

Т. Г. Рытова¹, И. С. Игольников¹, Л. А. Максимова^{2, 3}, Н. Г. Козина⁴

УМЕНЬШЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ФЛАНЦА В СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ ЗАМКНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

²Российский университет транспорта, Москва, Россия

³Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

⁴Казанский филиал Российского государственного университета правосудия, Казань, Россия

Аннотация. В российских нормах с целью упрощения расчета фланцевых соединений за основу взята гипотеза недеформируемой плоскости контакта фланца. Для достижения данной гипотезы приходится применять достаточно толстые фланцы и болты высокого класса прочности. Несмотря на широкое распространение фланцевого соединения, истинная механика поведения работы узла до сих пор не изучена. Предметом исследования является изучение влияния параметров узла фланцевого соединения на несущую способность.

Ключевые слова: фланцевое соединение, гнutosварные замкнутые профили, несущая способность, толщина, фланец.

Рытова Татьяна Георгиевна, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; e-mail: rytovatg@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8835-4393>; AuthorID: 856792.

Игольников Иван Сергеевич, магистр кафедры металлических и деревянных конструкций; e-mail: goldigl@bk.ru; AuthorID: 866758

Максимова Людмила Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики и естественных наук; e-mail: maximova_ng@mail.ru; AuthorID: 14131.

Козина Надежда Георгиевна, кандидат исторических наук, доцент кафедры социально-гуманитарных дисциплин; e-mail: nfeodorova83@mail.ru; AuthorID: 244794

для цитирования: Рытова Т. Г., Игольников И. С., Максимова Л. А., Козина Н. Г. Уменьшение толщины фланца в соединениях из замкнутых профилей // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2024. № 3(61). С. 60–69. DOI: 10.37972/chgpu.2024.61.3.006 EDN: NXAGEN

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

T. G. Rytova¹, I. S. Igolnikov¹, L. A. Maximova^{2, 3}, N. G. Kozina⁴

REDUCING THE THICKNESS OF FLANGES IN CONNECTIONS MADE OF CLOSED PROFILES

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

²*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

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

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

Abstract. In Russian standards, to simplify the calculation of flange connections, the hypothesis of a non-deformable contact plane is taken as a basis. Achieving this hypothesis requires using sufficiently thick flanges and high-strength bolts. Despite the widespread use of flange connections, the true mechanics of the assembly behavior remain understudied. This study investigates the effect of flange connection assembly parameters on load-bearing capacity. The results provide insights into optimizing flange thickness while maintaining structural integrity.

Keywords: flange connection, bent-welded closed profiles, load-bearing capacity, thickness, flange.

Tatyana G. Rytova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; e-mail: rytovatg@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8835-4393>; AuthorID: 856792.

Ivan S. Igolnikov, Master's Student; e-mail: goldigl@bk.ru; AuthorID: 866758

Lyudmila A. Maksimova, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; e-mail: maximova_ng@mail.ru; AuthorID: 14131.

Nadezhda G. Kozina, Candidate of Historical Sciences, Associate Professor; e-mail: nfedorova83@mail.ru; AuthorID: 244794

to cite this article: Rytova T. G., Igolnikov I. S., Maximova L. A., Kozina N. G. Reducing the thickness of flanges in connections made of closed profiles // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2024. No 3(61). p. 60–69. DOI: 10.37972/chgpu.2024.61.3.006 EDN: NXAGEN

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение. Фланцевое соединение является весьма распространённым видом стыка стержневых элементов. Оно является одним из наиболее эффективных типов соединений, поскольку несущая способность болтов используется практически полностью, а контактирующие поверхности соединяемых элементов не требуют специальной обработки в период монтажа [1]. Наиболее используемые профили в строительстве являются двутавровые профили и менее используемые гнутосварные профили прямоугольного сечения.

Причины нераспространённости конструирования с применением профилей замкнутого сечения следуют из высокой стоимости по отношению к двутавровым профилям при относительно равных характеристиках в одной плоскости. Дополнительными факторами являются отсутствие возможности или нецелесообразности усиления замкнутого профиля для придания ему большей местной устойчивости (при работе на сжатие), отсутствие современных методик и пособий по расчету узлов как на сжатие, так и на растяжение, большего расхода металла по сравнению со сварными двутаврами на аналогичное здание или сооружение, но меньшего чем у прокатного.

