

Расчет фибробетонного блока в составе локально усиленных узлов ферм из гнутосварных профилей

Линур Рафаилович Гимранов, Ришат Габдулхаевич Гайнетдинов,
Ленар Равилевич Хайруллин, Абдурахман Пажвак

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведено аналитическое и численное исследование узлов ферм из гнутосварных профилей (ГСП) с локальным заполнением из фибробетона (ФБ). Выполнен анализ численного расчета фибробетонного элемента как балки на упругом основании в качестве локального усиления узлов ферм из ГСП под действием сосредоточенной нагрузки от примыкающего раскоса. Несущая способность узла с непосредственным примыканием раскосов к поясам ферм из ГСП практически полностью определяется геометрией и физико-механическими характеристиками элементов ферм.

Материалы и методы. Применяется метод исследования, основанный на численном моделировании локального усиления узла ФБ. Материалы для узлов: пояс раскоса узла — сталь марки С345 и С255, соответственно по ГОСТ 27772–2015 с расчетным сопротивлением 340 и 240 МПа, локальное заполнение — ФБ с модулем упругости не ниже 27 000 МПа и расчетным сопротивлением сжатию $R_b = 11,5$ МПа.

Результаты. Получены уравнения, на основе которых можно анализировать коэффициент податливости основания фибробетонного блока как балки на упругом основании. Разработаны уравнения, на основе которых можно проанализировать коэффициент относительной изгибной жесткости для установления коэффициента податливости основания блока, предложена методика расчета фибробетонного блока на основе теории балки на упругом основании.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что рассмотрены возможные подходы к определению разных методов расчета фибробетонного блока в составе усиленных узлов ферм из ГСП, что позволит снизить металлоемкость и деформативность. Результаты, полученные при численных исследованиях коэффициента податливости основания фибробетонного блока, а также с использованием программного пакета ANSYS показали, что они близки к результатам расчета коэффициента жесткости фибробетонного блока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численный анализ, узел, фибробетон, стальная ферма, усиление, гнутосварной профиль, несущая способность, компьютерное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гимранов Л.Р., Гайнетдинов Р.Г., Хайруллин Л.Р., Пажвак А. Расчет фибробетонного блока в составе локально усиленных узлов ферм из гнутосварных профилей // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 752–762. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.752-762

Автор, ответственный за переписку: Ришат Габдулхаевич Гайнетдинов, gajnetdinov@bk.ru.

Calculation of a fibre concrete block as a part of locally reinforced truss nodes made of square hollow sections

Linur R. Gimranov, Rishat G. Gainetdinov, Lenar R. Khairullin, Abdurahman Pazhwak
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Analytical and numerical study of truss nodes made of square hollow sections (SHS) with local fibre concrete filling is presented. The analysis of numerical calculation of a fibre concrete element as a beam on an elastic base as a local reinforcement of a truss node made of SHS under the action of the concentrated load from the adjacent strut is performed. The bearing capacity of a node with the direct adjacency of struts to the chords of trusses made of S+HS is almost completely determined by geometry and physical and mechanical characteristics of truss elements made of SHS. With the cross-section of the elements selected on the basis of the calculation of the bars, the load-bearing capacity of K-type connections may not be ensured. In this case it is possible to change the dimensions of the cross-section of a truss node made of square hollow sections. In the existing Russian normative documents, there is no data on the calculation and design of reinforcement of truss nodes made of square hollow sections by filling with concrete. In this connection, it is important to develop simple and reliable methods of strengthening such nodes, as well as appropriate methods of their calculation. The purpose of the work is to develop a methodology for calculating the fibre concrete block of analytical dependencies to determine the bearing capacity under concentrated load.

Materials and methods. The research method based on the numerical modelling of local reinforcement of the node with fibre concrete is used. Materials for the nodes: chord and struts of the node — steel of S255 grade according to GOST 27772–2015 with design resistance 240 MPa, local filling — fibre concrete with elastic modulus not lower than 27,000 MPa and design resistance to compression $R_b = 11.5$ MPa.

Results. The main results of the work consist in the analytical study of truss nodes made of square hollow sections locally reinforced with fibre concrete block, the development of a method for calculating the fibre concrete block as a beam on an elastic base based on the results of numerical experiments in the software package ANSYS.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry consists in the fact that the possible approaches to the definition of different methods of calculation of fibre concrete block as a part of reinforced nodes of trusses made of square hollow sections were considered in order to reduce metal consumption and deformability. The results obtained in numerical studies of the base stiffness factor of fibre concrete block and the results obtained using the software package ANSYS showed that they are close to the results of calculating the stiffness factor of fibre concrete block in locally reinforced nodes of trusses made of square hollow sections reliably.

KEYWORDS: numerical analysis, node, fibre concrete, steel truss, reinforcement, square hollow section, bearing capacity, computer modelling

FOR CITATION: Gimranov L.R., Gainetdinov R.G., Khairullin L.R., Pazhwak A. Calculation of a fibre concrete block as a part of locally reinforced truss nodes made of square hollow sections. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):752-762. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.752-762 (rus.).

Corresponding author: Rishat G. Gainetdinov, gainetdinov@bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стальные фермы из гнутосварных профилей (ГСП) получили широкое распространение в разных областях строительства: особенно в несущих покрытиях и перекрытиях промышленных, гражданских зданий. Соединения раскосов и стоек ферм из ГСП в узлах осуществляют путем непосредственного примыкания одних элементов к другим или с помощью узловых фасонков. К их достоинствам относятся экономичность, технологичность монтажа, отсутствие фасонков и наибольший радиус инерции за счет замкнутых сечений. При этом имеются недостатки узлов, например, К-образный тип соединения, в котором раскосы крепятся непосредственно к поясному элементу ферм из ГСП, имеет характерную картину разрушения в виде местного смятия стенки или полки пояса под действием сжимающей силы раскосных элементов. В этом случае изменить размеры сечения элементов узла не представляется возможным вследствие экономической целесообразности. В связи с этим важно разработать простые и надежные методы усиления данных узлов, а также соответствующие методики их расчета.

