

Численный анализ соединений элементов стальных конструкций

А.А. Бунов, Д.В. Зенкин

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет

Аннотация: Отмечена практическая значимость, связанная с разработкой автоматизированных программных комплексов по расчету узлов соединения стальных конструкций зданий и сооружений. На примере программного комплекса *IDEA Statica* выполнен расчет и анализ работы стального узла «сопряжение нижнего пояса фермы с колонной». Показан порядок и последовательность ввода исходных данных для расчета узла. В результатах расчетах в табличной и графической формах представлены эквивалентные напряжения и пластические деформации основных элементов, а также результаты проверок по болтовым и сварным соединениям этих элементов между собой. Выполнен сравнительный анализ численного и аналитического расчетов. Сформулированы выводы по представленным в статье результатам.

Ключевые слова: расчетная модель, узлы, стальные конструкции, компонентный метод конечных элементов, проектирование, нелинейный расчет, анализ работы, напряжения, пластические деформации, болтовое соединение, сварное соединение.

При проектировании здания и сооружений необходимо обеспечивать несущую способность, как отдельных элементов здания, так и узлов их сопряжения [1, 2]. Процесс разработки узлов сопряжения элементов между собой, в некоторых случаях, требует гораздо большего времени, чем разработка общей расчетной конечно-элементной модели, именно поэтому процессы автоматизации данной стадии проектирования имеют большую значимость [3]. Также стоит отметить, что в ряде случаев при проектировании сложных узлов даже с использованием типовых решений, мы можем не учесть действительную работу узла в целом. Это может привести к непрогнозируемому перераспределению усилий и отказу составных элементов узла.

В настоящее время развитие программных комплексов в области моделирования и расчета конструкций зданий и сооружений привело к комплексному решению вопросов анализа работы проектируемой конструкции [4-6]. Одним из способов подтверждения несущей способности узлов, в том числе сложных, является их расчет с помощью метода конечных

элементов в нелинейной постановке [7, 8]. Для оперативного объемного моделирования и анализа работы узлов воспользуемся программным комплексом *IDEA Statica*.

Выполним расчет и анализ работы одного из узлов соединений конструкций двухэтажного промышленного здания с кранами, а именно сопряжение нижнего пояса фермы с колонной. Общий вид участка здания и рассматриваемая расчетная зона представлена на рис. 1.

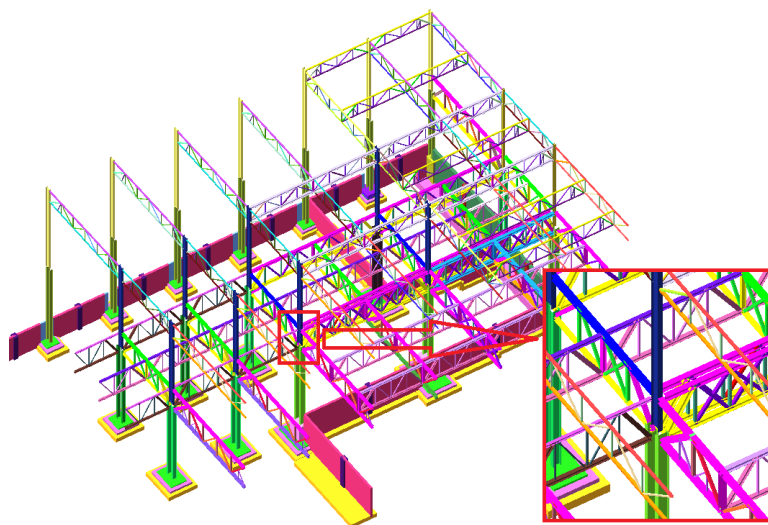


Рис. 1. – Расчетная модель промышленного здания

Принципиальная схема узла в двух проекциях представлена на рис. 2.

