



РАСЧЕТ УЗЛОВ РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Андрей Николаевич Миронов¹, Дмитрий Романович Игнатенко²,
Роман Иванович Игнатенко³, Алла Павловна Бутова⁴

^{1,2,3,4}Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия,

¹a.n.myronov@donna.su, ²d.r.ignatenko@donna.su, ³r.i.ignatenko@donna.su,

⁴a.p.butova@donna.su

Аннотация. В статье рассмотрены особенности расчета легкой рамы и узловых фланцевых соединений из стальных С-образных гнутых профилей для одноэтажного промышленного здания пролетом 30 м. Определена конструктивная схема рамы, собраны постоянные и временные нагрузки, действующие на плоскую раму в процессе эксплуатации. Выполнен статический расчет плоской и пространственной рамы с уточнением действующих усилий. Определены расчетные сочетания усилий (РСУ) в характерных сечениях колонн и ригелей для двух расчетных моделей, и на основании результатов расчета подобраны соответствующие сечения конструктивных элементов. Рассмотрены существующие методики расчета жестких рамных узлов на фланцах по отечественным нормам, рекомендациям проектирования [2; 8; 9] и Еврокод 3 [3]. Выполнен расчет фланцевых соединений по отечественным методикам расчета и Еврокод 3 с использованием программы «КОМЕТА», реализованной в ПК SCAD Office. Произведено сравнение результатов расчета, в частности, толщин фланцев с учетом их работы на изгиб в упругой и пластической стадиях работы материала.

Ключевые слова: легкие стальные конструкции (ЛСТК), поперечная рама, гнутый профиль, изгибающий момент, фланцевое соединение, пластические деформации

Для цитирования: Расчет узлов рамных конструкций из гнутых профилей / А. Н. Миронов [и др.]. // Металлические конструкции. 2025. Том 31, № 2. С. 77–91. doi: 10.71536/mc.2025.v31n2.3. edn: [koozyv](#).

Original article

CALCULATION OF NODES OF FRAME STRUCTURES FROM BENT PROFILES

Andrey N. Mironov¹, Dimitriy R. Ignatenko², Roman I. Ignatenko³,
Alla N. Butova⁴

^{1,2,3,4}Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,

¹a.n.myronov@donna.su, ²d.r.ignatenko@donna.su, ³r.i.ignatenko@donna.su,

⁴a.p.butova@donna.su

Abstract. The article discusses the features of calculating a light frame and nodal flanged joints made of steel C-shaped curved profiles for a single-storey industrial building with a span of 30 m. The structural scheme of the frame is determined, permanent and temporary loads acting on the flat frame during operation are collected. A static calculation of the flat and spatial frame is performed, specifying the operating forces. The calculated combinations of forces in the characteristic sections of columns and crossbars for the two calculated models were determined, and based on the calculation results, the corresponding sections of



structural elements were selected. The existing methods for calculating rigid frame assemblies on flanges according to domestic standards, design recommendations [2; 8; 9] and Eurocode 3 [3] are considered. The flange connections were calculated using domestic calculation methods and Eurocode 3 using the COMET program implemented in the SCAD Office PC. The calculation results are compared, in particular, the thickness of the flanges, taking into account their bending performance in the elastic and plastic stages of the material.

Keywords: light steel structures (LSTC), transverse frame, bent profile, bending moment, flange connection, plastic deformations

For citation: Calculation of nodes of frame structures from bent profiles / A. N. Mironov [et al.]. *Metal Constructions*. 2025;31(2): 77–91. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2025.v31n1.4. edn: koozv.

Введение

Расчет несущих конструкций промышленных зданий из гнутых профилей имеет ряд характерных особенностей, недостаточно освещенных в современной нормативной базе РФ. Жесткость и несущая способность конструкций и их элементов должны обеспечиваться в соответствии с требованиями [2; 5], регламентирующим геометрические параметры конструкции, тип конструктивных элементов, тип и способ соединения конструктивных элементов, а также условия и характер работы конструкции в целом. Работа гнутых профилей толщиной менее 4 мм описана недостаточно полно. В то же время американский стандарт AISI [4] и ЕвроКод 3 [3] более полно учитывают особенности работы тонкостенных гнутых профилей в составе несущих конструкций промышленных зданий.

Однотипность основных элементов рам дает возможность добиться значительной унификации узлов их сопряжений. В практике строительства наиболее технологичными являются рамные узлы фланцевого типа (рис. 1), с соединением двух несущих элементов на высокопрочных болтах. Фланцевые соединения наименее трудоемки при монтаже, так как не требуют особой выверки и подгонки, а также дополнительных сварочных работ в условиях строительной площадки. Использование фланцевых соединений приводит к изготовлению рамных конструкций с высокой степенью заводской готовности. К недостаткам фланцевых соединений следует отнести их высокую точность изготовления.

Фланцевые соединения просты в конструктивном решении, но в то же время довольно сложны в расчете, так как при одновременном действии на соединение продольной силы и

изгибающего момента неизвестно положение сжатой и растянутой зоны фланца, и, следовательно, распределение изгибных деформаций по площади фланца [6].

В соответствии с рекомендациями [8], при расчете прочности высокопрочных болтов, усилие в наиболее напряженном болте, расположенным дальше всего от центра тяжести сжатого пояса элемента, можно определить из условия:

$$N_{max} = \frac{y_{max}}{k \sum_{i=1}^m n_i y_i^2} M_x, \quad (1)$$

где M_x – изгибающий момент, действующий на фланцевое соединение;

y_i – координата от i -го горизонтального ряда болтов до центра тяжести поперечного сечения элемента;

y_{max} – расстояние от наиболее удаленного горизонтального ряда болтов до центра тяжести поперечного сечения элемента.

Несущую способность рамных фланцевых узлов необходимо проверять по ряду критериев [8; 9], таких как: прочность угловых сварных швов, прикрепляющих элемент к плите фланца; наибольшие изгибные напряжения во фланцах; прочность фланца поперек проката вследствие возможного расслоения металла; прочность высокопрочных болтов на растяжение.