В данной работе рассматривается методика расчета фибробетонного блока как балки на упругом основании в составе узла ферм из ГСП. Узлы ферм из ГСП усиливаются путем заполнения фибробетоном (ФБ), чтобы значительно увеличить их несущую способность и жесткость [1]. Численные исследования и расчеты, основанные на характеристиках свойств фибробетонного блока, позволяют более экономично проектировать и применять для расчета конструкции на всех этапах работ узлов ферм из ГСП [2].

Элементы раскосов при растяжении и сжатии следует рассчитывать отдельно, определяющим предельным состоянием для растянутого элемента раскоса является преждевременная местная текучесть пояса в месте примыкания элементов раскоса или пробивной сдвиг поверхности пояса вокруг раскоса, что требует усиления [3–5]. Исследования

[2, 6–10] показали значительное увеличение несущей способности К-образных типов соединений с поясом, заполненных бетоном. Экспериментально изучены малые пролеты ферм из ГСП [11–13], где усиления К-образного типа соединений могут быть выполнены путем заполнения бетоном по всей длине пояса для повышения несущей способности элемента, а также огнестойкости. В публикациях [14–17] представлены результаты исследований для ферм пролетом более 12 м с локальным усилением, в частности, вблизи критических соединений. Авторы трудов [15–17] объясняют, что жесткость примыкания элементов раскоса зависит от усиленных поясов ферм бетоном и геометрических параметров, т.е. ширины примыкания элементов, конструктивной увязки узла. Необходимость разработки методики расчета усиленных узлов путем внутреннего заполнения стального сечения бетоном отмечается в работах [18–22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — стальные фермы из ГСП, локальное усиление узлов которых проводится монолитным ФБ. Предмет исследования — усиление узлов К-образного типа, выполненное согласно труду [10], а также расчет фибробетонного блока на действие сосредоточенной нагрузки от элементов раскоса. Определение действующих усилий в фибробетонном блоке аналитическими методами — комплексная задача, поскольку характер его граничных условий внутри пояса неясный. Авторами настоящей статьи предположено, что определяющим прочностью усилением внутри фибробетонного блока служит изгибающий момент, однако установление характера его распределения в расчетной модели из объемных конечных элементов (КЭ) не представляется возможным. По этой причине в расчетную модель по центру тяжести фибробетонного блока вводится стержневой элемент, жестко связанный с объемными КЭ, что позволит экстраполировать через приведенную жесткость изгибающие усилия в стержне на фибробетонный блок.

Рассматривается соединение узла фермы из ГСП К-образного типа с усиленным фибробетонным блоком (рис. 1). Блок сечением 110×110 мм, длиной 450 мм, выполнен из ФБ с модулем упругости $E = 30\,000$ МПа и расчетным сопротивлением на сжатие $R_b = 14,5$ МПа. Размеры участков раскосов и пояса приняты исходя из расчетных предпосылок распределения усилий, соответствующих в приопорном узле, а также в соответствии с практикой проведения экспериментов по испытанию узлов из ГСП [11]. Поперечное сечение пояса фермы $120 \times 120 \times 4$ мм и сжатого раскоса $60 \times 60 \times 3$ мм, растянутого $40 \times 40 \times 3$ мм. Стержень диаметром 20 мм. Материалы для узлов ферм: пояс выполнен из стали С345, раскосы из стали С255, соответственно по ГОСТ 27772–2015 [9] с расчетным сопротивлением 340 и 240 МПа.

Моделирование узлов ферм из ГСП К-образного типа, локально усиленного ФБ, представлено на рис. 1 [10]. Разработана конечно-элементная модель (КЭМ) в ПК ANSYS Workbench, включающая фрагменты раскосов и пояса, при этом граничные условия накладываются так, что при приложении усилия сжатия к одному из раскосов усилия распределяются аналогично приопорному узлу стропильной фермы из ГСП профилей. Граничные условия наложены следующим образом — растянутый раскос закреплен шарнирно, один конец фрагмента пояса закреплен шарнирно, другой раскреплен из плоскости. В расчетной модели присутствуют пластины заглушки, чтобы избежать краевых деформаций стенок ГСП, а также анкерный элемент соединения профиля ГСП с фибробетонным блоком из фрагмента трубы для предотвращения смещения блока внутри пояса. Торцевые пластины заглушки имеют толщину от 2 до 3 толщин стенок раскосов и пояса. Это позволяет снизить деформации при передаче продольных усилий на раскос и раскреплении от граничных условий и не создавать условий достижения предельных состояний раньше, чем оно будет достигнуто на рассматриваемом участке примыкания раскосов к поясу. В реальном узле в составе фермы этой проблемы не стоит, так как элемент пояса и раскоса протяженные. Передача усилия от растянутого раскоса к профилю осуществляется через сварной шов крепления раскоса к стенке профиля пояса, однако при этом стенка профиля деформируется и между фибробетонным блоком и стенкой профиля пояса образуется зазор. Деформации боковых стенок и нижней полки профиля пояса, в свою очередь, ограничены фибробетонным блоком, расположенным внутри него, который при этом работает по сложной деформированной схеме в замкнутом пространстве. Все тела в расчетной модели выполняются из объемных КЭ тетраэдральной формы.

Расчет модели осуществлялся в геометрически и физически нелинейной постановке с диаграммой работы стали по Прандтлю с пределом текучести 345 МПа и тангенциальным модулем, равным

0 МПа. Передача усилий от ГСП к блоку проводится через контактные элементы с коэффициентом трения, принятым равным 0,15. Напряженно-деформированное состояние (НДС) узла показано на рис. 2.

Эпюра распределения изгибающих моментов (рис. 3) получается по результатам численного моделирования узла, в котором по центру тяжести фибробетонного блока расположен стержневой элемент, жестко сочлененный с объемными КЭ фибробетонного блока, где в результате сложного НДС контактная передача усилий и образование зазоров (рис. 2, с) соответствуют эпюре на рис. 3.

