Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2020, №3, Том 7 / 2020, N 3, Vol. 7 <https://t-s.today/issue-3-2020.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS320.pdf>

DOI: 10.15862/09SATS320 (<http://dx.doi.org/10.15862/09SATS320>)

Метод расчета стальных двутавровых балок с учетом частичного защемления в опорном узле

Кузнецов Д.Н., Беляева С.Ю., Сазыкин В.Г.

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

Автор, ответственный за переписку: Кузнецов Дмитрий Николаевич, e-mail: kuznecov82@bk.ru

Аннотация. Стальные балки в общем, а двухопорные балочные системы в частности, широко используются в практике современного строительства. Именно поэтому значительное внимание уделяется разработке таких конструктивных решений балочных конструкций, которые позволили бы значительно снизить материалоемкость, в том числе и за счет изменения напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов.

Классический шарнирный узел опирания стальных балок предполагает болтовое соединение в нижней трети высоты опорных ребер. Конструктивное решение, рассматриваемое в данной статье, содержит дополнительные требования, предъявляемые к опорному узлу: плотное заполнение монтажного зазора между двумя опорными ребрами соседних балок, постановка болтов, удовлетворяющих условию прочности. Указанные требования обеспечивают передачу усилия растяжения от пары сил, возникающих на опоре. В статье предложена методика расчета стальных двутавровых балок с учетом полученного эффекта частичного защемления. Методика разработана на основе расчетов численным методом трехмерных конечноэлементных моделей балок с использованием двухузловых односторонних связей, однако при соответствующем обосновании предполагает перенос результатов на стержневые расчетные схемы. Моделирование и расчеты выполнены в вычислительном комплексе SCAD Office. Исследуемые в работе двутавровые стальные балки перекрытия имеют пролеты по 15 м. Эффект защемления оценивается на основе сравнения

результатов численных расчетов конечноэлементных моделей одиночной балки и двух соседних совместно работающих стальных балок. Тестовые модели балок выполнены с использованием конечных элементов оболочки с нулевой гауссовой кривизной.

В результате исследования совместности работы опорных узлов балочных конструкций и анализа напряженно-деформированного состояния системы выявлено перераспределение изгибающего момента из пролета в опорный узел. Установлено, что с увеличением пролета эффект от защемления угасает. Представленный в работе метод учета частичного защемления, за счет введения двухузловых односторонних связей в опорном узле численных моделей балок, позволяет назначать более экономичные сечения при проектировании аналогичных конструкций. Разработанная в статье методика может быть использована для проверочных расчетов при техническом обследовании строительных конструкций. В статье показано, что подбор сечений болтов соединения стальных балок на опоре возможно выполнять по реакциям, полученным в односторонних связях. Применение рассмотренной методики расчета в практике реального проектирования позволяет повысить экономичность и увеличивает надежность балочных систем в составе конструктивного комплекса зданий и сооружений.

Ключевые слова: стальная двутавр; стальная двутавровая балка; двухопорная балка; методика расчета; частичное защемление; уменьшение изгибающего момента; учет совместной работы

Steel I-joists calculating method with the heel joint partial restraint

Dmitry N. Kuznetsov, Svetlana Yu. Belyaeva, Vitaliy G. Sazykin

Voronezh state technical university, Voronezh, Russia

Corresponding author: Dmitry N. Kuznetsov, e-mail: kuznecov82@bk.ru

Abstract. Steel joists in general, are widely used in modern building practice and I-joist systems in particular. That is why close attention to the structural concept development or joist construction is paid. That would significantly reduce the material consumption, including changing the flexural member strain-stress distribution.

The classic pin joint for supporting steel joist involves a bolted connection in the lower third of the knife-edge height. The constructive solution considered in this article contains additional requirements for the heel joint: tight installation clearance filling between two adjacent joist knife-edges, bolt installation that satisfy the strength condition. These requirements ensure the tensile force transfer from a couple of forces emerging on the pier. We proposed a method for calculating steel I-joist, with the account of the obtained partial restraint effect. This method developed based on numerical calculations of three-dimensional finite element beams models using the binodal unilateral connection, however, with proper justification, the results transfer to the core design schemes. Modeling and calculations are performed in the SCAD Office computer complex. The steel I-joist floor beams studied in this paper have 15 m spans. The restraining effect is estimated based on a results comparison of finite element models numerical calculations of a single joist and two

adjacent simultaneously working steel joists. Joist test models are made using shell finite elements with zero Gaussian curvature.

As the study result of the operation compatibility of the joist structures heel joint and the analysis of the system strain-stress distribution, a moment redistribution from the span to the heel joint was revealed. With the increase in the span, the restrain effect was found fading. The partial restrain accounting method allows us to assign more economical sections during similar structures designing, due to the introduction of binodal unilateral connection in the heel joint of the joist numerical models. This technique can be used for verification calculations during the technical examination. This paper shows that the bolt junction sections selection for connecting steel joists on a pier can be performed according to the reactions obtained in unilateral connection. Using this calculation methodology in practice for actual construction design provides an opportunity to increase the joist systems' efficiency and reliability that part of constructional buildings and structures complex.