Требования первой группы предельных состояний по критерию прочности рамного фланцевого узла обеспечиваются, если выполняется условие:

$$N \leq n_b N_{b\ an} + \sum_{i=1}^{n_b} N_{bnj}, \quad (2)$$

где $N_{b\ an}$ – несущая способность высокопрочного болта внутренней зоны, равная усилию его предварительного натяжения,

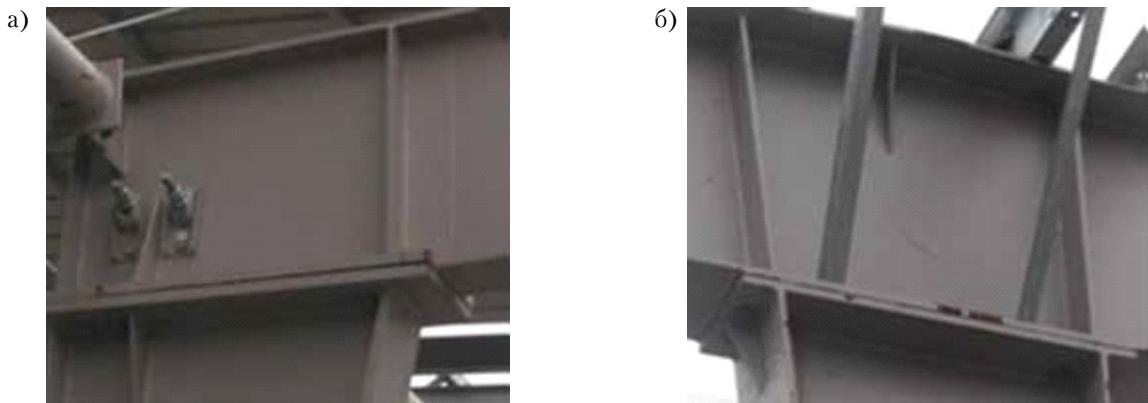


Рисунок 1 – Жесткое примыкание ригеля к колонне на фланцах: а) колонна крайнего ряда; б) колонна среднего ряда.

n_b – количество болтов внутренней зоны;
 N_{bj} – расчетное усилие, приходящееся на болт наружной зоны i -го Т-образного участка фланца.

В ЕвроКоде 3 [3] рассматриваются несколько расчетных схем фланцевых узлов, где учитывается появление пластических деформаций во фланцах при их работе на изгиб. При учете развития пластических деформаций во фланцах используются значительные резервы несущей способности рамных узлов, при этом толщина листов фланцев минимизируется. Таким образом, использование методик расчета, описанных в ЕвроКоде 3, могут быть обоснованными.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследованиями конструкций легких рам из тонкостенных и гнутых профилей занимались такие ученые, как: Г. И. Белый, В. В. Катюшин, Д. О. Советников, А. А. Азаров, С. С. Иванов, В. А. Рыбаков, А. В. Тарасов, И. В. Тарасов, И. Я. Петухова, Г. Б. Вержбовский, Д. С. Горюхова, Н. Д. Корсун и др., которые освещены в работах [6; 7; 10; 12–18]. Вопросы технологии изготовления легких рамных конструкций рассматриваются в работе [11].

Вопросы расчета фланцевых соединений на прочность рассматриваются в нормативных документах [2; 3; 4] и рекомендациях по проектированию [8; 9]. Исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) фланцевых соединений приведены в работах [7; 19; 20; 21]. В работе [19] указываются две расчетные схемы фланцевого соединения – упрощенная и уточненная

(рис. 2), которые рассматривают расчет фланца при упругой работе материала, но с завышением его толщины [7].

В работах [25; 26] рассматривается метод предельного равновесия при расчете рамных узлов с учетом развития пластических деформаций во фланцах. На рис. 3 приведены три возможные расчетные схемы потери несущей способности фланцевых узлов:

- потеря несущей способности высокопрочных болтов, вследствие их разрушения при растяжении, при этом материал фланца работает на изгиб упруго;
- разрушение высокопрочных болтов при растяжении с появлением локальных изгибных пластических деформаций во фланцах;
- развитие изгибных пластических деформаций на значительной площади фланцев [23; 24], что характерно для фланцев небольшой толщины.

Следует отметить, что локальное появление, и дальнейшее развитие пластических деформаций во фланцах рамных узлов может привести к значительному увеличению вертикальных прогибов в ригелях рам, что может оказаться на обеспечении требований второй группы предельных состояний [28; 23].

Цель статьи

Сопоставительный анализ расчета фланцевых соединений жестких узлов легких рам по отечественным методикам расчета и ЕвроКод 3, с учетом пластических деформаций материала фланцев.

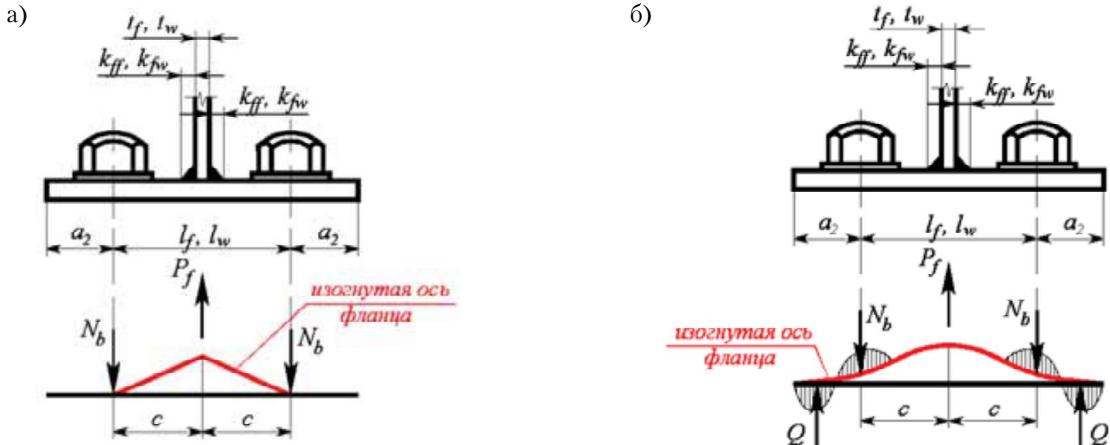


Рисунок 2 – Расчетные схемы фланцев при их работе на изгиб: а) упрощенная; б) уточненная, с учетом частичного защемления фланцев высокопрочными болтами.

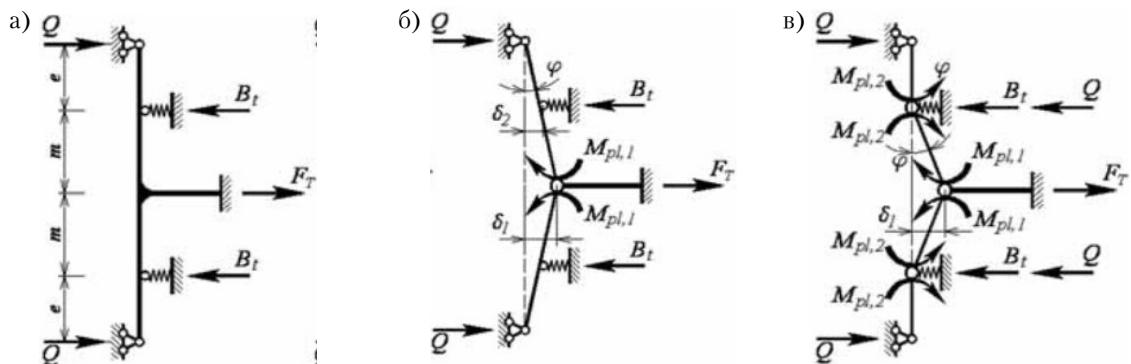


Рисунок 3 – Расчетные схемы фланцев по Еврокод 3 [3] с учетом развития пластических деформаций: а) потеря несущей способности высокопрочных болтов; б) разрушение высокопрочных болтов с появлением локальных пластических деформаций во фланцах; в) наступление предельного состояния рамного узла вследствие развития пластических деформаций на значительной площади фланцев.