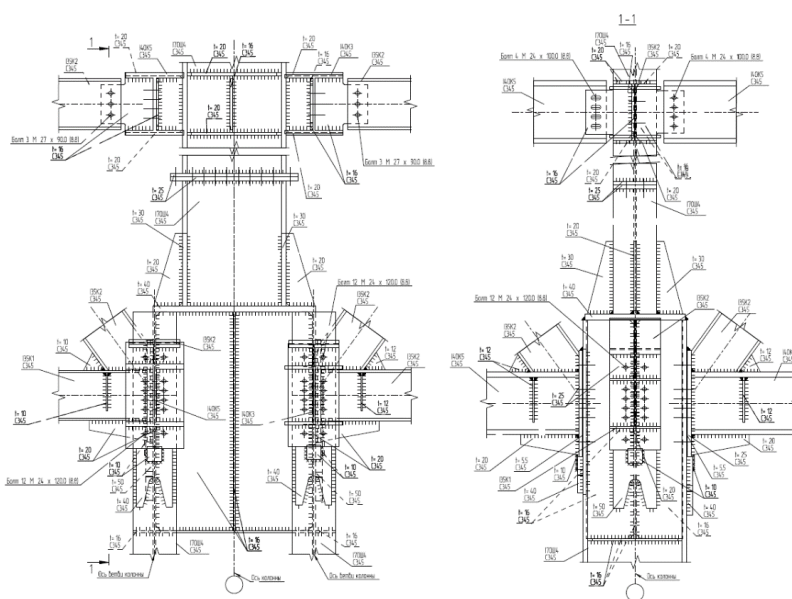


Рис. 2. – Узел сопряжения фермы с колонной

Как видно из рисунков, данный узел не относится к разряду типовых. В этом случае необходимо выполнять расчеты болтового срезного и фланцевого соединений, сварных соединений.

Выполним моделирование данного узла с помощью программного комплекса *IDEA Statica 21*. Данный комплекс реализует компонентный метод конечных элементов – КМКЭ (*Component Based Finite Element Method, CBFEM*) [9].

Конвертируем узел в *IDEA Statica* из объемной модели, созданной в *Tekla Structures*, а далее дорабатываем в самой программе до реального проектного решения (рис. 3). Использование смежных программ требуется при проектировании сложных узлов. Типовые (шаблонные) узлы могут быть решены средствами самой программы.

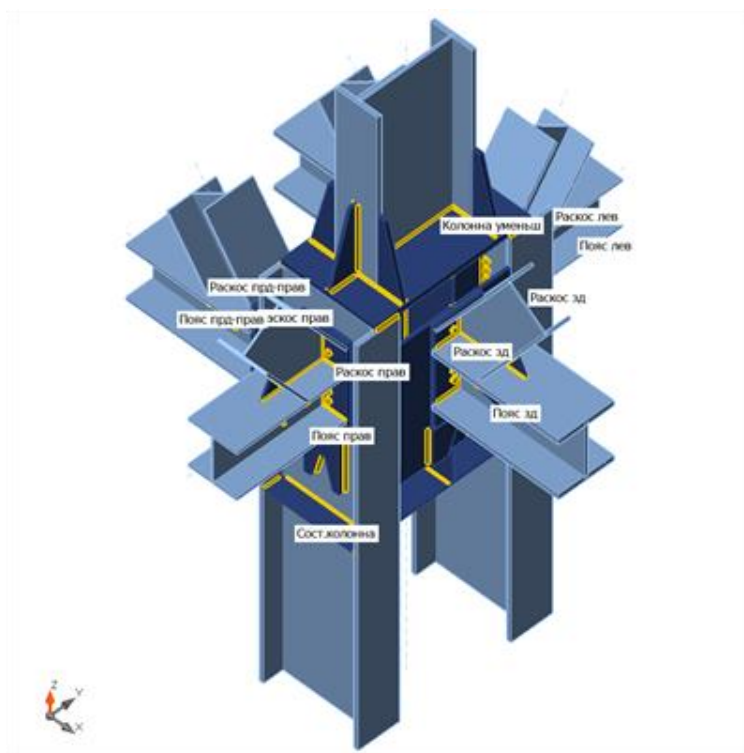


Рис. 3. – Общий вид узла в *IDEAStatica*

Для выполнения расчетов в дополнении к сечениям (табл. 1) назначим классы стали для элементов стальных конструкций (табл. 2), диаметры болтов (табл. 3) и характеристики сварных соединений.