Keywords: steel I-joist; simple beam; calculation method; partial restraint; a moment of flection reduction; collaborative work accounting

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License

Введение

Introduction

Одной из наиболее важных задач при проектировании строительных конструкций является разработка экономически эффективных конструктивных решений, увеличивающих показатели материалоемкости. Для стальных двухопорных балок к числу таких решений можно отнести: использование висячих систем [1; 2], применение неразрезных конструкций [3], использование предварительного напряжения [4], применение конструкций переменного сечения [5], объединение в совместную работу разномодульных материалов [6–8] и ряд других. Однако реализация указанных решений сопряжена с увеличением трудоемкости изготовления и/или монтажа, что требует дополнительных временных, материальных и технологических затрат. Кроме того, необходимо отметить, что практически все известные способы снижения металлоемкости балочных конструкций связаны с изменением исходной конструкции балки.

В ранее опубликованной работе [9] исследован эффект защемления с использованием конечноэлементной (КЭ) модели балки геометрия которой построена из объемных КЭ. В указанном исследовании балочной конструкции пролетом 9 м установлено, что учет совместной работы опорных узлов соседних балок позволяет получить уменьшение изгибающего момента в середине пролета балки. Снижение величины изгибающего момента в пролете достигается за счет минимальных изменений исходной классической конструкции шарнирного узла, а именно: увеличение диаметра болтов, увеличение класса прочности болтов, увеличение количества болтов в верхнем ряду, укрепление стенки в опорном отсеке. Необходимо отметить, что одним из обязательных условий частичного защемления двух соседних балок в опорном узле является плотное заполнение стальными прокладками монтажного зазора между их опорными ребрами. В противном случае степень защемления балок на опоре понижается. Между тем, в распространенном решении узла опирания балок на несущие конструкции сверху, например, подкрановых балок на среднюю колонну, болты между опорными ребрами устанавливаются из конструктивных соображений без расчета, а к плотности заполнения монтажного зазора не предъявляется повышенных требований. Ввиду того, что рассматриваемый узел предполагает идеальную шарнирную связь с полной передачей опорной реакции через строганный торец ребра на плиту оголовка или консольную часть колонны, считается, что болты в узлах взаимного примыкания балок не воспринимают усилий и методика их расчета, как следствие, не разработана. Однако в процессе производства работ на монтаже вполне

вероятно получить плотное примыкание опорных ребер балок, о чем свидетельствуют и результаты обследования конструкций. Потеря прочности болтами верхнего ряда указывает на существующее в действительности ограничение свободы поворота опорного сечения двухшарнирной балки. Можно предположить, что при одном и том же конструктивном решении опорного узла, эффект от частичного защемления проявляется неодинаково на разных пролетах. Указанное предположение требует проверки.

Стержневая расчетная схема не предоставляет возможность учесть действительную работу рассматриваемого узла, поэтому для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) и нахождения усилий растяжения в болтах опорной части смонтированных в узле балок, необходимо разработать методику расчета с применением трехмерных моделей из оболочечных или объемных КЭ [10–12]. Трехмерное компьютерное моделирование [13–16], в отличие от стержневой схематизации, позволит выявить эффект от совместной работы исследуемых элементов. Для моделирования монтажных прокладок предложено использовать двухузловые односторонние связи, работающие на сжатие, а по осям болтов – односторонние связи, которые работают на растяжение или размыкаются при возникновении в них сжимающих усилий. Для анализа НДС рассматриваемой системы необходимо выполнить нелинейный расчет методом последовательных нагружений, который был предложен В.З. Власовым и получил развитие в работах [17; 18] и других трудах. Нелинейный расчет в вычислительном комплексе SCAD Office реализован «простым шаговым методом». Расчет шаговым методом позволяет при приращении нагрузки размыкать и замыкать односторонние связи, моделирующие прокладку и болты. Однако при этом важно учитывать, что число шагов должно быть достаточным для сходимости результатов расчета исследуемой модели, иначе можно получить промежуточное решение, при котором односторонние связи в нижних узлах опорного ребра не включаются в работу.

Сравнительный анализ результатов расчетов одиночной балки и двух соседних балок, соединенных соответствующим образом, предоставляет возможность определить разницу в величинах изгибающих моментов и вертикальных перемещений. Указанная разница позволит количественно оценить эффект от совместной работы соседних балок.