При проектировании фланцевых соединений проектировщики используют пособия, справочники [1–9]. с учетом действующей нормативной документацией [10, 11]. Данные справочники содержат в себе в основном рекомендации по расчету фланцевых соединений двутавровых сечений, исключения составляют серия [2] полностью посвященная стальным конструкциям покрытий производственных зданий с применением гнутосварных профилей, пособие [12], где замкнутым гнутосварным прямоугольным профилям уделено внимание. Используются две модели сопряжения металлоконструкций – шарнирная или жесткая. Податливость жесткого узла в Российский нормах в настоящий момент не учитывается, в отличии от Европейских [12–20], имеются наработки в данном направлении [1].

В российских нормах с целью упрощения расчета за основу взята гипотеза недеформируемой плоскости контакта фланца при расчете отдельно фланца. Для достижения данной гипотезы приходится применять достаточно толстые фланцы и болты высокого класса прочности. Зарубежное пособие [13] с тонкими фланцами несовместимо с массивными колоннами, где толщина полки и стенки колонны существенно превышает толщину фланца [1]. Предложенная конечно-элементная модель и измененные формулы пособия, описанные в статье [1], точнее описывают реальное поведения узла и согласуются с натурными испытаниями [21–24].

Предметом исследования является изучение влияния параметров узла фланцевого соединения на несущую способность, установление зависимости несущей способности фланцевого соединения от толщины фланца.

1. Методы Для осуществления численного исследования необходимо придерживаться общепринятых правил проектирования [10, 11]. В качестве расчетного фланцевого соединения будет выбран узел стыка нижнего пояса фермы по длине (Рис. 1). При проектировании учитываются следующие конструктивные

требования: минимальная толщина стенок профиля не менее 3 мм из условий сварки и коррозионной стойкости; в целях экономической целесообразности использования фермы вместо балки, сечения труб принимаются не менее 80x3.

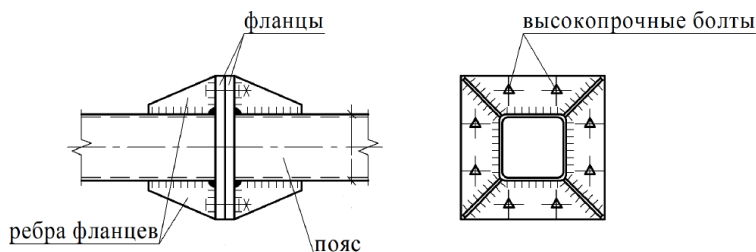


Рис. 1. Типовой фланцевый узел фермы с применением квадратных профилей.

Для построения моделей узлов выбран программный комплекс IDEA Statica, поскольку имеется возможность решения контактной задачи между двумя фланцами.

При исследовании узлового соединения варьируются геометрические параметры узла, а также продольная сила. В результате определяются напряжения во фланце и усилия в болтах. Заданы исходные параметры для обобщения результатов расчета: 8 болтов в соединении, 2 болта между ребрами жесткости, диаметр отверстия под болты на 3 мм больше диаметра болта, болты класса прочности 10.9, класс точности В, сталь фланцев, профиля, ребер жесткости С355, однозначная эпюра растягивающий напряжений, все сварные швы имеют одинаковые катеты.

Все фланцевые соединения были проверены на прочность и местную устойчивость соединяемых элементов в околофланцевой зоне, несущую способность болтов, прочность фланца, несущую способность сварных швов крепления фланца к элементам конструкции (Рис. 2).

Прочность фланца считается обеспеченной по нормативным документам [10, 11] и рекомендациям [5], если толщина фланца находится в пределах от 20 до 40 мм, сталь фланцев С355 и С390, нагрузка на болт от действия внешних усилий не превышает предельно допустимого значения. Исходя из этих условий назначается толщина фланцев 20-25 мм из стали С355 в соответствии с рекомендациями пункта 4.4 [5] (для высокопрочных болтов М20 – 20 мм, М24 – 25 мм, где болты с классом прочности не ниже 10.9 по ГОСТ Р 52644-2006, все болты являются болтами внутренней зоны).