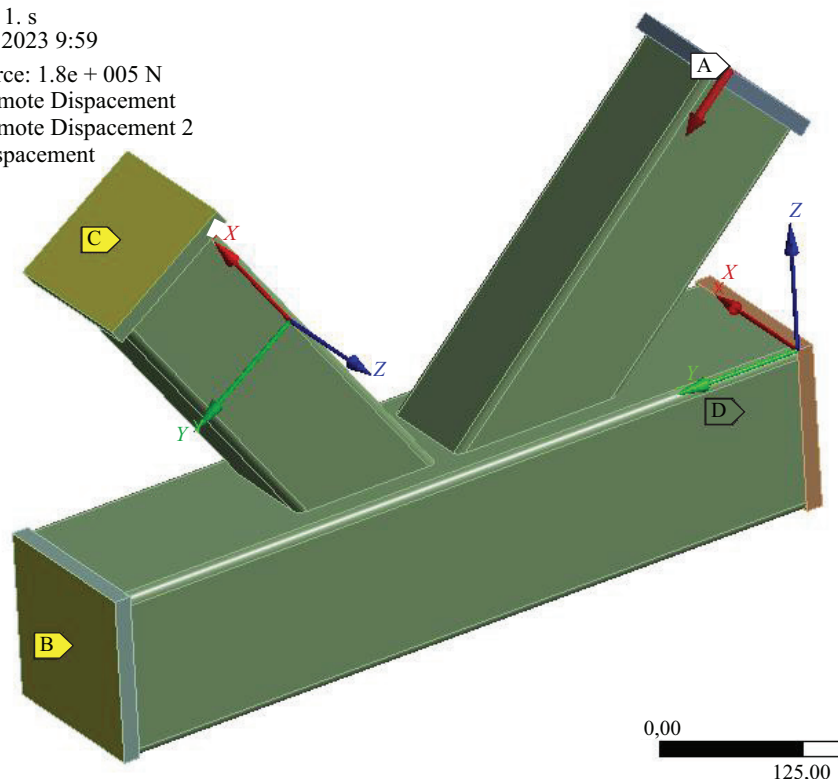
На рис. 3 видно, что для анализа работы фибробетонного блока в качестве усиленных узлов ферм из ГСП К-образного типа [8] можно применить аналогию балки на упругом основании (рис. 4). При этом предположение, что усилие от растянутого раскоса передается через анкер обусловлено эпюрой распределения изгибающих моментов на рис. 2, с, где пик расположен в створе анкера. Однако расположение этого пика возможно просто обусловлено центром пересечения осей раскосов.

По результатам численного моделирования с учетом нескольких сосредоточенных сил составили эпюру изгибающего момента (рис. 5, 6). Данные значения требуются для разработки методики расчета коэффициента податливости основания фибробетонного блока как балки на упругом основании [4]. На рис. 3 видно, что при воздействии на раскос сжимающих продольных сил на полку поясов ферм из ГСП, к которому раскос примыкает, главными являются напряжения изгиба. В случае заполнения пояса ФБ часть усилий от раскоса передается на фибробетонный блок, верхняя полка пояса разгружается. В этом случае работу этих блоков можно рассматривать как работу балки на упругом основании [5]. При этом гипотеза о расчете блока как балки на упругом основании не может воспроизвести эпюру моментов в точности, как в стержне, а только получить пиковые значения, которые нам и нужны. Полная точность эпюры не требуется, так как мы не смотрим деформации блока.

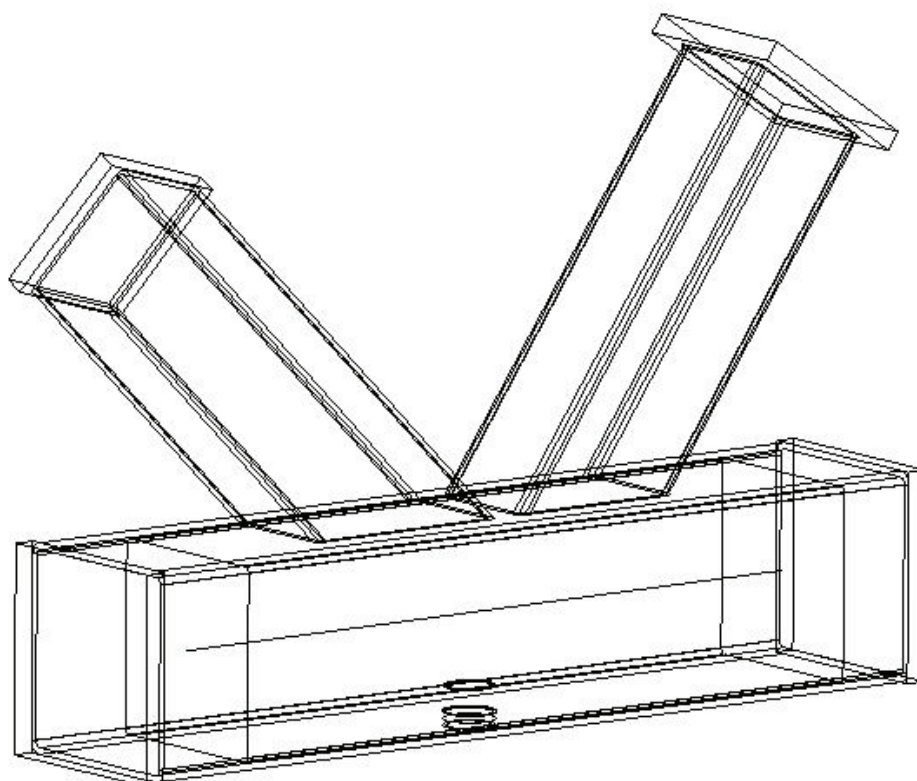
Аналитический подход расчета заключается в том, что в численных моделях, определяя моменты в стержне с разными значениями (β — соотношение ширины сжатого раскоса к ширине пояса и γ — соотношение половины ширины пояса к его толщине), находим значение моментов в балке на упругом основании, варьируя β^* — относительная изгибная жесткость. Таким образом, данный подход позволяет добиться того, что можно определить моменты в фибробетонном блоке, не создавая модель узла. Нахождение коэффициента относительной изгибной жесткости β^* фибробетонного блока на упругом основании в составе усиленных узлов ферм с учетом изгибающих моментов и сосредоточенных нагрузок представлено в работах [5, 11, 12].

