

Т. Г. Рытова¹, Л. А. Максимова^{2,3}, А. Г. Николаева³, Т. М. Макарова³, Н. Г. Пфаненштиль⁴

АНАЛИЗ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОЙ ФЕРМЫ С ФЛАНЦЕВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия*

² *Российский университет транспорта, Москва, Россия*

³ *Чувашский госуниверситет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия*

⁴ *Казанский филиал Российского государственного университета правосудия, г. Казань, Россия*

Аннотация. Приводится анализ частоты собственных колебаний большепролетной фермы с фланцевыми соединениями. Выполнен расчет фланцевого соединения с различными случаями исключения болтов из работы соединения. Анализ результата расчета показал, что возникновение повреждений и дефектов конструкций здания в локальных зонах, величина которых несущественно снижает общую жесткость каркаса, практически не влияет на динамические характеристики каркаса.

Ключевые слова: частота, колебание, фланцевое соединение, расчет, болты.

DOI: 10.37972/chgpu.2021.1.47.007

УДК: 539.37

Введение

Цель настоящей работы - анализ частоты собственных колебаний фермы с фланцевыми соединениями при ослаблении узлов. Разработана расчетная модель конечных

© Рытова Т. Г., Максимова Л. А., Николаева А. Г., Макарова Т. М., Пфаненштиль Н. Г., 2021

Рытова Татьяна Георгиевна

e-mail: tanusha2884@mail.ru, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, Россия,

Максимова Людмила Анатольевна

e-mail: maximova_ng@mail.ru, доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшая математика и естественные науки Российского университета транспорта, профессор кафедры строительных конструкций ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия,

Поступила 10.02.2021

элементов здания ангара, замоделированы узлы фланцевого соединения, выполнен анализ частот собственных колебаний фермы.

Фланцевые соединения могут работать на растяжение или сжатие, на изгиб при наличии в узле изгибающих моментов, а при наличии поперечных сил – на сдвиг. Фланцевые соединения применяются для монтажных стыков балок и ферм, а также в монтажных соединениях балки с колонной, фермы с колонной и т.д. [1, 2].

Фланцевое соединение представляет собой две пластины (рис.1), стягиваемые болтами. Такие соединения имеют массу преимуществ перед другими типами болтовых соединений. Фланцевые соединения обеспечивают возможность возведения каркаса здания при любых климатических условиях и возможность его демонтажа без повреждения несущих элементов. Фланцевые соединения характеризуются высокой надежностью при действии нагрузок и простотой контроля соединения.

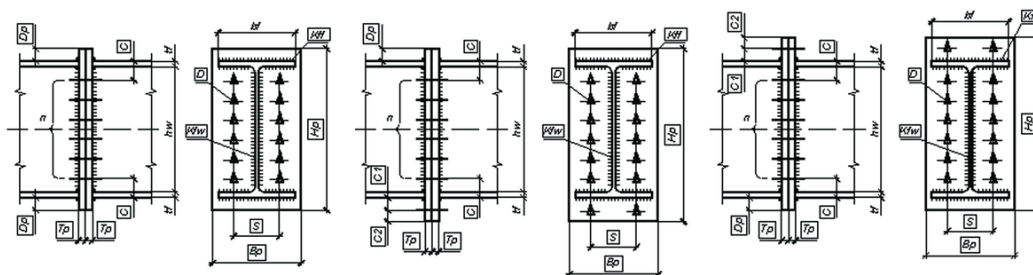


Рис. 1. Фланцевые соединения открытого профиля

В настоящее время изучение работы фланцевых соединений ведется не так активно как в 80-х годах прошлого столетия. Одни из основных современных исследователей работы фланцевых соединений Шафрая С.Д., Шафрая С.А, Клюкина А.Ю., Гладштейна Л.И. и др. Изучение статей в различных научных журналах показало, основной задачей современных исследователей стала разработка корректной расчетной модели с помощью различных программных комплексов. В статье Семенов А. А., Маляренко А. А., Порываев И. А., Семенов С. А. рассматривают расчетную модель фланцевого соединения элементов открытого профиля, выполненную в среде ПК SCAD. В статье проведено сравнение результатов численных исследований с результатами, полученными инженерными методами. Выявлено, что инженерная методика

Николаева Анастасия Георгиевна

e-mail: nag_sf@mail.ru, старший преподаватель ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия,