Основной материал исследования

Объектом исследований является одноэтажная поперечная рама из ЛСТК пролетом $L = 30,0$ м. Рассматривается промышленное здание из ЛСТК длиной 90 м с шагом поперечных рам $b = 6,0$ м, без кранового оборудования. Колонны рам состоят из двух С-образных профилей 600×190×68,2×8 по ГОСТ 8282-2022 [22], объединенных в двутавровое сечение, постоянного по высоте. Для рамных конструкций применена марка стали С345 с расчетным сопротивлением в соответствии с [2], $R_y = 340$ МПа, ригели рам – переменного сечения, состоящие из двух С-образных профилей, объединенных в двутавровое сечение. Высота сечения ригеля на колоннах

600 мм, в коньковом узле 300 мм. Геометрия поперечного сечения С-образного профиля приведена на рис. 4 и в таблицах 1, 2. Для обеспечения пространственной жесткости и геометрической неизменяемости каркаса здания:

- колонны рам закреплены по высоте тремя горизонтальными распорками и системой вертикальных связей по колоннам в середине температурного блока/здания;
- фахверковые колонны в торцах здания закреплены системой вертикальных связей;
- покрытие здания закреплено системой горизонтальных связей и кровельных прогонов. Сопряжение колонн рам с фундаментами – жесткое, соединение колонн с ригелями жесткое на

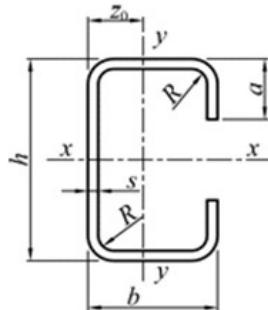


Рисунок 4 – Поперечное сечение холодногнутого С-образного профиля по ГОСТ 8282-2022 [22].

Таблица 1. Геометрические размеры гнутого С-образного профиля колонн и ригелей на опорах по [22]

Сечение	h, мм	b, мм	a, мм	s, мм	Площадь сечения, A, см ²	Момент сопротивления, W _x , см ³	Масса кг/м. п.
600×190×68,2×8	600	190	68,2	8	83,46	1 658,9	65,51

Таблица 2. Геометрические размеры гнутого С-образного профиля в коньковом узле

Сечение	h, мм	b, мм	a, мм	s, мм	Площадь сечения, A, см ²	Масса кг/м. п.
300×95×68,2×8	300	95	68,2	8	46,83	36,8

фланцах и высокопрочных болтах. Сопряжение ригелей в коньковом узле – шарнирное.

Принимались следующие геометрические и расчетные параметры рамы:

- геометрическая высота колонны $H_{\text{кол}} = 8\ 050$ мм;
- коэффициент расчетной длины колонны в плоскости рамы, в соответствии с [2]:

$$\mu = \sqrt{\frac{n+0,56}{n+0,14}} = \sqrt{\frac{0,27+0,56}{0,27+0,14}} = 1,42,$$

$$\text{где } n = \frac{I_s l_c}{I_c l_1} = \frac{109\ 490 \cdot 8,05}{109\ 490 \cdot 30,0} = 0,27;$$

- коэффициент расчетной длины колонны из плоскости рамы $\mu_y = 1,0$;
- гибкость колонны в плоскости рамы $\lambda_x = 46$;
- наибольшая гибкость колонны из плоскости рамы между двумя распорками $\lambda_y = 44$;
- предельно допустимый прогиб ригеля рамы от нормативных нагрузок по [1] [$f_{\text{max}} = 1/400$ L = 75 мм].

На модель каркаса здания прикладывались следующие нагрузки: постоянная от собственного веса металлических конструкций, веса стеново-

го и кровельного ограждения, снеговая, ветровая вдоль пролетов рам и по торцам здания. Район строительства – г. Донецк, соответствующий II-му снеговому и III-му ветровому районам РФ [1]. Сбор постоянной нагрузки приведен в таблицах 3, 4.

Значение расчетной снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия в соответствии с [1]:

$$S_0 = \gamma_f \cdot c_e \cdot c_t \cdot \mu \cdot S_g = \\ = 1,4 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,1 = 1,54 \text{ кН/м}^2.$$

Расчетная погонная снеговая нагрузка на ригель рамы:

$$q_s = S_0 \cdot b = 1,54 \cdot 6 = 9,24 \text{ кН/м.}$$

Ветровая нагрузка на элементы рамы определялась в соответствии с [1]. Расчет пульсационной составляющей ветровой нагрузки выполнялся с помощью ПК Лира–САПР 2016, расчет производится для первых 3-х форм собственных колебаний рамы. Периоды и частоты собственных

Таблица 3. Сбор постоянной нагрузки от веса покрытия

№ п/п	Наименование нагрузки	Нормативная нагрузка, g_n кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке, γ_f	Расчетная нагрузка, g_p кН/м ²
1	Кровельное ограждение	0,27	1,2	0,324
2	Прогоны	0,15	1,05	0,158
3	Система связей	0,08	1,05	0,084
Итого:		0,5	—	0,566
Погонная расчетная нагрузка на ригель рамы, $q_p = g_p \cdot b = 0,566 \cdot 6,0 = 3,40$ кН/м				

Таблица 4. Сбор постоянной нагрузки от веса стенового ограждения

№ п/п	Наименование нагрузки	Нормативная нагрузка, g_n кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке, γ_f	Расчетная нагрузка, g_p кН/м ²
1	Стеновая сэндвич-панель	0,21	1,2	0,252
2	Ветровые балки	0,15	1,05	0,158
Итого:		0,36	—	0,410
Погонная расчетная нагрузка на колонны рамы: $q_p = g_p \cdot b = 0,41 \cdot 6,0 = 2,46$ кН/м;		Погонный момент на колонны рамы: $M_{ct} = 2,46 \cdot (0,2 + 0,05) = 0,62$ кН · м/1 м. п.		

