим участок отсека «2Л» рассчитанной КЭ-модели тестовой балки. Получим значения средних напряжений на участке стенки с начальной привязкой от ребра жесткости, шириной равной высоте стенки, мм: $a = h_w = 1100$. По выражению (3) найдем требуемое среднее значение нормальных напряжений на участке отсека в крайнем волокне стенки экстраполируя предварительно посчитанные по выражению (1) средние значений напряжений для двух верхних рядов КЭ участка стенки отсека «2Л» (см. рис. 5). По выражению (4) найдем средние значений касательных напряжений (см. рис. 6), с помощью интерполяции ранее полученных по (2) средних величин касательных напряжений первого ряда КЭ и верхнего ряда КЭ стенки отсека «2Л». По выражениям (3) и (4), мы получили значения напряжений для подстановки в условие (80) проверки местной устойчивости стенки, в полном соответствии с пунктом 8.5.3 нормативной методики СП 16.13330. На эпюрах (рис. 5, рис. 6) в скобках указаны значения напряжений, посчитанные аналитически (как предлагает СП 16.13330), для стержневой схемы. Значения напряжений, посчитанные для стержневой схемы, имеют разницу с методикой КЭ-модели 0.16 и 2.4 %, для нормальных и касательных напряжений соответственно. Расчет стержневой схемы аналитическим методом в данной работе не приводится ввиду его простоты.

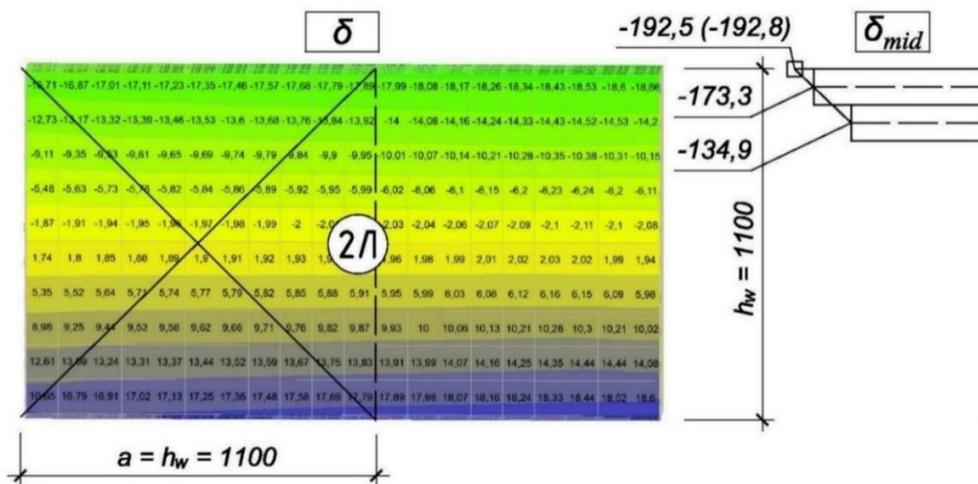


Рисунок 5. Поля нормальных напряжений (kH/cm^2) и эпюра средних значений (МПа), на участке отсека «2Л», в скобках указана величина, полученная по методике СП 16.13330 (разработано автором)