Макарова Татьяна Михайловна

e-mail: tany96@list.ru, магистрант ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия,

Пфаненштиль Надежда Георгиевна

e-mail: pfedorova83@mail.ru, кандидат исторических наук, доцент кафедры социально-гуманитарных наук Казанского филиала Российского государственного университета правосудия, г. Казань, Россия, Россия

дает заниженные результаты по отдельным болтам в диапазоне 4 – 20 % по сравнению НДС пространственной численной модели. Также авторы проводили исследование фланцевого монтажного стыка фермы из гнутых сварных замкнутых профилей [4]. При сравнении результатов численных исследований моделей в ПК SCAD [3] с результатами, полученными классическими методами и результатами, полученными в программе ANSYS, авторы обосновали необходимость учета изгибающих моментов и соотношения жесткостей отдельных элементов монтажного стыка. Шафрай К. А., Шафрай С. Д. исследовали работу фланцевых соединений, проведя серию испытаний элементарных Т-образных фланцев и сравнив результаты с численными расчетами. В результате исследования была выявлена зависимость между толщиной фланца и величиной изгибных напряжений: с увеличением толщины фланца изгибные напряжения в болте падают. Основной акцент делается на развитие КЭ моделей для оценки НДС и действительной работы фланцевого соединения.

Теоретическое обоснование.

Фланцевое соединение растянутого пояса проверяется расчетами:

- а) на прочность болтов в зонах полки и стенки;
- б) на прочность фланцев на изгиб и поверхностный отрыв в околошовной зоне;
- в) на прочность сварных швов соединения фланца и профиля;
- г) по критерию нераскрытия соединения (по условию передачи поперечной силы для соединений типа А).

Вопрос прочности фланцевых соединений элементов открытого профиля изучался профессором Грудевым И. Д. [5]. Разработана полуэмпирическая методика расчета на прочность фланцевых соединений элементов открытого профиля. Решение получено численно, а подгоночные параметры определены по данным эксперимента. Для удобства пользования методикой предложена аппроксимационная формула. В основу исследования положены следующие положения: все болты имеют одинаковое предварительное натяжение, болты в составе соединения работают неравномерно, и по характеру своей работы разделяются на две группы: болты внутренней зоны, расположенные в углах сечения и более нагруженные, отмеченные ниже индексом В, и болты наружной зоны с индексом Н, наружная зона разбивается на элементарные Т-образные соединения, последние описываются балочной моделью с учетом только геометрической нелинейности.

Соотношение между усилиями в болтах внутренней и наружной зон описывается кусочно-линейной функцией, полученной путем аппроксимации экспериментальных данных. Если разрушение происходит по болтам, оно имеет вероятностную природу и определяется несущей способностью совокупности болтов внутренней зоны. Изгиб болта, наличие отверстий под болты, неравномерность предварительного натяжения, наличие внешних изгибающих моментов, приводит к необходимости введения подгоночных параметров.

Во многих случаях возникает необходимость выполнять расчеты стальных конструкций по европейским нормам проектирования, в частности согласно восьмой его части EN 1993–1–8 [6], касающейся расчета и проектирования узлов. В связи с этим интересным представляется рассмотреть те расчетные модели фланцевых соединений, которыми оперирует данный нормативный документ.

Существенным отличием Еврокода от отечественных норм при расчете фланцевых соединений является то, что они регламентируют учет развития пластических деформаций. Расчету и проектированию фланцевых соединений рамных узлов металлических конструкций посвящены также работы. При таком подходе появляется возможность использовать резервы несущей способности фланцевых соединений за счет допущения развития пластических деформаций во фланце, а также в сечениях соединяемых элементов в околофланцевой зоне. Требуемая толщина фланца в этом случае будет минимальной.

Расчет фланцевых соединений с учетом развития пластических деформаций выполняют с применением метода предельного равновесия. При этом различают три возможных механизма разрушения, а именно: разрушение болтов, разрушение болтов с частичным развитием пластических деформаций во фланце и развитие глубоких пластических деформаций во фланце (рис. 2).