колебаний рамы по первым трем формам приведены в **таблице 5**.

$$f_{lim} = \frac{\sqrt{w_0 k(z_{ek}) \gamma_f}}{940 T_{g,lim}} = \frac{\sqrt{380 \cdot 0,65 \cdot 1,4}}{940 \cdot 0,023} = 0,86 \text{ Гц} > f_2 = 0,29 \text{ Гц}.$$

Так как вторая собственная частота колебаний рамы меньше предельной, производился динамический расчет рамы на пульсации ветра с учетом 3-х первых форм собственных колебаний.

Статический расчет рамы выполнялся с использованием ПК Лира-САПР 2016 в два этапа. На первом этапе была построена и рассчитана плоская рама с переменной изгибной и осевой жесткостью ригеля. На втором этапе была построена пространственная стержневая модель здания (рис. 5), составленная из элементов несущих рам, колонн торцового фахверка, кровельных прогонов и связевых элементов, что позволило уточнить значения расчетных усилий в ригеле и колоннах рамы. Расчет выполнялся при упругой работе материала по недеформированной схеме (без учета геометрической нелинейности).

Как видно из результатов расчета рамы по двум моделям, наибольшее отклонение составило $\Delta = 15,2\%$ по продольной силе. Ветровая нагрузка в РСУ не входила вследствие ее разгружающего эффекта.

Проверка несущей способности колонны рамы в плоскости действия изгибающего момента приведена в таблице 7, а из плоскости действия изгибающего момента в таблице 8.

Как видно из таблиц 7, 8 минимальный запас несущей способности колонны рамы составляет в плоскости действия изгибающего момента $\Delta = 6,6\%$. Поперечные сечения элементов рамы, принятые при расчете плоской рамы, остались неизменными после перерасчета с уточненными усилиями по пространственной схеме.

Наибольший статический прогиб ригеля рамы от суммы нормативных постоянной и снеговой нагрузок составил $f_{max} = 69,7$ мм, что не превышает предельно допустимого прогиба [$f_{max} = 75$ мм].

Таким образом, требования первой и второй групп предельных состояний для несущей поперечной рамы выполняются.

Расчет фланцевых узлов по отечественным методикам расчета [8; 9] и Еврокод 3 [3] выполнялся

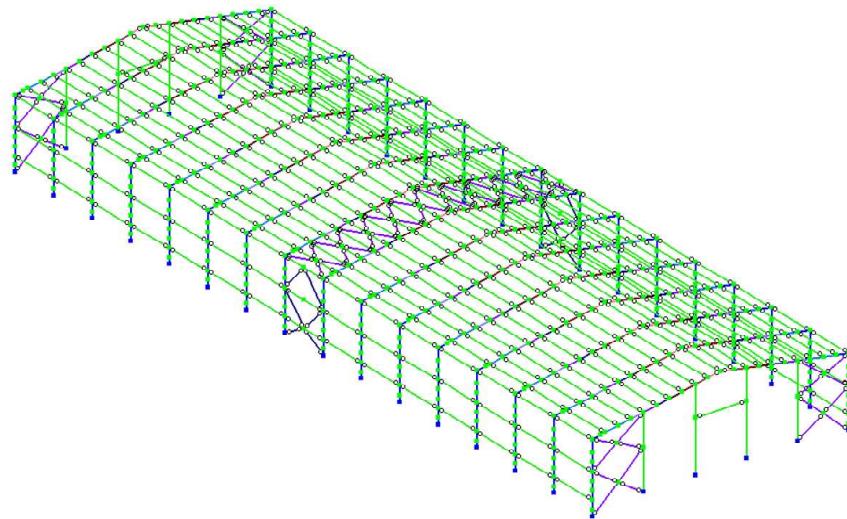


Рисунок 5 – Пространственная стержневая модель каркаса здания в ПК Лира–САПР 2016. Расчетные сочетания усилий (РСУ) в наиболее напряженном рамном узле по двум расчетным моделям приведены в **таблице 6**.

Таблица 5. Периоды и частоты собственных колебаний по первым 3-м формам

Частоты				
№ формы	Собственные значения	Круговая частота (рад/с)	Частота (Гц)	Период колебаний Т, (с)
1	0,995	1,005	0,160	6,252
2	0,547	1,827	0,291	3,439
3	0,048	20,638	3,285	0,304

Таблица 6. РСУ в жестком (рамном) узле примыкания ригеля к колонне

№ п/п	Расчетная модель	РСУ			Нагрузки, вошедшие в РСУ
		Изгибающий момент, M, кН·м	Продольная сила, N, кН	Поперечная сила, Q, кН	
1.	Плоская рама	923,4	-250,1	218,7	Постоянная, снеговая
2.	Пространственная рама	995,0	-295,0	238,0	Постоянная, снеговая
Отклонение, Δ, %		7,2	15,2	8,1	–

Таблица 7. Проверка несущей способности колонны рамы в плоскости действия изгибающего момента

Продольная сила, N, кН	Изгиб. момент, M, кН·м	Площадь сечения, A, см ²	Момент сопротивл. W _x , см ³	Гибкость, λ _x	Условн. гибкость, λ _x	Привед. относит. эксцентр. m _{ef}	Расч. напряжения, σ _{max} , МПа	Расч. сопротивл. R _y ·γ _u /γ _n , МПа
-295,0	995,0	166,92	3 318	46	1,87	21,2 > 20	317,6	340

Таблица 8. Проверка несущей способности колонны рамы из плоскости действия изгибающего момента

Про- доль- ная сила, N, кН	Изгиб. момент, M, кН·м	Пло- щадь сечения, A, см ²	Гиб- кость, λ_y	Усл. гиб- кость, $\bar{\lambda}_y$	Относит. эксцентр. m _x	Коэф- фици- ент, c	Коэфф. прод. изгиба, ϕ_y	Расч. напря- жения, σ_{max} , МПа	Расч. сопрот. $R_y \gamma / \gamma_n$, МПа
-295,0	497,5	166,92	44	1,79	8,48	0,093	0,780	243,6	340

с использованием программы «КОМЕТА», реализованной в ПК SCAD Office, на максимальные РСУ в рамном узле, взятые из пространственной расчетной модели (таблица 6).