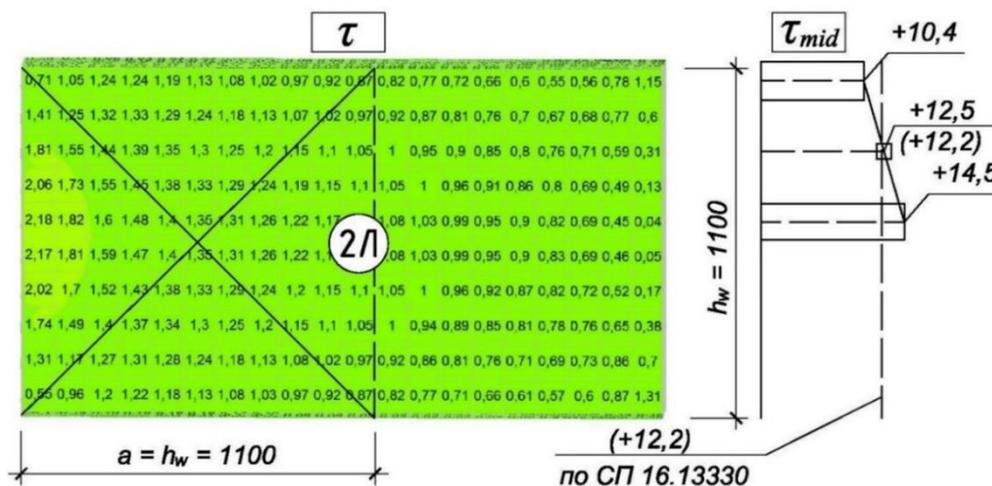


Рисунок 6. Мозаика касательных напряжений (kH/cm^2) и эпюра средних значений (МПа), на участке отсека «2Л», в скобках указана величина, полученная по методике СП 16.13330 (разработано автором)

3. Обсуждение результатов

Рассмотрен метод определения средних значений напряжений в стенке стальных двутавровых балок путем суммирования произведений площади и напряжения в КЭ по горизонтальным рядам, с последующим делением на общую площадь ряда. Такая методика позволяет определять среднее значение напряжений на участке стенки пропорционально площади распределения напряжения. Выражения (1) и (2) позволяют усреднять и распределять возможные пиковые значения напряжений (концентраторы) и соответствуют требованиям пункта 8.5.3 СП 16.13330. Выражения предлагаемой методики учитывают нелинейный характер распределения напряжений по волокну материала в продольном направлении отсека. В поперечном направлении (по высоте стенки) по найденным значениям для двух рядов КЭ мы линейно интерполируем (или экстраполируем) величину среднего напряжения в нужной точке поля напряжений. Такой подход можно назвать нелинейно-линейным. Предлагаемые выражения (3) и (4) позволяют определять напряжения (не только средние) в любой точке поперечного сечения. Несмотря на высокую точность совпадения результатов численных расчетов с аналитическим методом, сходимость средних значений напряжений в опорных отсеках будет заметно хуже [10]. Для опорного отсека необходимо строить эпюру распределения средних напряжений по всей высоте стенки. Что связано с влиянием граничных условий на распределение напряжений в стенке: опорной реакции и условий сопряжения элементов в узле [9; 10]. Стержневая схематизация расчета конструкций подобного влияния не учитывает. Рассмотренный в данной работе метод применим для всех рядовых отсеков, кроме опорного. Однако, в случае если сетка КЭ-модели стенки состоит из треугольных трехузловых КЭ с не регулярной геометрией, рассмотренный способ применять будет сложно. В таком случае затруднительно определять средние напряжения в горизонтальных рядах КЭ и как следствие, поперек сечения. Работа с полями напряжений при треугольных КЭ с различной ориентацией на плоскости, затруднительна геометрически. Поэтому можно рекомендовать к использованию для моделирования стенки балки именно четырехугольные КЭ.

Переход на трехмерные расчетные модели неизбежно связан с адаптацией нормативной базы для алгоритмизации работы с результатами расчетов. Если у архитекторов модели содержат только геометрическую информацию [13], то у конструкторов результаты расчетов КЭ-моделей могут существенно отличаться от стержневых схем. Данные различия требуют рассмотрения и стройного описания. Именно стержневые схемы положены в основу современной нормативной базы. Одной из главных задач для исследователя является соответствие объекта исследования целям проектирования. Трехмерное компьютерное моделирование конструкций как механических систем содержит значительный потенциал для исследований полезных проектировщикам [14; 15].

Выводы

1. Значения напряжений, вычисленные по выражениям (3) и (4) для тестовой КЭ-модели рассчитанной балки, имеют высокую сходимость напряжений (0.16 и 2.4 %) с значениями определёнными по выражениям (78) и (79) СП 16.13330 для стержневой расчетной схемы. Рассмотренная методика может быть рекомендована для определения расчетных значений напряжений по распределенным полям напряжений в КЭ-моделях, при проверке местной устойчивости стенки по условию (80) СП 16.13330, для рядовых отсеков.