2. Результаты. В расчете предельные пластические деформации принимаются равными 0,3% в соответствии с комментариями [9] в рамках пояснений к [6]. Результаты расчета приведены в таблице 1.

В результате анализа можно увидеть, что потенциал прочности фланца используется не полностью. Запас прочности фланца находится в диапазоне от

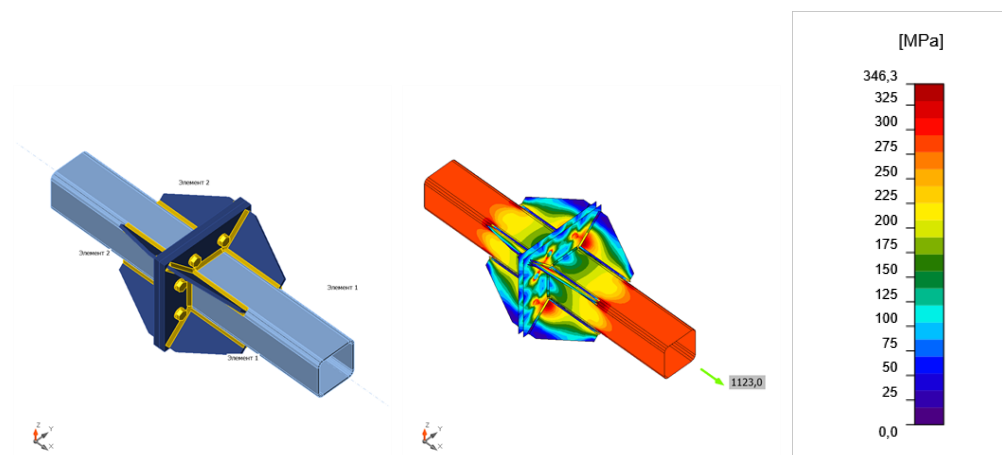


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в фланцевом соединении в IDEA Statica.

№	Профиль	Усилие N, кН	Толщина фланца, мм	Напряжение во фланце, Н/мм ²	Расчетное сопротивление фланца, Н/мм ²	Запас прочности %
1	2	3	4	6	7	8
1	140x4	599	20	167,8	336,6	50
2	140x6	876	20	234	336,6	30
3	140x8	1123	20	288,7	336,6	14
4	150x6	943	20	249,9	336,6	26
5	150x8	1213	25	216	336,6	36
6	160x6	1011	20	275,2	336,6	18
7	160x8	1303	25	233,6	336,6	31
8	180x5	964	20	286,9	336,6	15
9	180x7	1312	25	249,4	336,6	26
10	180x9	1649	25	294,5	336,6	13

Таблица 1. Результаты расчета.

13% до 50%. Данный запас обуславливается отсутствием формулы для расчета фланца, а также гипотезой о не деформируемости плоскости контакта, что приводит к увеличению толщины фланца. Средний коэффициент запаса составляет 26%. Стоит отметить, что потенциал прочности фланца используется не полностью и подлежит дополнительному уточнению.

В качестве расчетной методики предлагается использовать метод расчета опорных плит по пункту 8.6 [10]. При расчете давления под пластиной допускается принимать его равномерно распределенным [8]. Данное допущение, дает удовлетворительные результаты расчета [7]. Одним из способов уточнения традиционной методики может быть учет совместной работы соседних участков плиты.

Так, например, для участка, опертого на 3 канта его можно рассматривать не как шарнирно опертую, а как жестко защемленную по 3 сторонам пластину. В результате совместной работы других участков фланца и податливости болтов можно сделать вывод, что фланец работает как упруго-защемленная пластинка [7]. Если рассмотреть фланцевый узел с точки зрения опирания пластины на 3 или 4 канта, во все случаях момент в пластине, опертой на 3 канта будет выше, чем на пластине опертой на 4 канта (Рис. 3.)