Таблица № 1

Сечения элементов узла

Имя	Сечение	Имя	Сечение
Сост. колонна	14 – 2I(70Ш4)	Раскос зд.	6 – 35К2
Пояс лев.	2 – 35К1	Пояс прд-прав.	10 – 40К3
Раскос лев.	6 – 35К2	Раскос прд-прав.	2 – 35К1
Пояс прав.	6 – 35К2	Пояс прд-лев.	16 – 40К5
Раскос прав.	6 – 35К2	Раскос прд-лев.	6 – 35К2
Пояс зд.	13 – 40К5	Колонна уменьш.	15 – 70Ш4

Таблица № 2

Материал элементов узла

Материал	R_y , (МПа)	ϵ_{lim} , (%)
С345	297,6	5,0

Таблица № 3

Характеристики болтов

Имя	Болтовое соединение	Диаметр, (мм)	F_u , (Мпа)	Площадь брутто, (мм ²)
M24 5.8 В	M24 5.8 В	24,0	500,0	452,0

Нагрузки на узел приняты по результатам анализа общей стрессовой расчетной схемы сооружения из Лира 10 и приложены в виде сил и моментов на обрезах узла от соответствующих сочетаний (табл. 4).

Таблица № 4

Расчетные усилия в сечениях

№ сочетания	Элемент	N , (кН)	V , (кН)		M_x , (кНм)	M_y , (кНм)	M_z , (кНм)
			V_y	V_z			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Пояс лев	1231,0	2,8	-19,6	-0,1	0,0	0,0
	Раскос лев	-1992,2	0,4	-21,8	-0,1	0,0	0,0
	Пояс прав	1811,7	1,3	-30,3	0,1	0,0	0,0
	Раскос прав	-2937,3	0,0	-27,3	0,1	0,0	0,0
	Пояс зд	606,3	-0,8	-72,1	0,7	0,0	0,0
	Раскос зд	-1597,3	-0,5	-15,6	0,1	0,0	0,0
	Пояс прд-прав	1177,9	-0,5	-104,2	-0,2	0,0	0,0

1	2	3	4	5	6	7	8
1	Раскос прд-прав	-2502,2	0,1	-46,8	0,1	0,0	0,0
	Пояс прд-лев	195,8	2,7	-27,8	-0,7	0,0	0,0
	Раскос прд-лев	-589,6	0,6	-2,2	0,1	0,0	0,0
	Колонна уменьш	-1471,3	27,4	-87,2	0,1	503,0	60,4

Диаграмма работы материала упруго-пластическая (Прандтля). Критерий разрушения, наступления предельного состояния, связан с достижением главной продольной деформации ее предельной величины. После выполнения операций ввода программе позволяет выполнить полный анализ работы узла с учетом нелинейной работы его элементов и их соединений между собой.

Основные результаты анализа работы узла представлены в табличной и графической формах. Эквивалентные напряжения и проверки по деформациям основных элементов конструкции узла представлены на рис. 4,5.