Force
Time: 1. s
28.12.2023 9:59

A Force: 1.8e + 005 N
B Remote Displacement
C Remote Displacement 2
D Displacement



a



b

Рис. 1. Модель К-образного узла: *a* — граничные условия; *b* — стержневой элемент по центру фибробетонного блока
Fig. 1. Model of the K-node: *a* — boundary conditions; *b* — rod element in the centre of the fibre concrete block

Производилось варьирование параметров узла с определением изгибающего момента в стержне, расположенном в центре тяжести фибробетонного блока. После чего устанавливались параметры

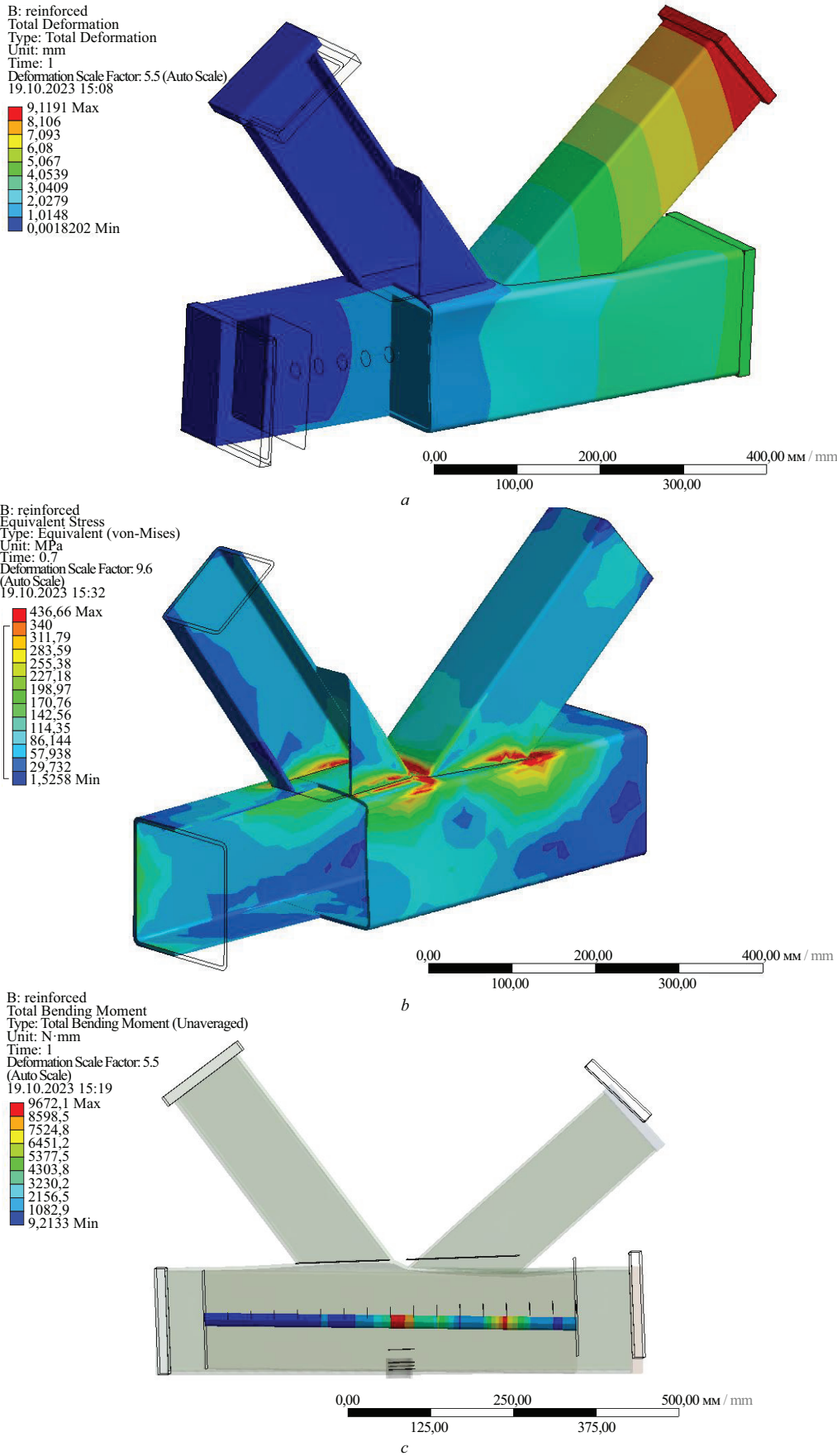


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние узла: *a* — деформации; *b* — приведенные напряжения; *c* — распределение изгибающих моментов в стержне

Fig. 2. Stress-strain state of a node: *a* — deformation; *b* — reduced tensions; *c* — distribution of bending moments in the rod

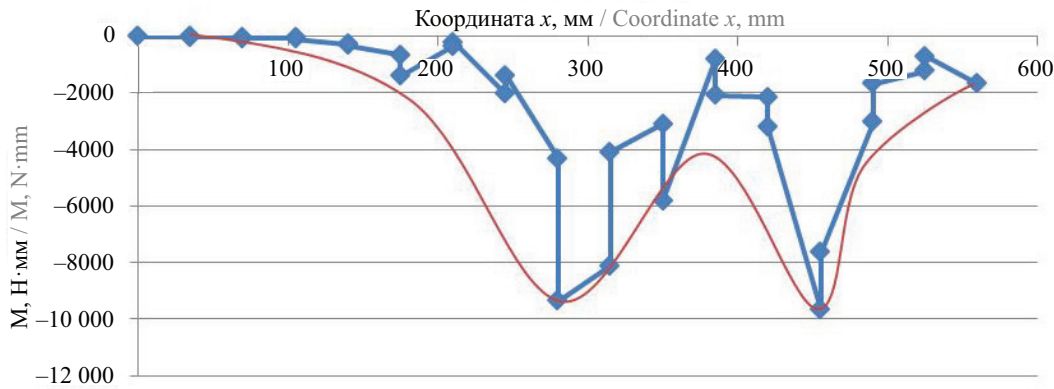


Рис. 3. Распределение изгибающих моментов в стержне: красным цветом обозначена огибающая эпюра моментов; синим — значения моментов в конечном элементе