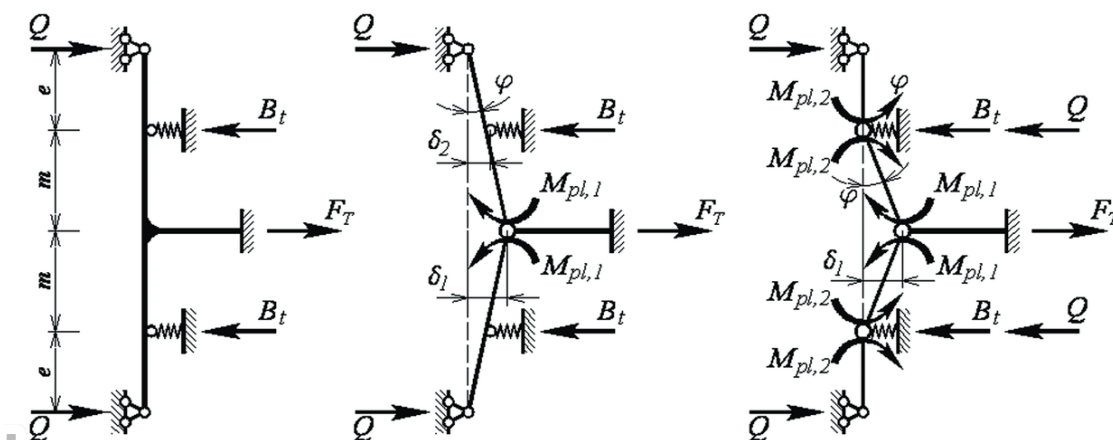


Рис. 2. Расчетные модели фланцевых соединений согласно EN 1993-1-8

Если фланец принять значительной изгибной жесткости, тогда разрушение фланцевого соединения происходит вследствие разрушения болтов, нагруженных внешними силами при отсутствии контактного усилия, обусловленного наличием “рычажного” эффекта.

В случае уменьшений изгибной жесткости фланца (проектирование фланцев меньшей толщины), разрушение фланцевого соединения происходит вследствие разрушения болтов при частичном развитии пластических деформаций во фланце.

В случае использования тонких фланцев разрушение соединения происходит вследствие развития пластических деформаций во фланце.

Необходимо отметить, что развитие пластических деформаций во фланцах и в сечениях соединяемых элементов в околофланцевой зоне вызывает значительное повышение общей деформативности конструкции, которая должна быть соответствующим образом учтена дальнейшим нелинейным анализом стержневой системы.

Так же, на прочность фланцевых соединений может влиять человеческий фактор. Из-за неточности монтажа фланцевые соединения могут иметь значительные зазоры в зоне соприкосновения фланцев.

Итак, у фланцевых соединений есть и свои минусы. Одним из недостатков фланцевых соединений является сложность расчета, так как болты работают неодинаково, кроме того работа фланцевых соединений до конца не исследована, как и их напряженно-деформированное состояние. Необходимо отметить, что несущие конструкции, использующие фланцевые соединения, требуют высокой точности изготовления, поскольку такие соединения не обладают компенсационной способностью. Так, следствием неточностей изготовления конструкции, превышающих регламентированные нормами допустимые отклонения, являются зазоры между контактирующими поверхностями фланцев. Недостаточно исследовано поведение фланцевых соединений динамических нагрузках, ранее проведенные испытания показывают плохую работу соединений такого типа при асимметричном цикле динамических нагрузок.

Расчетная модель.

Объект – здание ангара с покрытием из металлических ферм на фланцевых соединениях пролетом 60 м. Каркас ангара состоит из однопролетных поперечных рам, установленных с шагом 6 м, пролет здания 60 м, расстояние от нулевой отметки до низа стропильных конструкций 16,35 м. Ферма раскосная с малым уклоном 1,5%, имеет строительный подъемный равный 0,45 мм. Высота фермы 4 м.

Между поперечными рамами предусмотрена система связей. Кровля из сэндвич-панелей выполнена по прогонам с шагом 3 м, пролет прогонов 6 м. Для обеспечения геометрической неизменяемости диска покрытия предусмотрена система горизонтальных связей. Пространственная жесткость и устойчивость каркаса здания обеспечивается совместной работой жесткого диска покрытия с вертикальными несущими элементами и системой связей.