2. Необходимо разработать и прописать правила для корректного применения результатов расчетов трехмерных КЭ-моделей, при проверках условий местной устойчивости тонкостенных частей несущих элементов (не только изгибаемых) строительных конструкций.
3. Адаптация нормативной базы для работы с результатами расчетов трехмерных компьютерных моделей является важной задачей для повышения теоретической строгости расчетов КЭ-моделей и развития автоматизации проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Броуде Б.М. К расчету балок с гибкими неподкрепленными стенками / Б.М. Броуде, В.И. Моисеев // Строительная механика и расчет сооружений. 1978. № 1. С. 60–61.
2. Симаков Ю.Н. К оценке несущей способности балок с гибкими неподкрепленными стенками / Ю.Н. Симаков // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 1. С. 25–28.
3. Sventikov A.A. Numerical study of the effect of the wall thickness of a steel I-beam on the form of loss of local stability / A.A. Sventikov, D.N. Kuznetsov // International science conference Far East Con 2019: Materials Science and construction. 753. Chapter 2. 2020. Pp. 1–6. 032035 DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032035.
4. Kuznetsov D.N. Numerical study of the influence of the distance between stiffeners on the loss of stability of the web of an I-section steel beam / D.N. Kuznetsov, N.A. Ponyavina // International science conference Far East Con 2019: Materials Science and construction. 753. Chapter 3. 2020. Pp. 1–7. 042041 DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042041.

5. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер – М.: “МИР”, 1984. 428 с.
6. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган – М.: МИР, 1986. 318 с.
7. Туснина О.А. Finite element analysis of crane secondary truss / О.А. Туснина // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 1. С. 68–89. DOI: 10.18720/MSE.77.7.
8. Белостоцкий А.М. Расчетное исследование параметров механической безопасности высотного (404 метра) жилого комплекса «One Tower» в деловом центре «Москва-Сити» / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, Д.С. Дмитриев, А.И. Нагибович, Н.О. Петряшев, С.О. Петряшев // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 3. С. 122–129.
9. Кузнецов Д.Н. Силовая работа опорного узла стальной двутавровой балки / Д.Н. Кузнецов, В.В. Григораш // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 1 (57). С. 11–21. DOI: 10.25987/VSTU.2020.57.1.001.
10. Свентиков А.А. Адаптация результатов численного метода расчета к нормативной методике проверки местной устойчивости стенки стальной балки двутаврового сечения / А.А. Свентиков, Д.Н. Кузнецов // Строительная механика и конструкции. 2019. № 1 (20) С. 60–70.
11. Свентиков А.А. Сравнительный анализ результатов оценки напряженного состояния стенки стальных балок / А.А. Свентиков, Д.Н. Кузнецов, П.Н. Турищев // В сборнике: Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве. Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 127–137.
12. Карпиловский В.С. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, М.А. Микитаренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер – М.: АСВ, 2007. 592 с.
13. Касьянов Н.В. К проблеме эволюции пространственных форм архитектуры в контексте научно-технических достижений / Н.В. Касьянов // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 3. С. 34–43.
14. Сафронов В.С. Оценка динамических качеств металлического автодорожного моста по данным натурных испытаний и поверочных расчетов / В.С. Сафронов, А.В. Антипов // Строительная механика и конструкции. 2020. № 1 (24) С. 39–53.
15. Кузнецов Д.Н. Устойчивость состояния равновесия несущих конструкций в составе конечно-элементных систем / Д.Н. Кузнецов // Строительная механика и конструкции. 2019. № 4 (23) С. 75–85.

Kuznetsov Dmitry Nikolaevich
Voronezh state technical university, Voronezh, Russia
E-mail: kuznecov82@bk.ru

Engineering methodology for checking the local stability of the wall of steel I-beams in distributed stress fields

Abstract. For many years, normative methods have been developed and applied for the core schematic of the calculation of load-bearing structures. With the increase in computing power of computers and the development of computer programs, it becomes possible to consider design situations for the load-bearing structures modeled in three dimensional form. The results of the calculation of mechanical systems of three-dimensional finite element models in computer complexes are presented in the form of distribution fields: stresses, deformations, displacements. Stresses can be distributed on the plane for plate models or in volume for models of volumetric finite elements. For correct work with the results of calculations of three-dimensional computer models, normative methods of calculation need a quality update and adaptation to new levels of design automation.