Fig. 3. Distribution of bending moments in a rod: red — envelope diagram of moments; blue — values of moments in the finite element

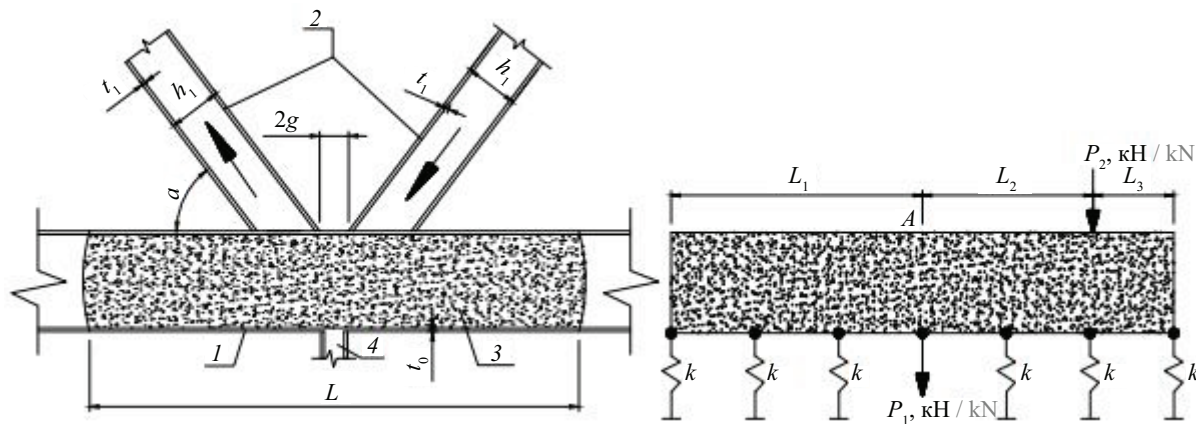


Рис. 4. Расчетная схема фибробетонного блока в составе узла фермы из ГСП: L_1 — расстояние от края блока до анкерного элемента из фрагмента трубы; L_2 — расстояние от анкерного элемента из фрагмента трубы до центра растянутого раскоса; L_3 — расстояние от центра растянутого раскоса до края блока; 1 — пояс; 2 — раскосы; 3 — фибробетонный блок; 4 — анкер

Fig. 4. Calculation scheme of the fibre concrete block as part of a truss nodes: L_1 — distance from the edge of the block to the anchor element from a pipe fragment; L_2 — distance from the anchor element from a pipe fragment to the center of the stretched strut; L_3 — distance from the center of the stretched strut to the edge of the block; 1 — belt; 2 — struts; 3 — fibre-reinforced concrete block; 4 — anchor

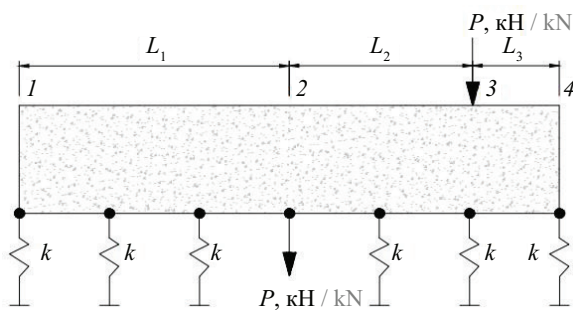


Рис. 5. Фибробетонный блок как балка на упругом основании

Fig. 5. Fibre concrete block as a beam on an elastic base

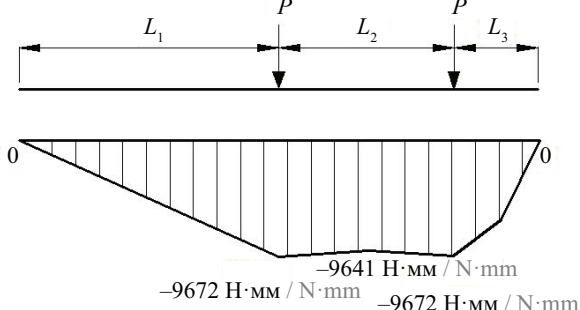


Рис. 6. Эпюры изгибающих моментов в фибробетонном блоке M , Н·мм

Fig. 6. Bending moment diagrams of the fibre concrete block M , N·mm

для определения коэффициента относительной изгибной жесткости β^* для расчета по аналогии балки на упругом основании:

$$M = \frac{P}{4\beta} \cdot e^{\beta \cdot x} (\cos \beta \cdot x - \sin \beta \cdot x). \tag{1}$$

Исходя из формулы (1) вычисляем коэффициент относительной изгибной жесткости: где M — изгибающий момент; P — сосредоточенная нагрузка.

Значение момента в блоке определяется путем численного исследования нахождения момента в стержне.