При моделировании фланцевого узла в программе «КОМЕТА» был выполнен переход от реального сечения из двух гнутых профилей к эквивалентному сечению в виде сварного составного двутавра из листовой стали по моменту сопротивления в плоскости действия рамного изгибающего момента. Габариты сечения по высоте и ширине сечения, а также толщина стенки двутавра назначались идентичными сечению из гнутых профилей: $h \times b_f \times t_w = 600 \times 380 \times 16$ мм, при этом:

– требуемый момент инерции сечения составного двутавра:

$$I_x^{\text{экв}} = \frac{W_x \cdot h}{2} = \frac{3318 \cdot 60}{2} = 99540 \text{ см}^3;$$

– минимальная толщина полок двутавра принята равной $t_f = 11$ мм, что соответствует моменту инерции эквивалентного сварного двутавра $I_x^{\text{экв}} = 98262 \text{ см}^4$, а площадь поперечного сечения $A_{\text{экв}} = 176,1 \text{ см}^2$.

При этом, отклонение в моменте инерции и моменте сопротивления от реального сечения составляет $\Delta = 1,3\%$, а площади сечения $\Delta = 5,5\%$.

Эквивалентное поперечное сечение в виде сварного составного двутавра приведено на рис. 6.

Результаты расчета фланцевого узла по отечественным методикам расчета [8; 9] приведено в таблицах 9, 10 и на рис. 7. Узел не подкреплялся ребрами жесткости.

Как видно из таблицы 9, в конструкции рамного узла применены фланцы толщиной 40 мм из стали С345, при двухрядном расположении высокопрочных болтов М27 из стали 40Х «Селект». Расчет узла показывает запас несущей способности фланцев при их работе на изгиб в упругой стадии $\Delta = 26,8\%$, при этом, минималь-

ный запас несущей способности рамного узла отмечается по прочности высокопрочных болтов, расположенных в области стенки двутавра $\Delta = 0,5\%$.

Результаты расчета фланцевого узла по Европод 3 [3] приведены в таблице 11. Исходные геометрические параметры для расчета узла остаются неизменными, в соответствии с таблицей 9, за исключением расстояния между двумя рядами высокопрочных болтов ($S = 150$ мм). По результатам расчета с учетом методики [3], толщина фланцев уменьшилась до 32 мм (на 20 % по сравнению с первоначальной толщиной), а усилия в высокопрочных болтах в зоне стенки двутавра уменьшились на 9,4 %, что говорит о пластической работе фланцев на изгиб и перераспределении усилий. Расчет узла показывает запас несущей способности фланцев на изгиб ($t = 32$ мм) в 20,4 %.

Выводы

1. Расчет фланцевых соединений жестких рамных узлов по Европод 3 приводит к уменьшению толщины фланцев не менее чем на 20 % по сравнению с отечественными методиками расчета, учитывающими упругую работу материала.
2. Учет пластической работы фланцев приводит к снижению усилий в высокопрочных болтах на 9,4 % в зоне стенки двутаврового профиля и увеличивает усилия на 2,9 % в зонах полок при одинаковом конструктивном решении узла.
3. Несущая способность фланцев на изгиб при упругой работе обеспечивается с запасом 26,8 %, а с меньшей толщиной при пластической работе материала с запасом в 20,4 %. Запасы несущей способности фланцев обусловлены прочностью высокопрочных болтов соединения, которые могут потерять несущую

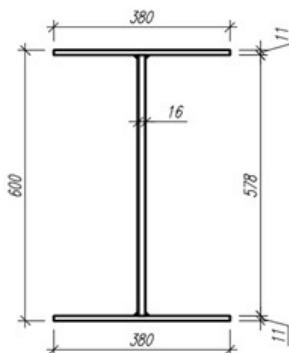


Рисунок 6 – Эквивалентное поперечное сечение ригеля рамы в зоне примыкания к колоннам, для расчета фланцевого узла.

Таблица 9. Исходные данные для проектирования фланцевого узла в программе «КОМЕТА»

Конструктивное решение фланцевого узла	Исходные данные для проектирования:
	<p>Болты высокопрочные М27 из стали 40Х «Селект», чернота 1.0. Регулирование: по моменту закручивания <u>Геометрические параметры узла:</u> $C = 55 \text{ мм};$ $S = 200 \text{ мм};$ $C_1 = 40 \text{ мм};$ $C_2 = 40 \text{ мм};$ $b_p = 400 \text{ мм};$ $t_p = 40 \text{ мм};$ катеты сварных швов $k_{ff} = k_{FW} = 12 \text{ мм};$ кол-во болтов в одном ряду по стенке двутавра $n = 8.$</p>

Таблица 10. Проверка несущей способности фланцевого узла в программе «КОМЕТА» по отечественным методикам расчета [8; 9]

Критерий несущей способности	Коэффициент несущей способности
Прочность высокопрочных болтов на растяжение в зоне верхней полки двутавра.	0,958
Прочность высокопрочных болтов на растяжение в зоне стенки двутавра	0,995
Прочность фланца по нормальным изгибным напряжениям	0,732
Прочность болтового соединения на срез и смятие от действия поперечной силы	0,018
РСУ (по пространственной расчетной модели): – изгибающий момент $M = 99,5 \text{ Тс}\cdot\text{м};$ – продольная сила $N = 29,5 \text{ Тс};$ – поперечная сила $Q = 23,8 \text{ Тс}.$	

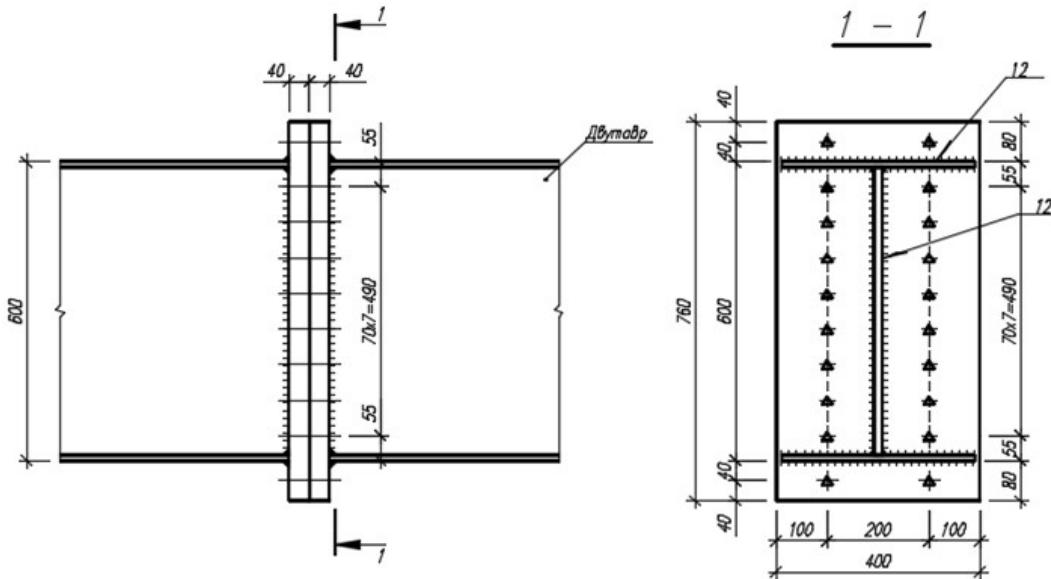


Рисунок 7 – Конструктивное решение рамного фланцевого узла по отечественным методикам расчета [8; 9]. Узел повернут на 90°.