In the paper, discusses the procedure for determining the average stress values in the wall of a finite element model of a steel beam, broken into compartments, while checking local stability. The author calculated the steel I-beam of an overlapping beam with a span of 18 meters in the SCAD Office computing complex. The beam geometry is modeled from finite casing elements with zero Gaussian curvature. The article discusses an example of determining the average stress values in an ordinary beam compartment. In the example, the procedure for determining the average stresses in the wall of the steel beam by the distributed fields for the subsequent substitution of the local stability test into the normative condition is indicated. It is proposed to determine the average values of stresses in proportion to the distribution area in the finite elements along the compartment or section of the compartment, in horizontal rows. In the considered method, it is sufficient to determine the average values of stresses for two horizontal rows, then it is proposed to linearly interpolate or extrapolate the required stress along the height of the cross section. The article proposes an engineering method for testing local stability for use in the practice of design.

Keywords: steel beam; wall of a steel I-beam; local sustainability; design model of the beam; verification of local sustainability; average voltage value; stress fields

REFERENCES

1. Broude B.M., Moiseev V.I. (1978). To the calculation of beams with flexible non-supported walls. *Structural mechanics and structural analysis*, 1, pp. 60–61 (in Russian).
2. Simakov Yu.N. (2014). To the assessment of the bearing capacity of beams with flexible non-supported walls. *Industrial and Civil Engineering*, 1, pp. 25–28 (in Russian).
3. Sventikov A.A., Kuznetsov D.N. (2020). *Numerical study of the effect of the wall thickness of a steel I-beam on the form of loss of local stability*. pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032035.
4. Kuznetsov D.N., Ponyavina N.A. (2020). *Numerical study of the influence of the distance between stiffeners on the loss of stability of the web of an I-section steel beam*. pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042041.

5. Gallager R. (1984). Metod konechnykh ehlementov. Osnovy. [*Finite element method. The basics.*] Moscow: “WORLD”, p. 428.
6. Zenkevich O., Morgan K. (1986). Konechnye ehlementy i approksimatsiya. [*Finite Elements and Approximation.*] Moscow: “WORLD”, p. 318.
7. Tusnina O.A. (2018). Finite element analysis of crane secondary truss. *Civil Engineering Journal*, 1, pp. 68–89. DOI: 10.18720/MCE.77.7.
8. Belostotskiy A.M., Akimov P.A., Dmitriev D.S., Nagibovich A.I., Petryashev N.O., Petryashev S.O. (2019). A calculation study of the mechanical safety parameters of a high-rise (404 meters) residential complex “One Tower” in the business center “Moscow City”. *Academia. Architecture and construction*, 3, pp. 122–129 (in Russian).
9. Kuznetsov D.N., Grigorash V.V. (2020). Power work of the support node of a steel I-beam. *Scientific journal of construction and architecture*, 1(57), pp. 11–21. DOI: 10.25987/VSTU.2020.57.1.001 (in Russian).
10. Sventikov A.A., Kuznetsov D.N. (2019). Adaptation of the results of the numerical calculation method to the normative method for checking the local stability of the wall of a steel beam of I-section. *Construction Mechanics and Structures*, 1(20), pp. 60–70 (in Russian).
11. Sventikov A.A., Kuznetsov D.N., Turishchev P.N. (2019). Sravnitel’nyy analiz rezul’tatov otsenki napryazhennogo sostoyaniya stenki stal’nykh balok. [*Comparative analysis of the results of the assessment of the stress state of the wall of steel beams.*] pp. 127–137.
12. Karpilovskiy V.S., Kriksunov Eh.Z., Malyarenko A.A., Mikitarenko M.A., Perel’muter A.V., Perel’muter M.A. (2007). SCAD Office. Vychislitel’nyy kompleks SCAD. [*SCAD Office. Computing SCAD complex.*] Moscow: ACB, p. 592.
13. Kas’yanov N.V. (2019). To the problem of the evolution of spatial forms of architecture in the context of scientific and technological achievements. *Academia. Architecture and construction*, 3, pp. 34–43 (in Russian).
14. Safronov V.S., Antipov A.V. (2020). Assessment of the dynamic qualities of a metal road bridge according to field tests and verification calculations. *Structural Mechanics and Structures*, 1(24), pp. 39–53 (in Russian).
15. Kuznetsov D.N. (2019). Stability of the equilibrium state of load-bearing structures as part of finite element systems. *Building mechanics and constructions*, 4(23), pp. 75–85 (in Russian).