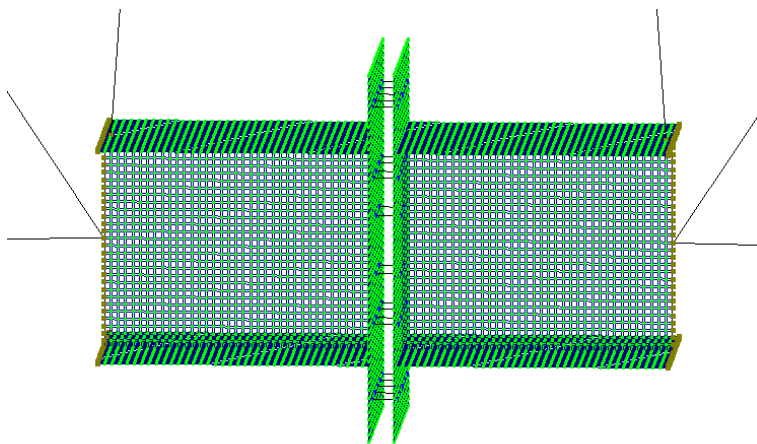


Рис. 3. Центральный узел нижнего пояса

При расчете на динамическую нагрузку определилось 24 формы колебаний для каждого вида динамической нагрузки (от 0,390 Гц, до 19,385 Гц). Поскольку у n -ой формы собственных колебаний частота выше предельной 0,95 согласно СП 20.13330.2016, то ее влияние на напряженно деформированное состояние несущественно и ее допускается не учитывать. Поэтому рассматривали 1 форму колебаний равной 0,390 Гц. Натяжение болтов задавали через температурную нагрузку.

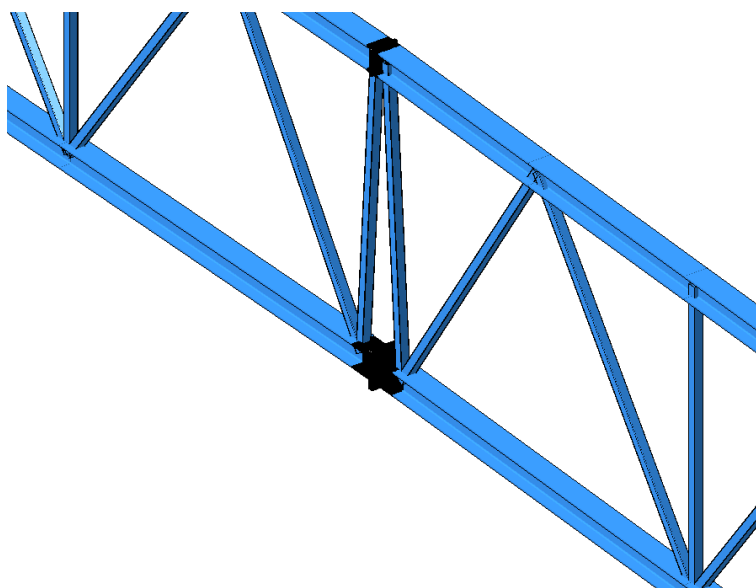


Рис. 4. Пространственная модель рамы (фрагмент)

Результаты расчета.

Выполнен расчет фланцевого соединения с исключением болтов из работы. Анализ результата расчета показал, что возникновение повреждений и дефектов конструкций здания в локальных зонах, величина которых несущественно снижает общую жесткость каркаса (случай 1), практически не влияет на динамические характеристики каркаса.

Рассмотрим вариант механизма разрушения болтов по нижнему поясу. Случай 1: удаляем из работы болты (нижние ряды, отмеченные красным цветом на рис.6):

После удаления болтов увеличился прогиб до 200мм, частоты собственных колебаний не изменились, 0,390 Гц, возросли продольные усилия в стержнях.

Рассмотрим следующий вариант. Случай 2: удаляем из работы болты последующих 2 рядов (рис.8). После удаления болтов увеличился прогиб до 203 мм, частоты собственных колебаний не изменились 0,390 Гц, возросли продольные усилия в болтах.

Полученные расчетные данные представлены в таблице 1.

Расчетный случай	Частота, Гц	Прогибы, мм	Ускорение по Z(G), мм/с ²
без дефектов	0,390	189	0,594
случай 1	0,390	200	0,639
случай 2	0,390	202	0,641

Таблица 1. Результаты расчетов

Заключение.