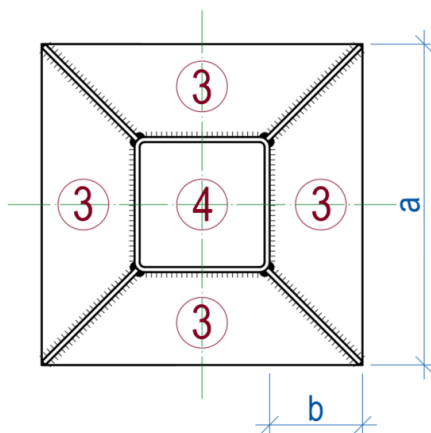


Рис. 3. Участки фланцевого соединения.

На основе проведенных расчетов в IDEA Statica определяем диапазон толщин фланца. Нижней границей толщины будет служить достижение фланцем предела текучести и 0,3% относительных деформаций элементов соединения. Верхней границей толщины будет служить напряжения во фланце, отличающиеся не более чем на 1% от предела текучести. Результаты полученных значений толщин приведены в таблице 2.

Выполнен расчет по методу расчета опорных плит [10] с скорректированными толщинами, определенными в IDEA Statica, результаты приведены в таблице 3.

При уточненной толщине фланца потенциал прочности фланца используется полностью (запас прочности фланца находится стремится к 0%).

Так как фланец подбирался по пределу текучести и относительному удлинению не более 0,3% в IDEA Statica, то потенциал возможности фланца используется максимально, что выражается в почти нулевом запасе. Толщину фланца

№	Профиль	N, кН	Минимальная толщина фланца, мм	Максимальная толщина фланца, мм
1	140x4	599	10,6	11,3
2	140x6	876	11,0	14,3
3	140x8	1123	13,9	18,5
4	150x6	943	11,7	14,8
5	150x8	1213	12,7	17,8
6	160x6	1011	12,1	14,7
7	160x8	1303	14,3	18,5
8	180x5	964	12,1	16,6
9	180x7	1312	15,0	17,8
10	180x9	1649	17,2	21,5

Таблица 2. Диапазон толщин фланца.

№	Профиль	N, кН	b, мм	a, мм	Момент в фланце, кНсм	Толщина, мм	Напряжения во фланце, Н/мм ²
1	140x4	599	80	300	6,6	11,3	346,4
2	140x6	876	80	300	9,6	13,7	346,4
3	140x8	1123	85	310	12,4	15,5	346,4
4	150x6	943	80	310	10,4	14,2	346,4
5	150x8	1213	95	340	13,3	16,1	336,7
6	160x6	1011	80	320	11,1	14,7	346,4
7	160x8	1303	95	350	14,3	16,7	336,7
8	180x5	964	80	340	10,6	14,3	346,1
9	180x7	1312	90	360	14,4	16,7	336,7
10	180x9	1649	95	370	18,1	18,7	336,7

Таблица 3. Результаты уточненного расчета.

удалось снизить на несколько толщин начиная с 11,3 мм и заканчивая 18,7 мм в рассматриваемых типоразмерах профилей. В результате снижения толщины фланцевого соединения, произошло увеличение рычажных сил для болтового соединения, в следствии чего выросла нагрузка на болты. Следовательно, в некоторых соединениях появилась необходимость замены диаметра болта на больший типоразмер.

3. Обсуждение. Несмотря на такое широкое распространение фланцевого соединения, истинная механика поведения работы узла до сих пор не изучена. Не изучена проблема восприятия момента фланцем и передачи его, считается

что фланец, абсолютно жесткий и не деформируемый и полностью воспринимает момент. Не изучена работа узла в зоне пластических деформаций [1, 25]. Вдобавок имеющиеся формулы, для расчета стыка фланцевых соединений с применением закрытых профилей, уже устарели и требуют актуализации в соответствии с нынешними нормами и правилами и дополненными сортаментами.

4. Выводы. На основании проведенных исследований работы фланцевого соединения с применением закрытых профилей были предложены уточнения в расчете толщины фланца. С учетом этого уменьшен резерв несущей способности фланцевого соединения узлов фермы.