1. Общие данные по объекту исследования

1. General data on the research object

Для исследования, в качестве тестовой модели принята стальная балка двутаврового поперечного сечения из стали класса прочности С255. Исследуемая балка перекрывает пролет 15 м, шаг балок составляет 6 м. Раскрепление балок из плоскости предусмотрено в узлах верхнего пояса (рис. 1). Расчетная комбинация нагрузок интенсивностью 7.265 кПа включает следующие нагрузки: постоянная (собственный вес конструкций перекрытия) и кратковременная (полезная). Линейная равномерно распределенная нагрузка величиной 43.59 кН/м прикладывается к верхнему поясу вдоль оси балки/балок (рис. 1). Поперечное сечение исследуемой балки предварительно подобрано по результатам расчета стержневой расчетной схемы, параметры сечения сварного двутавра показаны на рисунке 2. Стенка балки укреплена двухсторонними поперечными ребрами жесткости толщиной 8 мм, поставленными с шагом 1360 мм. Толщина опорных ребер 20 мм подобрана из условия прочности торцов на смятие.

Рассмотрены два варианта силовой работы несущих конструкций: одиночная балка и две несущие балки, работающие совместно. Оба варианта моделей рассчитаны в вычислительном комплексе SCAD Office [19].

Рисунок 1. Расчетные схемы КЭ моделей балок (разработано авторами)

Figure 1. Design diagrams of joist FE models (developed by the authors)

В качестве КЭ моделей балок, выбран тип КЭ № 41 – прямоугольный четырехузловой КЭ оболочки с нулевой гауссовой кривизной. Каждый узел указанного КЭ имеет по шесть степеней свободы: три линейных перемещения по осям X, Y, Z и три угла поворота относительно осей UX, UY, UZ. Выполнен линейный расчет оболочечной КЭ модели одиночной балки с общей вычислительной размерностью 5088 КЭ (рис. 3а). Модель из двух балок получена копированием модели одиночной балки вдоль

продольной оси и содержит 10218 КЭ (рис. 3б). При выполнении нелинейного расчета простым шаговым методом для модели из двух балок принято пять шагов с коэффициентом загрузки 0.2 (к значению нагрузки).

Рисунок 2. Общий вид узла сопряжения балок (разработано авторами)

Figure 2. Joist junction overview (developed by the authors)

Для модели одиночной балки назначены следующие геометрические граничные условия: левая опора шарнирно-подвижная, запрещающая в узлах торца опорного ребра вертикальные перемещения; правая опора шарнирно-неподвижная, запрещающая в узлах торца опорного ребра вертикальные перемещения и в узлах опорного ребра в плоскости нижней полки горизонтальные перемещения.

В модели из двух балок на узлы опорных ребер крайних опор наложены связи, аналогичные шарнирно-подвижной опоре для модели одиночной балки. Узел взаимного примыкания балок смоделирован как шарнирно-неподвижная опора, при этом горизонтальные перемещения, как и в реальных конструкциях при деформировании, ограничиваются изгибной жесткостью (EI) опорных ребер и односторонними связями, установленными по осям болтов. В узле сопряжения две балки соединены между собой в нижней трети высоты опорных ребер с использованием двухузловых односторонних связей [20; 21]. Двухузловые односторонние связи, расположенные по осям болтов, работают только на растяжение и размыкаются при сжатии.

Рисунок 3. Общий вид КЭ моделей:
одиночная балка (а), две балки (б) (разработано авторами)

Figure 3. FE models overview: single joist (a), two joists (b) (developed by the authors)

Двухузловые односторонние связи, моделирующие монтажные прокладки, работают только на сжатие и размыкаются при растяжении. В вычислительном комплексе SCAD Office односторонняя двухузловая связь вводится как специальный КЭ № 352. Отметим, что ввод односторонних связей предполагает нелинейный расчет. При чтении результатов расчета необходимо контролировать значения реакций в односторонних связях, чтобы убедиться в том, что все односторонние связи разомкнуты или работают по соответствующим направлениям. Жесткости связей при растяжении-сжатии (EF) должны соответствовать реальным жесткостям моделируемых элементов (болтов) или частей элементов (стальных прокладок). Авторами установлено, что минимальное и достаточное число шагов нелинейного расчета для исследуемого опорного узла балок равно пяти. Контрольный расчет с десятью шагами и коэффициентом загрузки 0.1 расхождений в результатах не выявил. Таким образом, дальнейшее увеличение числа шагов не влияет на результаты, но существенно увеличивает время расчета. Поверочный расчет рекомендуется выполнять для подтверждения сходимости механической системы с односторонними связями.

2. Метод определения НДС двутавровой балки

2. I-joist stress-strain state test method

По результатам расчета двух КЭ моделей выполнен анализ НДС элементов опорного узла, включая значения напряжений на опорном участке стенки и усилия растяжения в болтах, соединяющих опорные ребра балок.