Как следует из представленных результатов, собственная частота колебаний конструкции не меняется, при различных вариантах последовательного исключения из

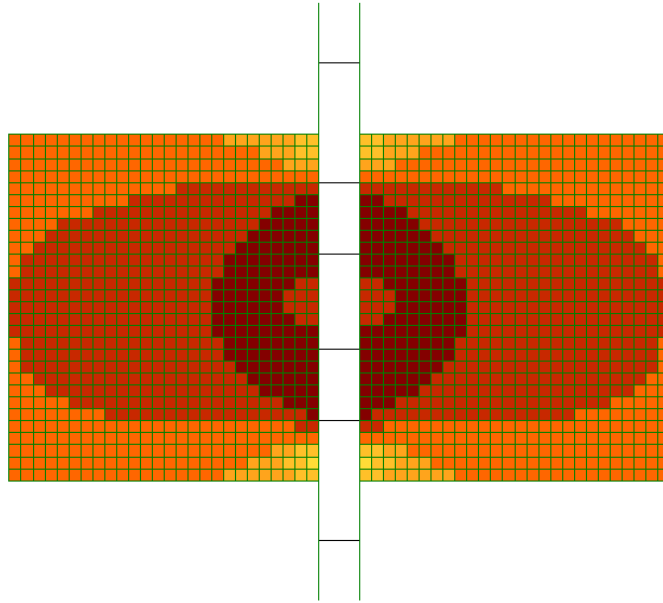


Рис. 5. Мозаика напряжений N_x соединения в середине пролета

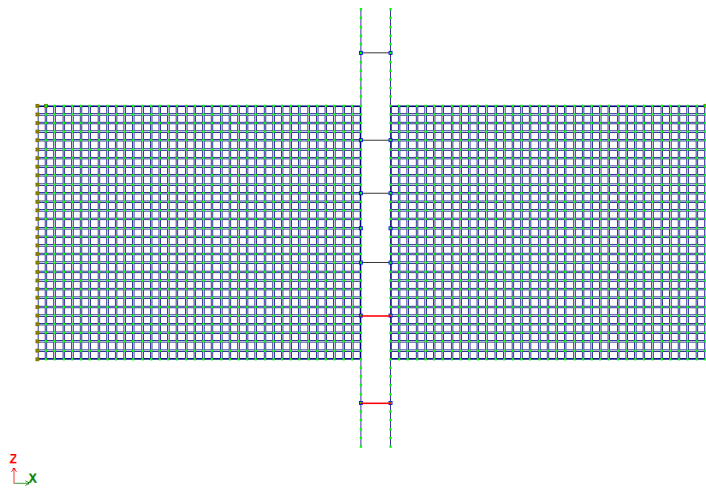


Рис. 6. Узел в середине пролета

работы болтов, поскольку происходит перераспределение усилий в болтах по соединению. Поэтому частота собственных колебаний является малочувствительной характеристикой и ее использование для мониторинга малоперспективно.

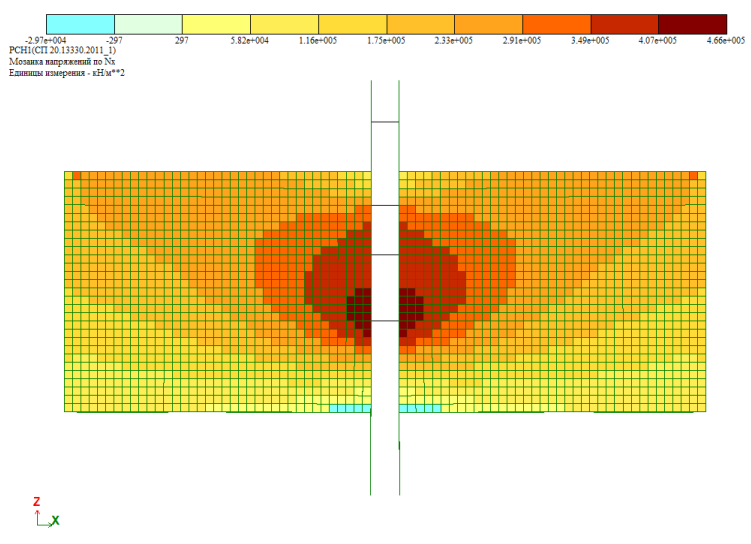
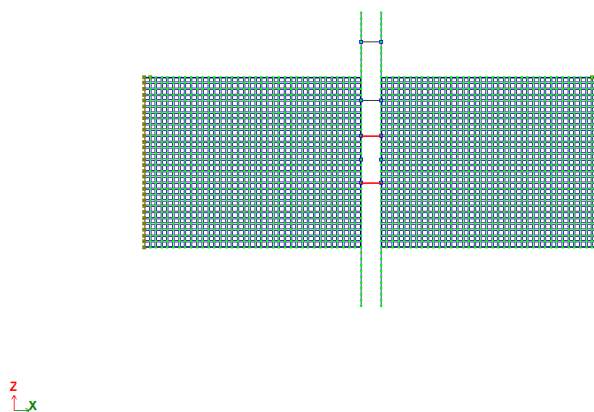
Рис. 7. Мозаика напряжений N_x соединения в середине пролета

