УДК 621.791

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫШКИ УЧЕБНОГО СТЕНДА МОНТАЖА/ДЕМОНТАЖА УСТАНОВКИ ЭЛЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

SAFETY ENSURING OF THE LOADING STRUCTURES OF THE TRAINING STAND FOR INSTALLATION / DISMANTLING OF THE ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMP UNIT

Айрат Миннуллович Файрушин, Диаз Данисович Бадертдинов, Илья Алексеевич Марченко

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Airat M. Fairushin, Diaz D. Badertdinov, Ilya A. Marchenko

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

e-mail: OTSK@rusoil.net

Аннотация. На сегодняшний день в России сотни больших и малых месторождений и более 170 тысяч нефтяных скважин. При этом скважины, в которых добыча нефти ведется механизированным способом, т.е. оборудованные установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), составляют более 100 тысяч, и это число постоянно растет. Как показывает практика, технология механизированной добычи с использованием УЭЦН характеризуется устойчивым ростом, в отличие от других способов добычи нефти. В России имеется значительный фонд высокодебитных добывающихся скважин с суммарной добычей нефти 50 % от всей годовой добычи, которая носит понятие «золотой» фонд скважин. В большинстве случаев они оборудованы установками электроцентробежных насосов (ЭЦН). Капитальный ремонт таких скважин и замена погружной

установки – это один из важнейших звеньев нефтедобычи, т.к. самым главным показанием к ремонту добывающей скважины и погружного оборудования УЭЦН является уменьшение дебита, которое чаще всего происходит из-за отказа данной установки. Значимым показателем работы УЭЦН также являются производительность и межремонтный период (МРП). Показатель МРП – время непрерывной работы оборудования между очередными плановыми ремонтами установки. МРП УЭЦН различается в разных компаниях и зависит от многих факторов. На данный момент он колеблется от 500 до 1200 сут.

Актуальным вопросом на сегодняшний день остается качественная подготовка специалистов по монтажу и демонтажу погружных установок ЭЦН, которая, как правило, производится только в условиях производства, ввиду того что в образовательных учреждениях отсутствуют учебные вышки в натурную величину, и обучение производится только теоретически.

Исходя из оригинальности исполнения данной вышки, необходимо произвести расчет несущей конструкции сооружения и выбрать необходимый типоразмер базовых элементов, чтобы обеспечить безопасность конструкции при эксплуатации ее в любое время года.

Abstract. Today in Russia there are hundreds of large and small fields and more than 170 thousand oil wells. At the same time, wells in which oil production is carried out in a mechanized way, i.e. equipped with units of electric centrifugal pumps (ESP), are more than 100 thousand, and this number is constantly growing. As practice shows, the technology of artificial lift using ESP is characterized by steady growth, in contrast to other methods of oil production. In Russia there is a significant stock of high-rate producing wells with total oil production of 50 % of the total annual production, which is referred to as a «gold» stock of wells. In most cases, they are equipped with ESP units. Overhaul of such wells and replacement of a submersible installation is one of the most important links in oil production, since most important

indication for the repair of a production well and ESP submersible equipment is a decrease in flow rate, which most often occurs due to a failure of this installation. The main performance indicators of the ESP are productivity and turnaround time. The turnaround time indicator – the time of equipment continuous operation between the next scheduled repairs, for the ESP unit differs in different companies and depends on many factors. At the moment, it ranges from 500 to 1200 days.

An urgent issue today is the high-quality training of specialists for the installation and dismantling of submersible ESP units, which, as a rule, is carried out only in production conditions, since educational institutions do not have full-scale training towers and training is carried out only theoretically.

Based on the originality of the performance of this simulator, it is necessary to calculate the supporting structure and select the required standard size of the basic elements in order to ensure the structure safety during its operation at any time of the year.

Ключевые слова: обеспечение безопасности конструкции, вышка, мачта, установка электроцентробежного насоса, учебный стенд, расчёт несущих конструкций, прочность, жесткость, устойчивость, монтаж/демонтаж установки электроцентробежного насоса

Keywords: ensuring the safety of the structure, training apparatus, unit of an electric centrifugal pump, training stand, calculation of load-bearing structures, strength, rigidity, stability, installation/dismantling of unit of an electric centrifugal pump

Причины отказов работы установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) разделяют на следующие: субъективные, технические и геологические. При этом основным фактором является именно субъективная причина отказа оборудования, вызванная действиями персонала, связанная с браком выполнения работ при оказании сервисных

услуг (в том числе браки, допущенные при ремонте, изготовлении, обслуживании оборудования), связанная с нарушением инструкций и технологических регламентов во время подготовки, вывода скважины на режим (ВНР) [1].