Изгибающий момент в середине пролета балки $M_{(l/2)}$ для каждой расчетной модели вычисляем по значениям напряжений, которые определены по результатам расчета КЭ -моделей:

$$M_{(l/2)} = \frac{\sigma_{(l/2)} I_x}{y} = \frac{2\sigma_{(l/2)} I_x}{h}, \quad (1)$$

где $\sigma_{(l/2)}$ – нормальное напряжение в нижнем волокне полки двутавра в середине пролета (по результатам расчета КЭ модели); I_x – момент инерции поперечного сечения относительно оси $x-x$; h – высота поперечного сечения двутавра; y – расстояние от главной оси $x-x$ до рассматриваемой точки (в нашем случае до крайнего волокна нижней полки).

Разница изгибающих моментов, найденных для двух КЭ-моделей, содержит значение опорного момента МОП, который перераспределяется из середины пролета на опорный участок в результате частичного взаимного защемления балок. При построении эпюры изгибающего момента (рис. 6) уменьшение его значения в середине пролета сопровождается двойным увеличением момента на опоре:

$$M_{оп} = 2 \frac{2I_x}{h} (\sigma_{(l/2)}^I - \sigma_{(l/2)}^{II}), \quad (2)$$

где $\sigma_{(l/2)}^I$ – нормальные напряжения в крайнем волокне нижней полки в середине пролета, полученные по результатам расчета КЭ-модели одиночной балки; $\sigma_{(l/2)}^{II}$ – нормальные напряжения в крайнем волокне нижней полки в середине пролета, полученные по результатам расчета КЭ-модели с двумя балками; I_x – момент инерции поперечного сечения относительно оси $x-x$; h – высота поперечного сечения двутавра.

Для анализа эффективности предлагаемого в данной работе конструктивного решения и методики расчета оценим долю усилия Δ , перераспределяющегося из пролета в опорный узел:

$$\Delta = \frac{M_{(l/2)}^I - M_{(l/2)}^{II}}{M_{(l/2)}^I} \times 100(\%), \quad (3)$$

где $M_I(1/2)$ – изгибающий момент, определяемый по формуле (1) для КЭ модели одной балки; $M_{II}(1/2)$ – изгибающий момент, определяемый по формуле (1) для КЭ модели двух совместно работающих балок.

3. Численно-аналитический анализ результатов

3. Numerical-analytical analysis of the results

На основании численных расчетов получим значения нормальных и касательных напряжений в середине пролета балки в крайнем волокне нижней полки двутавра (рис. 4а,б) и определим НДС в элементах опорного узла балки (рис. 5а,б).

Рисунок 4. Общий вид полей распределения нормальных σ_x (а) и касательных τ_{xy} (б) напряжений деформированной схемы двух совместно работающих балок, с цветовыми шкалами напряжений в kH/cm^2 (разработано авторами)

Figure 4. Distribution fields overview of normal σ_x (a) and tangential τ_{xy} (b) stresses of the deformed scheme of two adjacent simultaneously working steel joists, with color scales of stresses in kN/cm^2 (developed by the authors)

Рисунок 5. Поля распределения нормальных σ_x (а) и касательных τ_{xy} (б) напряжений, в деформированной схеме узла сопряжения балок (разработано авторами)

Figure 5. Distribution fields of normal σ_x (a) and tangential τ_{xy} (b) stress, in the deformed scheme of the joist junction (developed by the authors)

Вычислим изгибающие моменты (рис. 6) в середине пролета балки $M_{(l/2)}$ для анализируемых КЭ моделей:

$$M^I_{(l/2)} = \frac{2\sigma_{(l/2)} I_x}{h} = \frac{2 \times 205.7 \text{ МПа} \times 262934 \text{ см}^4}{89 \text{ см}} = 1215.41 \text{ кНм}; \quad (4)$$

$$M^{II}_{(l/2)} = \frac{2\sigma_{(l/2)} I_x}{h} = \frac{2 \times 195.2 \text{ МПа} \times 262934 \text{ см}^4}{89 \text{ см}} = 1153.36 \text{ кНм}. \quad (5)$$

Определим опорный момент МОП от частичного защемления и долю перераспределившегося на опорный участок усилия Δ , в процентах:

$$M_{\text{оп}} = 2(M^I_{(l/2)} - M^{II}_{(l/2)}) = 2(1215.41 \text{ кНм} - 1153.36 \text{ кНм}) = 124.1 \text{ кНм}; \quad (6)$$

$$\Delta = \frac{M^I_{(l/2)} - M^{II}_{(l/2)}}{M^I_{(l/2)}} \times 100(\%) = \frac{1215.41 \text{ кНм} - 1153.36 \text{ кНм}}{1215.41 \text{ кНм}} \times 100(\%) = 5.1(\%) \quad (7)$$

Рисунок 6. Эпюры изгибающих моментов M_y , кНм (разработано авторами)

Figure 6. Bending-moment diagram M_y , kNm (developed by the authors)

В результате исследования совместной работы соседних балок, помимо уменьшения изгибающего момента в пролете, также выявлено уменьшение вертикальных перемещений с 57 мм до 54 мм.