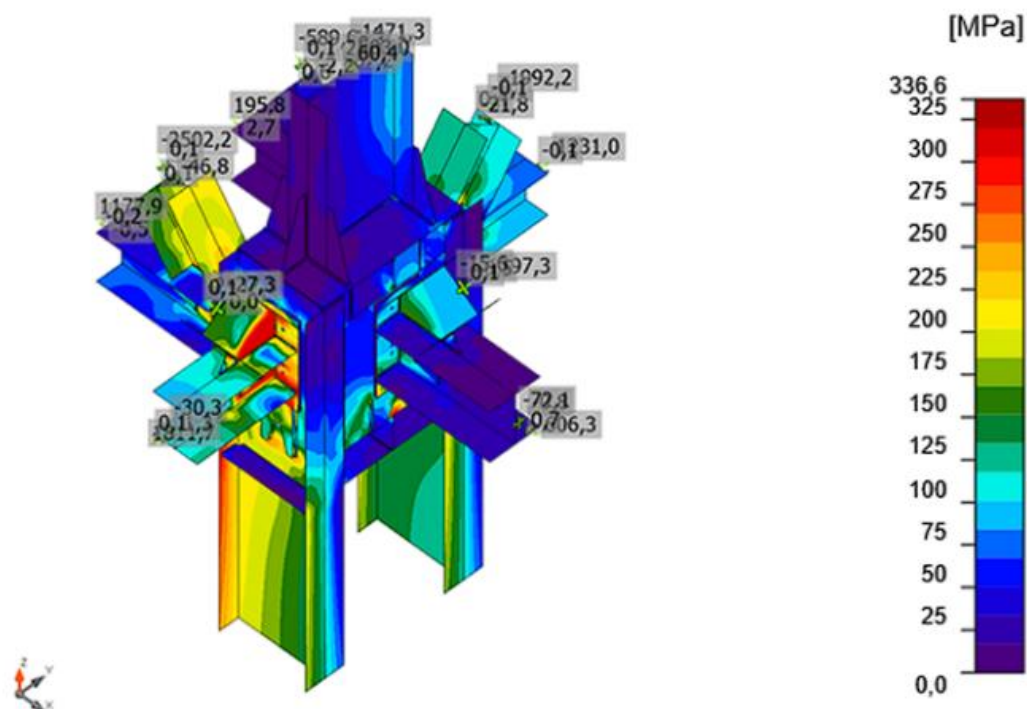


Рис. 4. – Эквивалентные напряжения, МПа

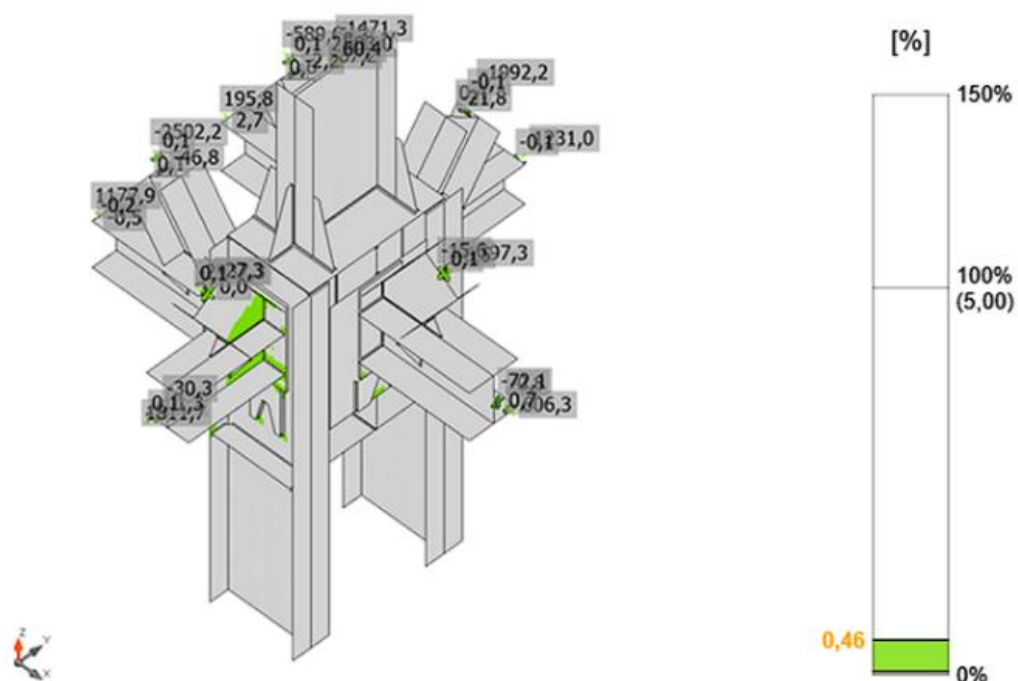


Рис. 5. – Пластические деформации, %

В таблице 5 представлены результаты для основных профилей из пластин и вспомогательных пластинчатых элементов.

Таблица № 5

Расчетные усилия в сечениях

Имя	Материал	R_y , (МПа)	Толщина, (мм)	№ сочетания	σ , (МПа)	ϵ_{Pl} , (%)	σ_{Ed} , (МПа)
Сост. колонн a-bfl 1	C345	297,6	31,5	1	297,7	0,1	5,5
Пояс лев-bfl 1	C345	317,1	15,0	1	150,3	0,0	0,0
Раскос лев-bfl 1	C345	317,1	19,0	1	184,8	0,0	0,0

Стоит отметить, что результаты расчета общей стреевой модели в Лира 10 показывают наличие запаса в ветвях по прочности и устойчивости. Для анализа правильности выполненных расчетов, программа позволяет сделать их трассировку с целью оценки методики и сравнения результатов с требованиями и методиками норм проектирования [10, 11].