Таблица 11. Проверка несущей способности фланцевого узла по методике Еврокод 3 [3]

Критерий несущей способности	Коэффициент несущей способности
Прочность высокопрочных болтов на растяжение в зоне верхней полки двутавра.	0,987
Прочность высокопрочных болтов на растяжение в зоне стенки двутавра	0,901
Прочность фланца по нормальным изгибным напряжениям	0,796
Прочность болтового соединения на срез и смятие от действия поперечной силы	0,018

способность от растяжения раньше самих фланцев.

4. В целом, учет пластической работы материала фланцев при изгибе может снизить метал-

лоемкость рамных конструкций, но в то же время привести к повышению общей деформативности системы, что необходимо учитывать при общем расчете.

Список источников

1. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия (с Изменениями № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6). Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. 2025. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 15.04.2025).
2. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции (с Изменениями № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6). Актуализированная редакция СНиП II-23-81*

References

1. Electronic fund of legal and regulatory documents (2016), *SP 20.13330.2016: Nagruzki i vozdejstviya* [SP 20.13330.2016: Loads and actions], available at: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (Accessed 15 April 2025).
2. Electronic fund of legal and regulatory documents (2017), *SP 16.13330.2017: Stal'nye konstrukcii* [SP 16.13330.2017: Steel structures], available at: <https://docs.cntd.ru/document/456069588> (Accessed 15 April 2025).

- [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. 2025. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069588> (дата обращения: 15.04.2025).
3. EN 1993-1-3:2004. Eurocode 3 - Design of steel structures. Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Stage 34. Brussels: CEN, 2004. 125 р.
 4. Roger L. B., Helen H. C. North American Specification for Design of Cold-Formed Steel // Sixteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (Orlando, Florida, 17-18 October 2002). Orlando, 2002. P. 632-637.
 5. СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов (с Изменениями № 1, № 2) [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. 2025. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456033922> (дата обращения: 15.04.2025).
 6. Катюшин В. В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения. М.: Стройиздат, 2005. 450 с.
 7. Алпатов В. Ю., Соловьев А. В., Холопов И. С. К вопросу расчета фланцевых соединений на прочность при знакопеременной эпюре напряжений // Промышленное и гражданское строительство. 2009. N 2. С. 26-30. URL: <https://elibrary.ru/jxaitz> (дата обращения: 15.04.2025). ISSN 0869-7019. EDN JXAIZT.
 8. Рекомендации по расчету, проектированию, изготавлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций / Министерство монтажных и специальных строительных работ СССР СО Стальмонтаж. М.: Центральное бюро научно-технической информации, 1989. 51 с.
 9. Руководство по проектированию, изготавлению и сборке монтажных фланцевых соединений стропильных ферм с поясами из широкополочных двутавров / Госстрой СССР Ордена Трудового Красного Знамени Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций. М.: Изд-во ЦНИИ-проектстальконструкции, 1982. 57 с.
 10. Методы расчета тонкостенных стержней: статика, динамика, устойчивость / Д. О. Советников и [др.] // Alfabuild. 2018. N 2 (4). С. 29-33. URL: https://alfabuild.spbstu.ru/userfiles/files/AlfaBuild/AlfaBuild_2018_4/1_4.pdf (дата обращения: 15.04.2025).
 11. Альхименко А. И., Ватин Н. И., Рыбаков В. А. Технология легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК): монография. Санкт-Петербург: Изд-во СПбОДЗПП, 2008. 27 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19629172> (дата обращения: 15.04.2025). EDN QNOEJN.
 12. Тарасов А. В., Тарасов И. В., Петухова И. Я. Рамная конструкция с несущими элементами нового типа сечения из тонколистовой оцинкованной стали // Международный научно-исследовательский
 3. European Standard (2004), EN 1993-1-3:2004: *Eurocode 3 - Design of steel structures. Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Stage 34*. CEN, Brussels, BE.
 4. Roger, L.B. and Helen, H.C. (2002), "North American Specification for Design of Cold-Formed Steel", *Sixteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Orlando, Florida, 17-18 October 2002, pp. 632-637.
 5. Electronic fund of legal and regulatory documents (2016), SP 260.1325800.2016: *Konstrukcii stal'nye tonkostennye iz holodnognutyh ocinkovannyh profilej i gofrirovannyh listov* [SP 260.1325800.2016: Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized profiles and corrugated sheets], available at: <https://docs.cntd.ru/document/456033922> (Accessed 15 April 2025).
 6. Katyushin, V.V. (2005), *Zdaniya s karkasami iz stal'nyh ram peremennogo secheniya* [Buildings with variable section steel frame frames]: Stroyizdat, Moscow, Russia.
 7. Alpatov, V.Yu., Soloviev, A.V. and Kholopov, I.S. (2009), "On the Issue of Calculating the Strength of Flange Connections with an Alternating Stress Diagram", *Industrial and Civil Engineering*, no. 2, pp. 26-30, available at: <https://elibrary.ru/jxaitz> (Accessed 15 April 2025). ISSN 0869-7019. EDN JXAIZT.
 8. Ministry of Assembly and Specialized Construction Works of the USSR SO Stalmontazh (1989), *Rekomendacii po raschetu, proektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu flancevyh soedinenij stal'nyh stroitel'nyh konstrukcij* [Recommendations for calculation, design, manufacture and installation of flange joints of steel building structures]: Central Bureau of Scientific and Technical Information, Moscow, Russia.
 9. Gosstroy of the USSR Order of the Red Banner of Labor Central Research and Design Institute of Building Metal Structures (1982), *Rukovodstvo po proektirovaniyu, izgotovleniyu i sborke montazhnyh flancevyh soedinenij stropil'nyh ferm s pojasami iz shirokopolochnyh dvutavrov* [Recommendations for calculation, design, manufacture and installation of flange joints of steel building structures]: Central Bureau of Scientific and Technical Information, Moscow, Russia.
 10. Sovietnikov, D.O., Azarov, A.A., Ivanov, S.S. and Rybakov, V.A. (2018), "Methods of Calculation of Thin-Walled Bars: Statics, Dynamics and Stability", *Alfabuild*, no. 2(4), pp. 7-33, available at: https://alfabuild.spbstu.ru/userfiles/files/AlfaBuild/AlfaBuild_2018_4/1_4.pdf (Accessed 15 April 2025).
 11. Al'khimenko, A.I., Vatin, N.I. and Rybakov, V.A. (2008), *Tekhnologiya legkih stal'nyh tonkostennyh konstrukcij (LSTK)* [Technology of Light Steel Thin-Walled Structures (LSTC)]: monograph, Publishing House of St. Petersburg Regional Department of the Ministry of Culture of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19629172> (Accessed 15 April 2025). EDN QNOEJN.