Для установления коэффициента податливости основания фибробетонного блока в составе усиленных узлов ферм из ГСП с учетом жесткости и коэффициента β^* относительной изгибной жесткости блока [5] используем формулу:

$$K = 4EI\beta^{*4}. \tag{2}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аналитические расчеты и моделирование проводились в соответствии с работой [3]. Для анализа фибробетонного блока в качестве усиленных узлов ферм из ГСП К-образных типов соединений в расчетных сечениях использованы методы расчета балки на упругом основании с учетом принципа независимости действия сил [6]. В расчетных схемах 1–5 варьировались параметры β и γ , которые отражают изменение соотношения ширины раскоса к ширине пояса и отношение ширины пояса к толщине стенки профиля, из которого он выполнен. Для каждой схемы 1–5 фиксировался изгибающий момент в стержне, проходящий внутри блока. Для каждой расчетной схемы подбирались такие расчетные значения жесткости балки на упругом основании K и β , чтобы аналитически вычисленный момент совпадал с приведенным моментом в блоке (моментом, определяемым умножением момента в стержне на соотношение момента инерции блока к моменту инер-

Результаты аналитических расчетов фибробетонного блока на упругом основании

Results of analytical calculations of fibre concrete block on an elastic base

Номер Number	P , кН / kN	M , кН·м / kN·m	β	2γ	K , кН/м / kN/m	β^* , м ⁻¹ / m ⁻¹
1	147	31,534	0,533	37,5	8562	1,1654
2	147	30,011	0,666	30	10 492	1,7278
3	147	26,414	0,800	25	16 362	2,9104
4	147	23,953	0,933	21,241	25 515	11,8624
5	147	21,983	1,000	18,751	27 175	12,6717

Примечание: $P = 147$ кН — усилие, которое вызывает предельное состояние в растянутом раскосе; β — соотношение ширины сжатого раскоса к ширине пояса; γ — соотношение половины ширины пояса к его толщине; K — коэффициент податливости основания фибробетонного блока; β^* — относительная изгибная жесткость.
Note: $P = 147$ кН — the force that causes the limit state in the tensile strut; β — the ratio of the width of the compressed strut to the width of the chord; γ — the ratio of half the width of the chord to its thickness; K — the coefficient of pliability of the fibre concrete block base; β^* — relative bending stiffness.

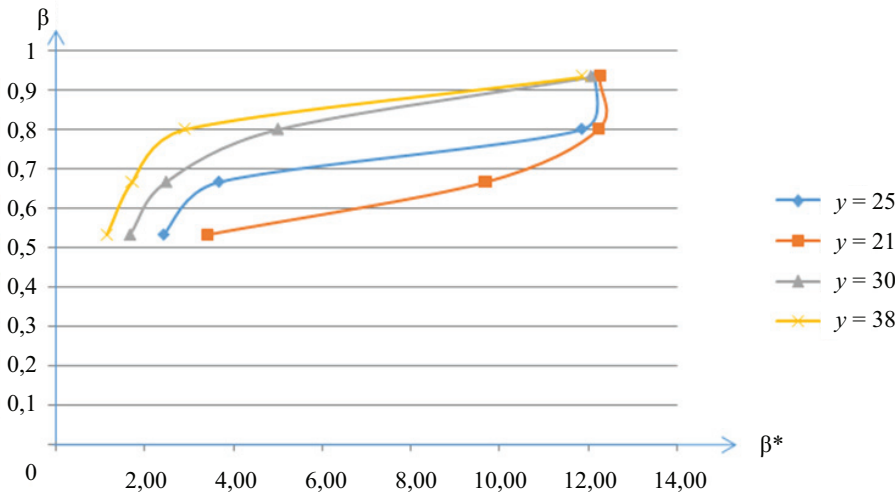


Рис. 7. Графики зависимости коэффициента изгибной жесткости β^* и ширины сечения раскоса к ширине пояса
Fig. 7. Graphs of depending of bending stiffness coefficient β^* and strut cross-section width to the chord width

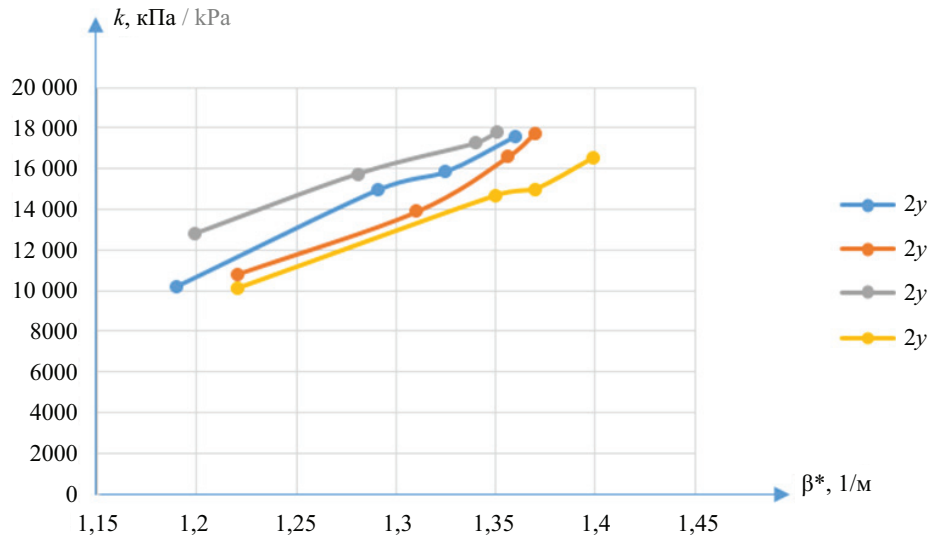


Рис. 8. Графики зависимости коэффициента податливости от коэффициента изгибной относительной жесткости β^*

Fig. 8. Graphs of dependence of the coefficient of ductility of the base k on the coefficient of bending relative stiffness β^*

ции стержня). Полученные результаты расчетов коэффициента податливости, изгибающего момента и коэффициента изгибной жесткости представлены в таблице.

Значения моментов в таблице отличаются от моментов на рис. 3 по причине того, что это моменты в стержне и в блоке, которые в свою очередь пропорциональны их изгибным жесткостям. В данной статье не сравнивается момент, полученный в расчетной модели, с моментом, полученным аналитически. Численные расчеты фибробетонных блоков, моделирующие работу балки как на упругом основании, выполнены с использованием ПК ANSYS Workbench. По результатам численных исследований фибробетонного блока составлен график зависимости ширины сечения раскоса к ширине сечения пояса и коэффициента изгибной жесткости β^* (рис. 7).