Рисунок 7. Схема усиления опорного узла стальных балок (разработано авторами)

Figure 7. Heel joint gain circuit of steel joist (developed by the authors)

Результаты численных расчетов показали необходимость усиления стенки балки в районе опорного узла. Для восприятия растягивающих

напряжений, локализованных около оси верхнего ряда болтов, к стенке опорного отсека с одной стороны приварены листовые накладки усиления из стали С255 толщиной 8 мм (рис. 7). Усилия в болтах опорного узла распределяются неравномерно (см. рис. 7). Наиболее нагруженными являются болты верхнего ряда с расчетным усилием растяжения $N = 299.5$ кН на каждый болт (рис. 7), для восприятия которого назначены высокопрочные болты М30 из стали «40Х». В среднем и нижнем рядах приняты болты М20 класса прочности 8.8.

4. Обсуждение результатов

4. Results discussion

Эффект защемления балок в опорных узлах возможно обеспечить простыми конструктивными решениями, а именно: постановка болтов достаточной прочности, локальное укрепление стенки, плотное заполнение монтажного зазора для снижения податливости соединения. В результате численного исследования выявлено, что изгибающий момент в середине пролета при частичном защемлении балок пролетом 15 м уменьшился на 5.1 % в сравнении с идеализированной схемой работы без учета ограничения свободы поворота опорного сечения двухшарнирной балки. В ранее опубликованной работе [9] для аналогично работающих балок пролетом 9 м было выявлено уменьшение пролетного момента на 14.3 %. Таким образом, чем больше пролет, тем меньше эффект от частичного защемления, что связано, кроме прочего, с увеличением высоты балки и, как следствие, с относительно более пониженным размещением болтов в опорном узле. Однако с увеличением пролета даже незначительное снижение собственного веса позволяет получить ощутимое улучшение показателей по металлоемкости. Так, общий вес одной рассмотренной балки пролетом 15 м составляет 23.1 кН. При применении в перекрытии уже десяти таких балок, закрепленных по указанной методике парами, общая экономия металла может составлять более одной тонны. Для балок меньших пролетов экономия значительно возрастает. Кроме того, даже незначительное уменьшение абсолютных деформаций в пролете может оказаться существенным для конструкций, к которым предъявляются повышенные требования к жесткости, например, для подкрановых и мостовых балок, для балок под технологические установки и оборудование. Резервы несущей способности, выявленные при условии частичного защемления балок, могут быть учтены в условиях реконструкции.

Применение односторонних двухузловых связей, как инструмента для моделирования совместной работы двух балок в опорном узле, имеет ряд преимуществ перед моделированием болтового соединения с

использованием объемных КЭ. Указанные преимущества заключаются не только в сравнительной простоте построения расчетной модели, но и в возможности учета: конструктивной нелинейности работы болтового соединения, зазора между опорными деталями балок, усилий предварительного напряжения болтов. Указанные факторы могут быть заданы при описании параметров односторонних двухузловых связей в вычислительном комплексе SCAD Office. Расчет конструктивно-нелинейной системы позволяет учитывать особенности изменения расчетной схемы в процессе деформирования. Учет монтажного зазора крайне важен для выявления резерва силового сопротивления балок, в частности при обследовании несущих конструкций. Наличие зазора между опорными ребрами не означает, что поворотная жесткость узла стремится к нулю, однако зазор значительно снижает эффект частичного защемления балок.

Наряду с перечисленными достоинствами отметим и возможные недостатки разработанной методики расчета, а именно: необходимость трехмерного моделирования балок, это трудоемко для инженерных расчетов; необходимость тщательной проверки, что все односторонние двухузловые связи разомкнуты, иначе следует увеличивать число шагов в нелинейном расчете для полной сходимости задачи; отсутствие экспериментальных исследований, подтверждающих результаты численного моделирования.

Необходимо отметить, что частичное защемление приводит к появлению значительных растягивающих напряжений в стенке на участке около верхнего ряда болтов, что может потребовать ее локального укрепления. Если стенку не укреплять, допуская ограниченное развитие пластических деформаций в ее опорной части, изгибающий момент с опоры будет частично перераспределяться в середину пролета балки. Следует также учитывать выраженность пластических свойств сталей различных классов прочности [22] в связи с опасностью хрупкого разрушения [23; 24] в результате концентрации растягивающих напряжений на опорном участке стенки.

Необходимость расчета опорного узла по разработанной методике может возникнуть в ходе обследования несущих конструкций, так как на монтаже часто предписано заполнять зазоры прокладками и затягивать болты до упора. В этой связи рекомендуется обращать особое внимание на плотность заполнения стыка обследуемых балок, так как отсутствие податливости в болтовых соединениях опорного узла может вызывать изменение НДС всей балочной системы и приводить к потере прочности нерасчетных болтов в верхнем ряду и/или возникновению дополнительных не учтенных растягивающих напряжений в стенке опорного узла балки.