- журнал. 2015. N 11-4 (42). С. 131-134. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25076644> (дата обращения: 15.04.2025). ISSN 2303-9868. EDN VCTOHВ.
13. Вержбовский Г. Б., Горохова Д. С. Рамные конструкции из легких стальных тонкостенных профилей // Актуальные процессы формирования науки в новых условиях: сб. статей Междунар. науч.-практич. конф. (Москва, 10 марта 2016 г.). М.: Российский государственный социальный университет, 2016. С. 23-25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25617408> (дата обращения: 15.04.2025). EDN VOPFTF.
14. Корсун Н. Д. Проблемы проектирования рамных конструкций из ЛСТК // Инвестиции, строительство и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: материалы Пятой Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием (Тюмень, 10-13 марта 2015 г.). Тюмень: Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. С. 301-307. URL: <https://www.elibra-ry.ru/item.asp?edn=tnngwv> (дата обращения: 15.04.2025). EDN TNNGWV.
15. Рыбаков В. А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. 207 с.
16. Рыбаков В. А. Методы решения научно-технических задач в строительстве. Численные методы расчета тонкостенных стержней: учеб. пособие. Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 167 с.
17. Белый Г. И. Методы расчета стержневых элементов конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2014. N 4 (45). С. 32-37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21968238> (дата обращения: 15.04.2025). ISSN 1999-5571. EDN SMSZYH.
18. Горохова Д. С., Вержбовский Г. Б. Особенности расчетов легких стальных тонкостенных элементов по нормативным документам различных стран // Строительство и архитектура-2015: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Ростов-на-Дону, 26-27 ноября 2015 г.). Ростов-на-Дону: Ростовский государственный строительный университет, 2015. С. 336-337. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24820375> (дата обращения: 15.04.2025). EDN SUVOUG.
19. Перельмутер А. В., Криксунов Э. З., Юрченко В. В. Расчетные модели фланцевых соединений рамных узлов металлических конструкций и их программная реализация в SCAD Office // Бюллетень Строительной Техники. 2010. N 1(905). С. 56-59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=2-1356285> (дата обращения: 15.04.2025). ISSN 0007-7690. EDN RZIVJT.
20. Бирюлев В. В., Катюшин В. В. Проектирование фланцевых соединений с учетом развития пластических деформаций // Болтовые и специальные монтажные соединения в стальных строительных конструкциях: Междунар. коллоквиум
12. Tarasov, A.V., Tarasov, I.V. and Petukhova, I.Ya. (2015), "Frame Structure with Load-Bearing Elements of a New Type of Section Made of Thin-Sheet Galvanised Steel", *International Scientific Research Journal*, no. 11-4 (42), pp. 131-134, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25076644> (Accessed 15 April 2025). ISSN 2303-9868. EDN VCTOHВ.
13. Verzhbovsky, G.B. and Gorokhova, D.S. (2016), "Frame Structures Made of Light Thin-Walled Steel Profiles", *sb. statej Vseros. nauch.-texnich. konf.* [collection of articles of the International scientific-practical conference], *Aktual'nye processy formirovaniya nauki v novyh usloviyah* [Relevant processes of science formation in new conditions], Moscow, Russia, 10 March 2016, pp. 23-25., available at: <https://www.elibra-ry.ru/item.asp?id=25617408> (Accessed 15 April 2025). EDN VOPFTF.
14. Korsun, N.D. (2015), "Problems of Designing Frame Structures from LSTC", materials of the Fifth All-Russian scientific-practical conf. with international participation [collection of articles of the 5th All-Russian Scientific and Technical Conference]: *Aktual'nye processy formirovaniya nauki v novyh usloviyah* [Actual processes of science formation in new conditions], Tyumen, Russia, 10-13 March 2015, pp. 301-307, available at: <https://www.elibra-ry.ru/item.asp?edn=tnngwv> (Accessed 15 April 2025). EDN TNNGWV.
15. Rybakov, V.A. (2011), *Osnovy stroitel'noj mehaniki legkih stal'nyh tonkostenniyh konstrukcij* [Fundamentals of structural mechanics of light steel thin-walled structures]: teaching aid, Publishing House of the Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.
16. Rybakov, V.A. (2013), *Metody resheniya nauchno-tehnicheskikh zadach v stroitel'stve. Chislennye metody rascheta tonkostenniyh sterzhnej* [Methods for solving scientific and technical problems in construction. Numerical methods for calculating thin-walled rods]: teaching aid, Publishing House of the Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.
17. Bely, G.I. (2014), "Methods of Calculation of Rod Elements of Structures from Thin-Walled Cold-Bent Profiles", *Bulletin of Civil Engineers*, no. 4 (45), pp. 32-37, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21968238> (Accessed 15 April 2025). ISSN 1999-5571. EDN SMSZYH.
18. Gorokhova, D.S. and Verzhbovsky, G.B. (2015), "Features of Calculations of Light Steel Thin-Walled Elements According to Regulatory Documents of Various Countries", *sb. statej Vseros. nauch.-texnich. konf.* [collection of articles of the All-Russian Scientific and Technical Conference], *Stroitel'stvo i arhitektura-2015* [Construction and Architecture-2015], Moscow, Russia, 26-27 November 2015, pp. 336-337, available at: <https://www.elibra-ry.ru/item.asp?id=24820375> (Accessed 15 April 2025). EDN SUVOUG.
19. Perelmuter, A.V., Kriksunov, E.Z. and Yurchenko, V.V. (2010), "Calculation Models of Flange Connections of Frame Units of Metal Structures and their Software Implementation in SCAD Office", *Bulletin of*