По данному графику видно, что несущая способность узла фермы зависит от ширины сечения раскоса. С увеличением ширины сечения раскоса деформативность уменьшается, несущая способность увеличивается. Исходя из результатов численных расчетов фибробетонного блока как балки на упругом основании составлены графики зависимости коэффициента податливости основания от коэффициента изгибной жесткости β^* блока (рис. 8).

По данному графику видно, что промежуточные значения несущей способности при ширине сечения раскоса 80 мм отличаются от ширины сечения 120 мм. Таким образом, несущая способность узла при ширине сечения раскоса 120 мм превышает на 40 % по сравнению с шириной сечения 80 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Определена расчетная схема модели узла, отражающая несущую способность в составе расчетной модели узла из ГСП, включающего раскосы и пояса фермы. Установлена применимость балочной аналогии к расчетной схеме фибробетонного блока как балки на упругом основании.

Получены различные значения β^* в зависимости от параметров узла β , γ и коэффициента податливости основания фибробетонного блока K в зависимости от β^* .

Получены уравнения, на основе которых можно анализировать коэффициент податливости основания фибробетонного блока как балки на упругом основании, а также уравнения, на основе которых можно вычислить изгибающий момент фибробетонного блока с учетом теории балки на упругом основании. Разработаны уравнения, на основе которых можно проанализировать коэффициент относительной изгибной жесткости для определения коэффициента податливости основания блока.

Разработана методика расчета фибробетонного блока на основе теории балки на упругом основании, имеющая важное значение для строительной отрасли.

Несмотря на отсутствие полноценной нормативно-технической базы по методикам расчета фибробетонного блока как балки на упругом основании в качестве усиленных узлов ферм из ГСП, разработанная в ПК ANSYS Workbench КЭМ блока позволяет достоверно определять изгибающий момент. Исходя из него, возможно найти коэффициент податливости K и коэффициент относительной изгибной жесткости β^* блока.

Далее следует выполнить экспериментальное исследование для внедрения методики в строительное.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент RU № 2793503. Способ усиления узла верхнего пояса решетчатой конструкции из трубчатых профилей / Гимранов Л.Р., Гайнетдинов Р.Г., Пажвак А.; заявл. № 2022129975 от 18.11.2022. Бюл. № 10.
2. Зинькова В.А. Методика экспериментальных исследований узловых соединений трубчатых элементов фермы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 50–51. EDN OPGHQL.
3. Gimranov L., Kuznetsov I. Locally concrete filled reinforced joints of RHS and SHS trusses // Proceedings of STCCE. 2021. Pp. 58–71. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_7
4. Xu W., Han L., Tao Z. Flexural behaviour of curved concrete filled steel tubular trusses // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 93. Pp. 119–134. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.10.015
5. Hou C., Han L.-H., Zhao X.-L. Behaviour of circular concrete filled double skin tubes subjected to local bearing force // Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 93. Pp. 36–53. DOI: 10.1016/j.tws.2015.03.004
6. Гимранов Л.Р., Пажвак А. К определению напряженно-деформированного состояния бетонного блока в составе усиленного узла фермы из гнуто-сварных профилей // Известия КГАСУ. 2022. № 4 (62). С. 51–60. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_51. EDN LGZNAO.
7. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Труль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. М. : Стройиздат, 1974. 145 с.
8. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Гайнетдинов Р.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния болтового узла соединения из холодногнутых тонкостенных профилей // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 7. С. 831–843. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.831-843
9. Казакова Е.В. Анализ напряженно-деформированного состояния бесфасоночных узлов легких ферм // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2019. № 53. С. 36–40. EDN JXVGBP.
10. Sakai Y., Hosaka T., Ioe A., Ichikawa A., Mitsuki K. Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder // Journal of Constructional Steel Research. 2004. Vol. 60. Issue 3–5. Pp. 683–699. DOI: 10.1016/s0143-974x(03)00136-6
11. Packer J.A., Wardenier J., Zhao X.L., Vegte G.J., Kurobane Y. Design guide for Rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading // CIDECT. 2009.
12. Gimranov L.R., Pazhwak A. To the determination of the stress-strain state of a concrete block as part of a reinforced node truss from square hollow sections // International Journal of Advanced Academic Studies. 2022. Vol. 4. Pp. 135–139.
13. Nawrot J. An analytical and numerical assessment of the load capacity of the K-joint of flat steel trusses // Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo. 2020. Vol. 175. Issue 25. Pp. 168–173. DOI: 10.17512/znb.2019.1.26
14. Mazon A.A., Sarmanho A., Nunes G., Roquete L., Neiva L.H., Souza F. Numerical analysis of truss systems with stiffened flattened end-bars // Latin American Journal of Solids and Structures. 2018. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.1590/1679-78254119
15. Thejeel M.M., Shallal M.A. Performance of concrete-filled steel tube truss girders strength by adding reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 870. Issue 1. P. 012098. DOI: 10.1088/1757-899x/870/1/012098
16. Huang W., Lai Z., Chen B., Yao P. Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders // Engineering Structures. 2017. Vol. 152. Pp. 607–618. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.035
17. Jin D., Hou C., Shen L., Han L.H. Numerical investigation of demountable CFST K-joints using blind bolts // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 160. Pp. 428–443. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.05.046
18. Thejeel M.M., Shallal M.A. Performance of concrete-filled steel tube truss girders strength by adding reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 870. Issue 1. P. 012098. DOI: 10.1088/1757-899x/870/1/012098
19. Han L.H., Xu W., He S.H., Tao Z. Flexural behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) chord to hollow tubular brace truss: experiments // Journal of Constructional Steel Research. 2015. Vol. 109. Pp. 137–151. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.03.002
20. Yang W., Yan R., Suo Y., Zhang G., Huang B. Experimental study on hysteretic behavior of the overlapped k-joints with concrete filled in chord // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Issue 7. P. 1456. DOI: 10.3390/app9071456
21. Feng R., Chen Y., Gao S., Zhang W. Numerical investigation of concrete-filled multi-planar CHS Inverse-Triangular tubular truss // Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 94. Pp. 23–37. DOI: 10.1016/j.tws.2015.03.030
22. Chen Y., Feng R., Gao S. Experimental study of concrete-filled multiplanar circular hollow section tubular trusses // Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 94. Pp. 199–213. DOI: 10.1016/j.tws.2015.04.013