Выводы

Conclusions

Эффект от учета частичного заземления совместно работающих балок пролетом 15 м заключается в уменьшении пролетного изгибающего момента на 5.1 %.

С увеличением пролета эффект от частичного заземления балок на опоре, проявляющийся в снижении пролетного изгибающего момента, угасает.

Рассмотренные в данной работе расчетные положения требуют экспериментального подтверждения, однако предлагаемая методика КЭ-моделирования совместной работы двух смежных балок с применением двухузловых односторонних связей для задания деталей шарнирного опорного узла может закрепиться в практике реального проектирования изгибаемых элементов. При хорошей сходимости численных и экспериментальных исследований полученные результаты можно будет использовать применительно к стержневым расчетным схемам, что существенно упростит расчеты.

Дальнейшее развитие разработанной методики связано с необходимостью численных исследований силовой работы опорного узла с учетом наличия монтажных зазоров не плотно заполненных прокладками.

Балочные конструкции, сопрягаемые предложенным способом, одновременно сочетают в себе преимущества неразрезных и разрезных систем, а именно: уменьшение металлоемкости, снижение деформаций без увеличения габаритных размеров конструкции. Можно предположить, что вероятность появления неконтролируемого НДС [3] в результате неравномерной осадки оснований практически отсутствует. Однако влияние разности осадки опор на изменение эффекта частичного заземления требует дополнительного анализа и может стать направлением дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кирсанов Н.М.** Висячие покрытия производственных зданий / Н.М. Кирсанов. – Москва: Стройиздат, 1990. – 125 с.
2. **Колодежнов С.Н.** Анализ висячих конструктивных систем подкрепления навеса в виде структурной плиты / С.Н. Колодежнов, А.Н. Селиванова // Строительная механика и конструкции. – 2017. – № 1. – С. 61–71. – URL: <https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/stroitel'naya-mekhanika-i-konstruktsii/spisok-vypuskov/14.pdf> (дата обращения: 15.06.2020).
3. **Бирюлев В.В.** Металлические неразрезные конструкции с регулированием уровня опор / В.В. Бирюлев. – М.: Стройиздат, 1984. – 88 с.
4. **Воеводин А.А.** Предварительно напряженные системы элементов конструкций / А.А. Воеводин. – М.: Стройиздат, 1989. – 298 с.
5. **Катюшин В.В.** Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчёт, проектирование, строительство) / В.В. Катюшин. – 2-е изд. – М.: АСВ, 2018. – 1071 с.
6. **Кузнецов Д.Н.** Напряженно-деформированное состояние двутавра в составе комбинированной балки. Часть 1 / Д.Н. Кузнецов, В.Г. Сазыкин // История вузов. Строительство. – 2019. – № 11. – С. 5–16. – URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publications/85636d2f7180218a51e03af9446cc244e3ddf579.pdf> (дата обращения: 20.06.2020).
7. **Кузнецов Д.Н.** Напряженно-деформированное состояние двутавра в составе комбинированной балки. Часть 2 / Д.Н. Кузнецов, В.Г. Сазыкин // История вузов. Строительство. – 2019. – № 12. – С. 13–23. – URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publications/b5dc56aaf4f16256e87bdec3e7890fd1acc3dd45.pdf> (дата обращения: 19.06.2020).
8. **Кузнецов Д.Н.** Напряженно-деформированное состояние двутавра в составе комбинированной балки. Часть 3 / Д.Н. Кузнецов, В.Г. Сазыкин // История вузов. Строительство. – 2020. – № 1. – С. 18–33. – URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publications/10216cd10d5b9705269a51edbd4631cd8db258e9.pdf> (дата обращения: 03.07.2020).
9. **Кузнецов Д.Н.** Силовая работа опорного узла стальной двутавровой балки / Д.Н. Кузнецов, В.В. Григораш. – DOI [10.25987/VSTU.2020.57.1.001](https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.57.1.001) // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2020. – № 1. – С. 11–21. – URL: <http://vestnikvgasu.wmsite.ru/vypuski/vypusk-1-57-2020/silovaja-rabota-opornogo-uzla-stalnoj> (дата обращения: 16.06.2020).
10. **Бате К.** Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
11. **Галлагер Р.** Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. – М.: МИР, 1984. – 428 с.