Для повышения точности расчета аналитической модели и дальнейшего внедрения в инженерную практику необходимо исследовать фланцевое соединение в нелинейной постановке с заданными параметрами, провести натурные испытания для наилучшей корреляции с расчетными моделями.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Вклад авторов равноценен.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. The authors declare that they have no competing interests.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. This study was not supported by any external sources of funding.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ведяков И.И., Конин Д.В., Олуромби А.Р., Нахвальнов П.В. Учет пластических деформаций при расчете фланцевых соединений // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 9–16.
- [2] Серия 1.460.3-14. Стальные конструкции покрытий производственных зданий пролетами 18, 24 и 30 м с применением замкнутых гнутосварных профилей прямоугольного сечения типа «Молодечно». 1988.
- [3] Серия 2.440-2 выпуски с 1 по 8. Узлы стальных конструкций производственных зданий промышленных предприятий. 1989.
- [4] Руководство по проектированию, изготовлению и сборке монтажных фланцевых соединений стропильных ферм с поясами из широкополочных двутавров, 1982.
- [5] Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений строительных конструкций, 1988.
- [6] СТО АРСС 11251254.001-018-3. Руководство по проектированию стальных конструкций многоэтажных зданий. Москва, 2018.
- [7] Катюшин В.В. Здания с каркасом из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование, строительство). Москва : Стройиздат, 2005. С. 656.
- [8] Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С. Металлические конструкции. Москва : Академия, 2011. С. 688.
- [9] Кузнецов В.В. Справочник проектировщика. Том 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. Москва : АСВ, 1998. С. 512.

- [10] СП 16.13330.2017 "Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* 2017.
- [11] СП 294.1325800.2017 Конструкции стальные. Правила проектирования, 2017.
- [12] Пресняков Н.И., Востров Е.К., Бабушкин В.М. Национальное приложение к Еврокоду EN 1993-1-8:2005. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений. Москва, 2011.
- [13] Joints in Steel Construction Moment Connection. London : The Steel Construction Institute, 1997. P. 163.
- [14] EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, 2005.
- [15] Пресняков Н.И., Кудишин Ю.И. Техническое редактирование текста Еврокода EN 1993-1-1:2005. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила для зданий и сооружений. Москва : ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, 2011.
- [16] Пресняков Н.И., Кудишин Ю.И. Национальное приложение к Еврокоду EN 1993-1-1:2005. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила для зданий и сооружений. Москва, 2011.
- [17] Пресняков Н.И., Кудишин Ю.И. Сопоставительный анализ Еврокода EN 1993-1-1:2005 "Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила для зданий и сооружений" с российскими нормативными документами. Москва : ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, 2011.
- [18] EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-8: Design of Joints, 2005.
- [19] Пресняков Н.И., Востров Е.К., Бабушкин В.М. Техническое редактирование текста Еврокода EN 1993-1-8:2005. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений. Москва : ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, 2011.
- [20] Пресняков Н.И., Востров Е.К., Бабушкин В.М. Сопоставительный анализ Еврокода EN 1993-1-8:2005 "Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений" с российскими нормативными документами. Москва : ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, 2011.
- [21] Wang X., Luo Y., Qiang X. Review on High Strength Steel Bolted End-Plate Connections // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 744–746. P. 265–273.
- [22] Abidelah A., Bouchair A., Kerdal D.E. Experimental and Analytical Behavior of Bolted End-Plate Connections with or without Stiffeners // Journal of Constructional Steel Research. 2012. no. 76. P. 13–27.
- [23] Li S., Li Q., Jiang H. et al. Experimental Study on a New Type of Assembly Bolted End-Plate Connection // Steel and Composite Structures. 2018. no. 26. P. 463–471.
- [24] Yılmaz O. Experimental Investigation of Bolted Stiffened End-Plate and Bolted Flange-Plate Connections // Latin American Journal of Solids and Structures. 2019. no. 16. P. 1–12.
- [25] Сон М.П., Конин Д.В. Фланцевые соединения балок с колоннами в стальных каркасах жилых и общественных зданий // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6(263). С. 29–35.