Результаты работы соединительных элементов узла, а именно болтов и сварных швов, представлены в табл. 6, 7.

Таблица № 6

Результат работы болтового соединения

Форма	Элемент	Класс	№ сочетания	N_t , (кН)	N_s , (кН)	N_{bp} , (кН)	U_{t_t} , (%)	U_{t_s} , (%)	$U_{t_{ts}}$, (%)
	B1	M24 5.8 B-1	1	26,8	49,6	327,2	33,8	59,5	68,4

	B11	M24 5.8 B-1	1	63,6	21,9	268,3	80,0	26,3	84,2
	B12	M24 5.8 B-1	1	63,6	21,0	213,9	80,1	25,2	84,0

Таблица №7

Результат работы сварных швов

Элемент	Край шва	Элек-д	k_f , (мм)	l , (мм)	l_{we} , (мм)	№ сочетания	N , (кН)	U_{twm} , (%)	U_{tbm} , (%)
Сост.ко лон.-w 2	РЖ прав	Э50	▲12	591,	38,8	1	20,9	26,1	21,8
Оп.плита	Сост.ко лон.-bfl 1	Э50	▲18	159,8	49,9	1	131,7	97,1	70,8
Торц.пл пред-прав	Пояс пред-прав-bfl 1	Э50	▲14	349,2	42,4	1	52,6	58,7	42,8
Лист м/у полками колонны	Опорный столик зд	Э50	▲16	174,3	23,5	1	55,9	98,6	71,9

Для верификации решения выполним ручной расчет, в соответствии с нормами проектирования стальных конструкций.

Подробные результаты для болта B11 из табл. 6 представлены ниже.

1) Проверка на растяжение:

$$N_{bt} = R_{bt} A_{bn} \gamma_c = 225000 \cdot 0,000353 \cdot 1 = 79,4 \text{ кН} \geq 63,6 \text{ кН}, \quad (1)$$

2) Проверка на срез:

$$N_{bs} = R_{bs} A_b \gamma_b \gamma_c = 205000 \cdot 0,000452 \cdot 0,9 \cdot 1 = 83,4 \text{ кН} \geq 21,9 \text{ кН}, \quad (2)$$

3) Проверка на смятие:

$$N_{bp} = R_{bp} d_b \sum t_{\min} \gamma_b \gamma_c = 605900 \cdot 24 \cdot 10^{-6} \cdot 20,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9 \cdot 1 = 268,3 \text{кб} \geq 21,9 \text{кН}, \quad (3)$$

4) Проверка на совместное действие растяжения и сдвиг:

$$\sqrt{\left(\frac{N_s}{N_{bs}}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_{bt}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{21,9}{83,4}\right)^2 + \left(\frac{63,6}{79,4}\right)^2} = 0,84 \leq 1, \quad (4)$$

Аналогично выполним сравнение результатов расчетов сварных швов. Для примера произведем расчет сварного шва соединения элемента «Лист м/у полками колонны» с «Опорный столик зд» согласно наименованиям табл. 7. Величину максимальной нагрузки на швы смотрим в программе по результатам расчета.

Проверка прочности по металлу шва:

$$\frac{N}{\beta_f k_f l_{w,B} R_{wf} \gamma_c} = \frac{55,9}{0,7 \cdot 16 \cdot 23,5 \cdot 0,2156 \cdot 1} = 0,99 \leq 1, \quad (5)$$

Проверка прочности по металлу границы сплавления:

$$\frac{N}{\beta_z k_f l_{w,B} R_{wz} \gamma_c} = \frac{55,9}{1 \cdot 16 \cdot 23,5 \cdot 0,207 \cdot 1} = 0,72 \leq 1, \quad (6)$$

Анализ полученных данных показал хорошее совпадение результатов расчета в программе *IDEA Statica* с аналитическим решением по нормам проектирования.