Рис. 8. Узел в середине пролета

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций / ВНИПИ Промстальконструкция, ЦНИИПСК им. Мельникова. М.: 1988. 83с.
- [2] Рекомендации по проектированию работающих на сдвиг болтовых соединений стальных строительных конструкций. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1990. 18 с.
- [3] Семенов А.А., Маляренко А.А., Порываев И.А., Сафиудлин М.Н. Напряженно-деформированное состояние высокопрочных болтов фланцевых соединений в укрупнительных стыках стропильных ферм // Инженерно-строительный журнал. № 5. 2014. С. 54–62.
- [4] Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Юрченко В.В. Расчетные модели фланцевых соединений рамных узлов металлических конструкций и их программная реализация в "SCAD Office" // CADMaster. 2010. № 3. С. 110–115

- [5] Грудев И. Д. Прочность фланцевых соединений элементов открытого профиля. Болтовые и специальные монтажные соединения в стальных строительных конструкциях. Международный коллоквиум. 1989. Труды. Т. 2. С. 7-13.
- [6] EN 1993-1-8 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

*T. G. Rytova*¹, *L. A. Maximova*^{2,3}, *A. G. Nikolaeva*³, *A. G. Nikolaeva*³, *N. G. Pfanenshtil*⁴

ANALYSIS OF THE NATURAL OSCILLATION FREQUENCY OF THE LONG-SPAN TRUSSES WITH FLANGED CONNECTIONS

¹*Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

²*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

³*I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia*

⁴*Kazan Branch of the Russian State University of Justice, Kazan, Russia*

Abstract. The analysis of the natural vibration frequency of a large-span truss with flanged connections is given. The calculation of the flange connection with various cases of exclusion of bolts from the connection operation is performed. Analysis of the calculation results showed that the occurrence of damage and defects in the building structures in local areas, the value of which significantly reduces the overall rigidity of the frame, practically does not affect the dynamic characteristics of the frame.

Keywords: frequency, oscillation, flange connection, calculation, bolts.

REFERENCES

- [1] Recommendations for the calculation, design, manufacture and installation of flanged joints of steel building structures / VNIPI Promstalkonstruktsiya, TsNIIPSK im. Melnikov. M.: 1988. 83 p. (In Russian)
- [2] Recommendations for the design of shear-operated bolted joints of steel building structures. Moscow: TsNIIPSK im. Melnikov, 1990. 18 p. (In Russian)

©Rytova T. G., Maximova L. A., Nikolaeva A. G., Makarova T. M., Pfanenshtil N. G., 2021
Rytova Tatyana Georgievna
 e-mail: tanusha2884@mail.ru, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Maximova Lyudmila Anatolyevna
 e-mail: maximova_ng@mail.ru, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia,
Nikolaeva Anastasia Georgievna
 e-mail: nag_sf@mail.ru, Senior Lecturer, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia,
Makarova Tatyana Mikhailovna
 e-mail: tany96@list.ru, Master's Student, I.N. Ulyanov Chuvash State University,
Pfanenshtil Nadezhda Georgievna
 e-mail: nfeodorova83@mail.ru, Candidate of Historical Sciences, Associate Professor, Kazan Branch of the Russian State University of Justice, Kazan, Russia

-
- [3] Semenov A. A., Malyarenko A. A., Poryvaev I. A., Safiullin M. N. The stress-strain state of high-strength bolts of flanged joints in the enlarged joints of truss trusses // Civil Engineering Journal. No 5. 2014. pp. 54-62. (In Russian)
 - [4] Perelmuter A.V., Kriksunov E. Z., Yurchenko V. V. Calculation models of flanged joints of frame assemblies of metal structures and their software implementation in "SCAD Office"// CADMaster. 2010. No 3. pp. 110-115. (In Russian)
 - [5] Grudev I. D. Strength of flanged joints of open profile elements. Bolted and special mounting connections in steel building structures. International Colloquium. - 1989. - Proceedings. Vol. 2 - p. 7-13. (In Russian)
 - [6] EN 1993-1-8 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steelstructures - Part 1-8: Design of joints [Authority: TheEuropean Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]