REFERENCES

- [1] Vedyakov I.I., Konin D.V., Olurombi A.R., Nakhvalnov P.W. Taking into account plastic deformations when calculating flange connections // Industrial and Civil Construction. 2021. no. 10. P. 9–16.
- [2] Series 1.460.3-14. Steel roof structures of industrial buildings with spans of 18, 24 and 30 m using closed bent-welded profiles of rectangular section of the "Molodechno" type. Moscow, 1988.
- [3] Series 2.440-2 Issues from 1 to 8. Assemblies of steel structures of industrial buildings of industrial enterprises. Moscow, 1989.

- [4] Guidelines for the design, manufacture and assembly of mounting flange connections for roof trusses with chords made of wide-flange I-beams. Approved by TsNIIProektstalkonstruksiya named after Melnikov, 1982.
- [5] Recommendations for the calculation, design, manufacture and installation of flange connections of building structures. Approved by the Central Research Institute of Projectstalconstruction named after Melnikov, 1988.
- [6] STO ARSS 11251254.001-018-3 manual for the design of steel structures of multi-storey buildings. Moscow, 2018.
- [7] Katyushin V.V. Buildings with a frame made of steel frames of variable section (calculation, design, construction). Moscow : Stroyizdat, 2005. P. 656.
- [8] Kudishin Yu.I., Belenya E.I., Ignatieva V.S. Metal constructions. Moscow : Academy, 2011. P. 688.
- [9] Kuznetsov V.V. Designer's Handbook. Volume 2. Steel structures of buildings and structures. Moscow : DIA, 1998. P. 512.
- [10] SP 16.13330.2017 "Steel structures. Updated edition of SNiP II-23-81* 2017.
- [11] SP 294.1325800.2017 Steel structures. Design Rules, 2017.
- [12] Joints in steel construction moment connection. London, 1997.
- [13] EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2005.
- [14] Presnyakov N.I., Kudishin Yu.I. Technical editing of the text of Eurocode EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1. General rules for buildings and structures. Moscow : TsNIIPSK named after N.P. Melnikov, 2011.
- [15] Presnyakov N.I., Kudishin Yu.I. National Annex to Eurocode EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1. General rules for buildings and structures. Moscow, 2011.
- [16] Presnyakov N.I., Kudishin Yu.I. Comparative analysis of Eurocode EN 1993-1-1:2005 "Design of steel structures. Part 1-1. General rules for buildings and structures" with Russian regulatory documents. Moscow, 2011.
- [17] EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints, 2005.
- [18] Presnyakov N.I., Vostrov E.K., Babushkin V.M. Technical editing of the text of Eurocode EN 1993-1-8:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8. Calculation of connections. Moscow : TsNIIPSK named after N.P. Melnikov, 2011.
- [19] Presnyakov N.I., Vostrov E.K., Babushkin V.M. National Annex to Eurocode EN 1993-1-8:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8. Calculation of connections. Moscow, 2011.
- [20] Presnyakov N.I., Vostrov E.K., Babushkin V.M. Comparative analysis of Eurocode EN 1993-1-8:2005 "Design of steel structures. Part 1-8. Calculation of connections" with Russian regulatory documents. Moscow, 2011.
- [21] Wang X., Luo Y., Qiang X. Review on high strength steel bolted end-plate connections // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 744-746. P. 265-273.
- [22] Abidelah A., Bouchair A., Kerdal D.E. Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners // Journal of Constructional Steel Research. 2012. Vol. 76. P. 13-27.
- [23] Li S., Li Q., Jiang H. et al. Experimental study on a new type of assembly bolted end-plate connection // Steel and Composite Structures. 2018. Vol. 26. P. 463-471.
- [24] Yılmaz O. Experimental investigation of bolted stiffened end-plate and bolted flange-plate connections // Latin American Journal of Solids and Structures. 2019. Vol. 16. P. 1-12.
- [25] Son M.P., Konin D.V. Flange connections of beams with columns in steel frames of residential and public buildings // Structural Mechanics and Calculation of Structures. 2015. no. 6(263). P. 29-35.