12. **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. – DOI [10.1088/1757-899X/753/4/042041](https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/4/042041) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/4/042041> (дата обращения: 22.07.2020).
13. **Travush V.I.** Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling / V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. – DOI [10.1088/1757-899X/456/1/012029](https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012029) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Т 456. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/456/1/012029> (дата обращения: 25.07.2020).
14. **Kaytukov T.B.** Mathematical and Computer Modelling as the Basis of Structural Health Monitoring / T.B. Kaytukov, A.M. Belostosky, P.A. Akimov, V.N. Sidorov. – DOI [10.1088/1757-899X/456/1/012072](https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012072) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Т 456. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/456/1/012072> (дата обращения: 23.06.2020).
15. **Belostosky A.M.** About Contemporary Problems of Numerical Modelling of Unique Structures, Buildings and Facilities / A.M. Belostotsky, T.B. Kaytukov, I.N. Afanasyeva, J. Grosel. – DOI [10.1051/mateconf/201711700016](https://doi.org/10.1051/mateconf/201711700016) // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Т 117. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/31/mateconf_rsp2017_00016/mateconf_rsp2017_00016.html (дата обращения: 01.08.2020).
16. **Tusnin A.R.** Selection of Parameters for I-beam Experimental Model Subjected to Bending and Torsion / A.R. Tusnin, M. Prokic. – DOI [10.1016/j.proeng.2015.07.146](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.146) // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 111. – С. 789–796. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815013958> (дата обращения: 05.08.2020).
17. **Петров В.В.** К вопросу расчета пластинок и пологих оболочек с учетом физической и геометрической нелинейности / В.В. Петров // Механика деформируемых сред. – 1974. – № 1. – С. 123–130. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24361745> (дата обращения: 10.07.2020).
18. **Овчинников И.Г.** Расчет нелинейно-упругих пластинок и оболочек на локальные нагрузки / И.Г. Овчинников // Механика деформируемых сред. – 1977. – № 3. – С. 49–56. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24638372> (дата обращения: 16.07.2020).
19. **Карпиловский В.С.** SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер. – М.: АСВ, 2007. – 592 с.
20. **Аверин А.Н.** Расчет систем с односторонними связями / А.Н. Аверин, А.Ю. Пузаков // Строительная механика и конструкции. – 2015. – № 1. – С. 15–32. – URL: <https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/stroitel'naya-mekhanika-i-konstruktsii/spisok-vypuskov/10.pdf> (дата обращения: 22.07.2020).

21. **Игнатьев А.В.** Анализ изгибаемых пластинок с односторонними связями по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода / А.В. Игнатьев, В.А. Игнатьев, Е.А. Гамзатова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 8. – С. 5–14. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36685105> (дата обращения: 28.07.2020).
22. **Ведяков И.И.** Сталь для современных строительных металлических конструкций / И.И. Ведяков, П.Д. Одесский // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 12. – С. 8–12. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27724986> (дата обращения: 08.08.2020).
23. **Соколовский П.И.** Малоуглеродистые и низколегированные стали / П.И. Соколовский. – Москва: Металлургия, 1966. – 216 с.
24. **Балдин В.А.** Некоторые вопросы расчета стальных конструкций по предельным состояниям первой группы / В.А. Балдин, С.А. Ильясевич, Б.М. Броуде, Г.Е. Бельский // Строительная механика и расчет сооружений. – 1976. – № 1. – С. 54–57.

Сведения об авторах:

Кузнецов Дмитрий Николаевич – старший преподаватель кафедры «Металлических и деревянных конструкций», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия, e-mail: kuznecov82@bk.ru

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

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

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

Беляева Светлана Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлических и деревянных конструкций», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия, e-mail: svetboy@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0624-0182>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=620329

Сазыкин Виталий Геннадьевич – старший преподаватель кафедры «Металлических и деревянных конструкций», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия, e-mail: vitalijsazykin@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2281-0525>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1009469

Статья получена: 14.09.2020. Принята к публикации: 28.10.2020. Опубликовано онлайн: 11.11.2020.