Поступила в редакцию 20 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 8 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 9 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Линур Рафаилович Гимранов** — кандидат технических наук, доцент; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 745548, Scopus: 57210968788, ORCID: 0000-0003-1728-1825; leenuur@gmail.com;

Ришат Габдулхаевич Гайнетдинов — кандидат технических наук, ассистент; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 1111543; rishat.gajnetdinov@bk.ru;

Ленар Равилевич Хайруллин — кандидат технических наук, доцент, **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; SPIN-код: 3307-4692, Scopus: 57188837651, ORCID: 0000-0002-2870-4195; lenarhay@mail.ru;

Абдурахман Пажвак — аспирант; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; pazhwak_2008@yahoo.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Patent RU No. 279350304. *Method for strengthening upper chord node of a lattice structure made of tubular profiles* / Gimranov L.R., Gainetdinov R.G., Pazhwak A.; appl. No. 2022129975 18.11.2022. Bul. No. 10.
2. Zinkova V.A. Methodology of experimental research of nodal joints of tubular truss elements. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2012; 1:50-51. EDN OPGHQL. (rus.).
3. Gimranov L., Kuznetsov I. Locally concrete filled reinforced joints of RHS and SHS trusses. *Proceedings of STCCE*. 2021; 58-71. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_7
4. Xu W., Han L., Tao Z. Flexural behaviour of curved concrete filled steel tubular trusses. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 93:119-134. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.10.015
5. Hou C., Han L.-H., Zhao X.-L. Behaviour of circular concrete filled double skin tubes subjected to local bearing force. *Thin-Walled Structures*. 2015; 93:36-53. DOI: 10.1016/j.tws.2015.03.004
6. Gimranov L.R., Pazhwak A. Determination of the stress-strain state of a concrete block as part of a reinforced node truss from square hollow sections. *News Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022; 4(62):51-60. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_51. EDN LGZNAO. (rus.).
7. Kikin A.I., Sanzharovsky R.S., Trull V.A. *Structures from steel pipes filled with concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974; 145. (rus.).
8. Kuznetsov I.L., Salakhutdinov M.A., Gainetdinov R.G. Investigation of the stress-deformation state of a bolt-joint assembly of cold-bent thin-walled profiles. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(7):831-843. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.831-843 (rus.).
9. Kazakova E.V. Analysis of the stress-deformation state of the facetless units of light farms. *Collection of Scientific Papers of the Pre-University*. 2019; 53:36-40. EDN JXVGBP. (rus.).
10. Sakai Y., Hosaka T., Isoe A., Ichikawa A., Mitsuki K. Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder. *Journal of Constructional Steel Research*. 2004; 60(3-5):683-699. DOI: 10.1016/s0143-974x(03)00136-6
11. Packer J.A., Wardenier J., Zhao X.L., Vegte G.J., Kurobane Y. Design guide for Rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. *CIDECT*. 2009.
12. Gimranov L.R., Pazhwak A. To the determination of the stress-strain state of a concrete block as part of a reinforced node truss from square hollow sections. *International Journal of Advanced Academic Studies*. 2022; 4:135-139.
13. Nawrot J. An analytical and numerical assessment of the load capacity of the K-joint of flat steel trusses. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo*. 2020; 175(25):168-173. DOI: 10.17512/znb.2019.1.26
14. Mazon A.A., Sarmanho A., Nunes G., Roquete L., Neiva L.H., Souza F. Numerical analysis of truss systems with stiffened flattened end-bars. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2018; 15(3). DOI: 10.1590/1679-78254119
15. Thejeel M.M., Shallal M.A. Performance of concrete-filled steel tube truss girders strength by adding reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 870(1):012098. DOI: 10.1088/1757-899x/870/1/012098
16. Huang W., Lai Z., Chen B., Yao P. Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders. *Engineering Structures*. 2017; 152:607-618. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.035
17. Jin D., Hou C., Shen L., Han L.H. Numerical investigation of demountable CFST K-joints using blind bolts. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 160:428-443. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.05.046
18. Thejeel M.M., Shallal M.A. Performance of concrete-filled steel tube truss girders strength by adding reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 870(1):012098. DOI: 10.1088/1757-899x/870/1/012098

19. Han L.H., Xu W., He S.H., Tao Z. Flexural behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) chord to hollow tubular brace truss: experiments. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015; 109:137-151. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.03.002

20. Yang W., Yan R., Suo Y., Zhang G., Huang B. Experimental Study on Hysteretic Behavior of the Overlapped K-joints with Concrete Filled in Chord. *Applied Sciences*. 2019; 9(7):1456. DOI: 10.3390/app9071456

21. Feng R., Chen Y., Gao S., Zhang W. Numerical investigation of concrete-filled multi-planar CHS Inverse-Triangular tubular truss. *Thin-Walled Structures*. 2015; 94:23-37. DOI: 10.1016/j.tws.2015.03.030

22. Chen Y., Feng R., Gao S. Experimental study of concrete-filled multiplanar circular hollow section tubular trusses. *Thin-Walled Structures*. 2015; 94:199-213. DOI: 10.1016/j.tws.2015.04.013

Received October 20, 2023.

Adopted in revised form on February 8, 2024.

Approved for publication on February 9, 2024.

B I O N O T E S: **Linur R. Gimranov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RSCI: 745548, Scopus: 57210968788, ORCID: 0000-0003-1728-1825; leenuur@gmail.com;

Rishat G. Gainetdinov — Candidate of Technical Sciences, assistant; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RSCI: 1111543; rishat.gajnetdinov@bk.ru;

Lenar R. Khairullin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; SPIN-code: 3307-4692, Scopus: 57188837651, ORCID: 0000-0002-2870-4195; lenarhay@mail.ru;

Abdurahman Pazhwak — postgraduate student; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; pazhwak_2008@yahoo.com.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.