- (Москва, 15-20 мая 1989 г.). М.: ВНИПИ "Промстальконструкция", 1989. С. 32-36.
21. Каленов В. В., Глауберман В. Б. Исследования Т-образных фланцевых соединений на моделях из оптически активного материала // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1985. N 9. С. 14-17.
 22. ГОСТ 8282-2022. Профили стальные гнутые С-образные равнополочные. Сортамент. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 7 с.
 23. Design of End Plate Joints Subject to Moment and Normal Force / Z. Sokol [et al.]. // Eurosteel Coimbra. 2002. P. 1219-1228.
 24. Sumner E. A., Murray T. M. Behaviour and Design of Multi-Row Extended end Plate Moment Connections // Proceedings of International Conference Advances in Structures (ASCCA'03) (Sydney, Australia, 2003). Sydney, 2003. P. 65-69.
 25. Undermann D., Schmidt B. Moment Resistance of Bolted Beam to Column Connections with Four Bolts in Each Row // Proceedings of IV European Conference on Steel and Composite Structures "Eurosteel 2005". (Maastricht, Netherlands 2005.). Maastricht, 2005. P. 150-153.
 26. Urbonas K., Daniunas A. Behaviour of Steel Beam to Beam Connections Under Bending and Axial Force // Proceedings of 8th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques" (Vilnius, Lithuania, 19-21 May 2004). Vilnius, 2004. P. 650-653.
 27. Jaspart J. P. General Report: Session on Connections // Journal of Constructional Steel Research. 2000. Vol. 55, issue 1-3. P. 69-89. DOI 10.1016/S0143-974X(99)00078-4.
 28. Pisarek Z., Kozłowski A. End-Plate Steel Joint with Four Bolts in the Row // XI-th International Conference on Metal Structures (ICMS-2006) (Rzeszów, Poland, June 2006). Rzeszów, 2006. P. 257-266.
- Construction Equipment*, no. 1(905), pp. 56-59, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21356285> (Accessed 15 April 2025). ISSN 0007-7690. EDN RZIVJT.
20. Biryulev, V.V. and Katyushin, V.V. (1989), "Design of Flange Connections Taking Into Account the Development of Plastic Deformations", *sb. nauchny'x tr. po mater. International Colloquium*. [collection of scientific papers on materials of the International Colloquium], *Proektirovaniye flancevih soedinenij s uchetom razvitiya plasticheskikh deformacij* [Design of flange connections taking into account the development of plastic deformations], Moscow, Russia, 15-20 May 1989, pp. 32-36.
 21. Kalenov, V.V. and Glauberman, V.B. (1985), "Research of T-Shaped Flange Joints on Models Made of Optically Active Material", *News of Universities. Construction and Architecture*, no. 9, pp. 14-17.
 22. Interstate Council For Standardization, Metrology and Certificationgost (2022), *GOST 8282-2022: Profili stal'nye gnutye S-obraznye ravnopolochchnye. Sortament* [GOST 8282-2022: Steel bent profiles C-shaped equal-flange. Assortment], Russian Institute of Standardization, Moscow, Russia.
 23. Sokol, Z., Wald, F., Delabre, V., Muzeau, J. P. and Svarc, M. (2002), "Design of End Plate Joints Subject to Moment and Normal Force", *Eurosteel Coimbra*, pp. 1219-1228.
 24. Sumner, E.A. and Murray, T.M. (2003), "Behaviour and Design of Multi-Row Extended end Plate Moment Connections", *Proceedings of International Conference Advances in Structures (ASCCA'03)*, Sydney, Australia, 2003, pp. 65-69.
 25. Undermann, D. and Schmidt, B. (2005), "Moment Resistance of Bolted Beam to Column Connections with Four Bolts in Each Row", *Proceedings of IV European Conference on Steel and Composite Structures "Eurosteel 2005"*, Maastricht, Netherlands, 2005, pp. 150-153.
 26. Urbonas, K. and Daniunas, A. (2004), "Behaviour of Steel Beam to Beam Connections Under Bending and Axial Force", *Proceedings of 8th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques"*, Vilnius, Lithuania, 19-21 May 2004, pp. 650-653.
 27. Jaspart, J.P. (2000), "General Report: Session on Connections", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 55, issue 1-3, pp. 69-89. DOI 10.1016/S0143-974X(99)00078-4.
 28. Pisarek, Z. and Kozłowski, A. (2006), "End-Plate Steel Joint with Four Bolts in the Row", *XI-th International Conference on Metal Structures (ICMS-2006)*, Rzeszów, Poland, June 2006, pp. 257-266.

Информация об авторах

Миронов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: усталостная прочность металлических конструкций, концентрация напряжений в узлах ферм с применением широкополочных двутавров и гнутосварных замкнутых профилей, напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций в том числе трубобетонных конструкций.

Игнатенко Дмитрий Романович – магистрант кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: напряженно-деформированное состояние узловых соединений легких рамных конструкций.

Игнатенко Роман Иванович – старший преподаватель кафедры технологии и организации строительства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: технология и организация монтажа металлических конструкций.

Бутова Алла Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования зданий и строительной физики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: развитие методик оценки ветровых воздействий на здания, сооружения и их комплексы, совершенствование методик моделирования пограничного слоя атмосферы, натурных и модельных испытаний зданий и сооружений на ветровое давление.

Information about the authors

Mironov Andrey N. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Constructions and Structures of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fatigue strength of metal structures, concentration of stresses in the nodes of trusses with the use of wide-band I-bars and gnutosvarnyh closed profiles, stress-strain state of steel reinforced concrete structures including pipe-concrete structures.

Ignatenko Dimitriy R. – master's student of Metal Constructions and Structures Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: stress-strain state of nodal joints of light frame structures.

Ignatenko Roman I. – Senior Lecture of the Technology and Organization of Construction Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: technology and organization of installation of metal structures.

Butova Alla P. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department Building Design and Construction Physics of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: development of methods for assessing wind impact on buildings, structures and their complexes, improvement of methods for modeling the atmospheric boundary layer, full-scale and model tests of buildings and structures for wind load.

Вклад авторов:

Миронов А. Н. – научное руководство; постановка целей и задач исследований; расчет фланцевого соединения; итоговые выводы по результатам исследований; доработка текста.

Игнатенко Д. Р. – расчет плоской и пространственной рамы; определение РСУ; расчет фланцевого соединения; итоговые выводы по результатам исследований.

Игнатенко Р. И. – анализ последних исследований и публикаций в области ЛСТК; патентный поиск; в том числе из тонкостенных профилей.

Бутова А. П. – обработка и сравнение результатов расчета; написание текста; создание и редактирование рисунков.

Contribution of the authors:

Mironov A. N. – scientific guidance; setting research goals and objectives; calculation of the flange connection; final conclusions based on research results; revision of the text.

Ignatenko D. R. – calculation of the flat and spatial frame; determination of the DCS; calculation of the flange connection; final conclusions based on the research results.

Ignatenko R. I. – analysis of the latest research and publications in the field of LSTC; patent search; including thin-walled profiles.

Butova A. P. – processing and comparing calculation results; writing text; creating and editing drawings.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.04.2025; одобрена после рецензирования 16.05.2025; принята к публикации 23.05.2025.

The article was submitted 23.04.2025; approved after reviewing 16.05.2025; accepted for publication 23.05.2025.