В результате проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что механизмы объемного конечно-элементного моделирования позволяют в кратчайшие сроки проводить анализ сложных узлов стальных строительных конструкций, не снижая при этом надежность.

Литература

1. Овчинников Н.А. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния элементов поперечных силовых сечений кузова

автобуса в эксплуатации // Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1614

2. Филь С.Н., Касьянов В.Е. Алгоритм определения механических характеристик металла при расчете остаточного ресурса грузоподъемных кранов // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2139/.

3. Пермякова А. Ю. Разработка, анализ и оптимизация узловых соединений металлического каркаса одноэтажного однопролетного здания // Молодой ученый. 2020. № 18 (308). С. 80-81.

4. Жук Ю.Н., Панасенко Ю.В. Особенности проектирования зданий и сооружений с применением программных платформ для информационного моделирования (BIM) и программных комплексов расчета конструкций // XII российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием): тезисы докладов. 2017. С. 74-75.

5. Симбиркин В.Н., Ананьев А.В. Численный анализ напряженно-деформированного состояния и устойчивости стальных конструкций здания Рижского рынка в Москве// Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. №3. С. 49-54.

6. Семенов А.А. Металлические конструкции. Расчет элементов и соединений с использованием ПК SCAD Office. М.: АСВ, 2012. 338 С.

7. Stascov M., Stascov V., Vasile M., Vasile L. Nonlinear FEM analysis of steel beam-to-column connections with extended end plate // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 586 (2019). URL: researchgate.net/publication/335727131_Nonlinear_FEM_analysis_of_steel_beam-to-column_connections_with_extended_end_plate.

8. Vujanac R., Vulovic S., Disic A. and Miloradovic N. Numerical analysis of beam-to-column connection of pallet racks // IOP Conf. Series: Materials

Science and Engineering. 393(2018). URL:
researchgate.net/publication/326966057_Numerical_analysis_of_beam-to-column_connection_of_pallet_racks.

9. Бароев Р.В. Расчет узлов стальных конструкций компонентным методом конечных элементов // CADmaster. 2019. №3. С.95-101.

10. Москалев Н.С. Металлические конструкции: Учебник. М.: АСВ, 2014. 344 С.

11. Нехаев Г.А. Металлические конструкции в примерах и задачах: Учебное пособие. М.: АСВ, 2010. 128 С.

References

1. Ovchinnikov N.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №2. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1614

2. Fil` S.N., Kas`yanov V.E. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. No. 4. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2139/.

3. Permyakova A. Yu. Molodoj ucheny`j. 2020. No. 18 (308). P. 80-81.

4. Zhuk Yu.N., Panasenko Yu.V. XII Rossijskaya nacional'naya konferenciya po sejsmostojkomu stroitel'stvu i sejsmicheskomu rajonirovaniyu (s mezhdunarodnym uchastiem): tezisy dokladov. 2017. pp. 74-75.

5. Simbirkin V.N., Anan'ev A.V. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. 2010. №3. pp. 49-54.

6. Semenov A.A. Metallicheskie konstrukcii. Raschet e`lementov i soedinenij s ispol`zov. PK SCAD Office [Metal constructions. Calculation of elements and connections using PC SCAD Office]. M.: ASV, 2012. 338 p.

7. Stascov M., Stascov V., Vasile M., Vasile L. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 586 (2019). URL:
researchgate.net/publication/335727131_Nonlinear_FEM_analysis_of_steel_beam-to-column_connections_with_extended_end_plate.



8. Vujanac R., Vulovic S., Disic A. and Miloradovic N. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 393(2018). URL: researchgate.net/publication/326966057_Numerical_analysis_of_beam-to-column_connection_of_pallet_racks.

9. Baroev R.V. CADmaster. 2019. №3. S.95-101.

10. Moskalev N.S. Metallicheskie konstrukcii: Uchebnik [Metal structures: Textbook]. М.: ASV, 2014. 344 p.

11. Nexaev G.A. Metallicheskie konstrukcii v primerax i zadachax: Uchebnoe posobie [Metal structures in examples and problems: Textbook]. М.: ASV, 2010. 128 p.

Дата поступления: 1.03.2024

Дата публикации: 11.04.2024