REFERENCES

1. Kirsanov N.M. [*Hanging covers of industrial buildings*]. Moscow: Stroyizdat; 1990. (In Russ.).
2. Kolodezhnov S.N., Selivanova A.N. Analysis of suspended system of shed support as structural slab. *Structural mechanics and structures*. 2017;(1): 61–71. Available at: <https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/stroitel'naya-mekhanika-i-konstruktsii/spisok-vypuskov/14.pdf> (accessed 15th June 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Biryulev V.V. [*Continuous metal structures with leveling support*]. Moscow: Stroyizdat; 1984. (In Russ.).
4. Voyevodin A.A. [*Prestressed structural element systems*]. Moscow: Stroyizdat; 1989. (In Russ.).
5. Katyushin V.V. [*Buildings with frames made of steel frames of variable cross-section (calculation, design, construction)*]. Moscow: ASV; 2018. (In Russ.).
6. Kuznetsov D.N., Sazykin V.G. Stress-strain state of an I-beam as part of a combined beam. Part 1. *News of higher educational institutions. Construction*. 2019; (11): 5–16. Available at: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publications/85636d2f7180218a51e03af9446cc244e3ddf579.pdf> (accessed 20th June 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Kuznetsov D.N., Sazykin V.G. Stress-strain state of an I-beam as part of a combined beam. Part 2. *News of higher educational institutions. Construction*. 2019; (12): 13–23. Available at: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publications/b5dc56aaf4f16256e87bdec3e7890fd1acc3dd45.pdf> (accessed 19th June 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Kuznetsov D.N. Stress-strain state of an I-beam as part of a combined beam. Part 3. *News of higher educational institutions. Construction*. 2020; (1): 18–33. Available at: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publications/10216cd10d5b9705269a51edbd4631cd8db258e9.pdf> (accessed 03rd July 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Kuznetsov D.N., Grigorash V.V. Work Power of the Support Unit of the Steel I-Beam. *Scientific journal of construction and architecture*. 2020; (1): 11–21. (In Russ.) DOI: [10.25987/VSTU.2020.57.1.001](https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.57.1.001).
10. Bate K., Vilson E. *Numerical methods in finite element analysis*. Moscow: Stroyizdat; 1982. (In Russ.).
11. Gallager R. [*Finite element method. The basics*]. Moscow: PEACE; 1984. (In Russ.).
12. Kuznetsov D.N., Ponyavina N.A. Numerical Study of the Influence of the Distance between Stiffeners on the Loss of Stability of the Web of an I-Section Steel Beam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753. (In Eng.) DOI: [10.1088/1757-899X/753/4/042041](https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/4/042041).
13. Travush V.I., Belostosky A.M., Akimov P.A. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456. (In Eng.) DOI: [10.1088/1757-899X/456/1/012029](https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012029).
14. Kaytukov T.B., Belostosky A.M., Akimov P.A., Sidorov V.N. Mathematical and Computer Modelling as the Basis of Structural Health Monitoring. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456. (In Eng.) DOI: [10.1088/1757-899X/456/1/012072](https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012072).

15. Belostotsky A.M., Kaytukov T.B., Afanasyeva I.N., J. Grosel About Contemporary Problems of Numerical Modelling of Unique Structures, Buildings and Facilities. *MATEC Web Conf.* 2017; 117. (In Eng.) DOI: [10.1051/mateconf/201711700016](https://doi.org/10.1051/mateconf/201711700016).
16. Tusnin A.R., Prokic M. Selection of Parameters for I-beam Experimental Model Subjected to Bending and Torsion. *Procedia Engineering.* 2015; 111: 789–796. (In Eng.) DOI: [10.1016/j.proeng.2015.07.146](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.146).
17. Petrov V.V. [On the issue of calculating plates and shallow shells taking into account physical and geometric nonlinearity]. *Mechanics of deformable media.* 1974; (1): 123–130. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24361745> (accessed 10th July 2020). (In Russ.).
18. Ovchinnikov I.G. [Calculation of nonlinear elastic plates and shells for local loads]. *Mechanics of deformable media.* 1977; (3): 49–56. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24638372> (accessed 16th July 2020). (In Russ.).
19. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. [SCAD Office. Computing complex SCAD]. Moscow: ASV; 2007. (In Russ.).
20. Averin A.N., Puzakov A.Yu. Design of systems with unilateral constraints. *Structural mechanics and structures.* 2015; (1): 15–32. Available at: <https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/stroitel'naya-mekhanika-i-konstruktsii/spisok-vypuskov/10.pdf> (accessed 22nd July 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
21. Ignatyev A.V., Ignatyev V.A., Gamzatova E.A. Analysis of bending plates with unilateral constraints through the finite element method in the form the of classical mixed method. Proceedings of higher educational institutions. *Construction.* 2018; (8): 5–14. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36685105> (accessed 28th July 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
22. Vedyakov I.I., Odesskiy P.D. Steel for modern building metal structures. *Industrial and civil construction.* 2016; (12): 8–12. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27724986> (accessed 08th august 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
23. Sokolovskiy P.I. [Low carbon and low alloy steels]. Moscow: Metallurgy; 1966. (In Russ.).
24. Baldin V.A., Il'yasevich S.A., Broude B.M., Bel'skiy G.E. Some questions of the calculation of steel structures for the limit states of the first group. *Structural mechanics and calculation of structures.* 1976; (1): 54–57. (In Russ.).

Information about the authors:

Dmitry N. Kuznetsov – Voronezh state technical university, Voronezh, Russia, e-mail: kuznecov82@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6648-1511>
РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=166226
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57205444205>

Svetlana Yu. Belyaeva – Voronezh state technical university, Voronezh, Russia, e-mail: svetboy@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0624-0182>
РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=620329

Vitaliy G. Sazykin – Voronezh state technical university, Voronezh, Russia, e-mail: vitalijsazykin@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2281-0525>
РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1009469

Submitted: 14th September 2020. Revised: 28th October 2020. Published online: 11th November 2020.