Отказ погружной установки влечет за собой подъем и замену оборудования УЭЦН. Качество выполнения данных работ напрямую зависит от квалификации персонала сервисной компании.

В настоящее время имеется необходимость в подготовке специалистов в области монтажа и демонтажа УЭЦН. Во многих сервисных компаниях данные вакансии остаются открытыми ввиду того, что подготовка студентов по основным и дополнительным программам в образовательных учреждениях не предусматривает практического изучения данной технологии. В связи с этим возникает необходимость в разработке и изготовлении безопасного тренажера-вышки для проведения обучения рабочего персонала. Вышка – это стационарное или передвижное сооружение, предназначенное для подвески талевой системы, поддержания на весу оборудования УЭЦН, колонны труб или штанг при ремонтных работах, проводимых на скважине.

Проект учебной вышки в части конструктивного исполнения сооружения был разработан на основе анализа действующих установок (вышек), которые используются на скважинах во время спуско-подъемных операций. Учебный стенд показан на рисунке 1.

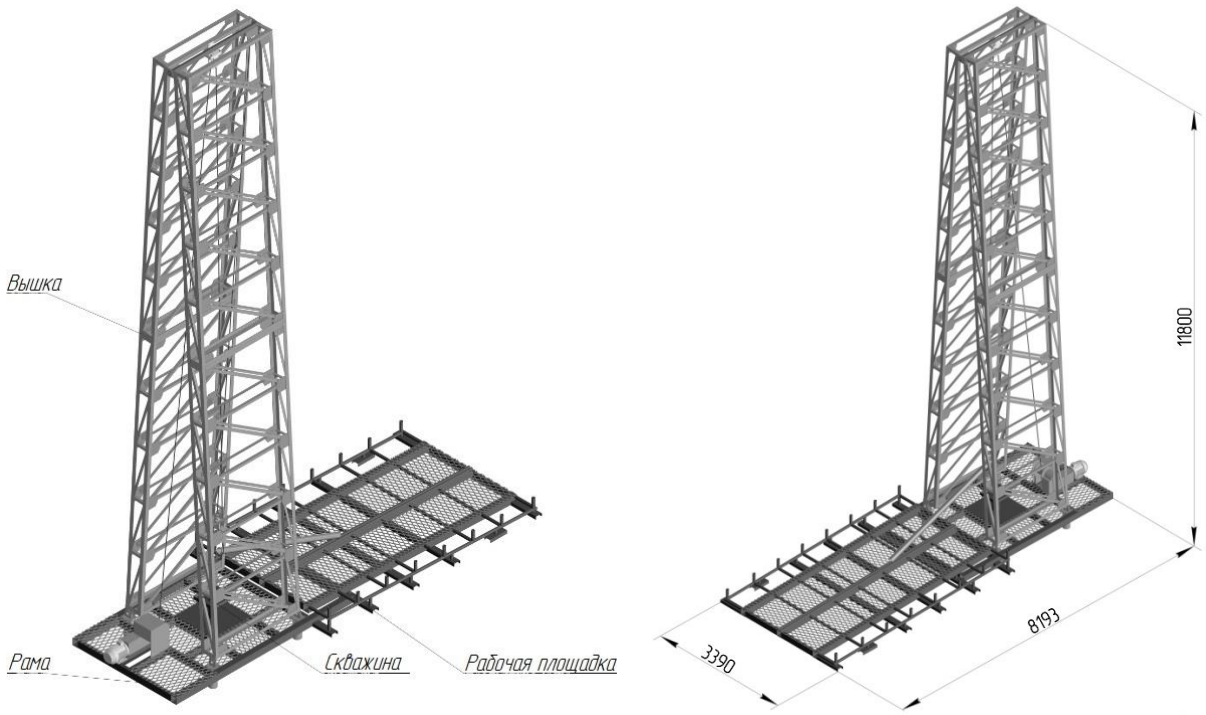


Рисунок 1. 3D модель учебного стенда

Figure 1. 3D model of the training stand

Как показано на рисунке 1, данный стенд состоит из рабочей площадки размерами 5 × 4 м, Λ-образной вышкой высотой 12 м, рамой и скважиной диаметром 160 мм и глубиной 40 м. Также учебный стенд будет оборудован грузоподъемным механизмом, подземным оборудованием УЭЦН, трансформатором и станцией управления (на рисунке 1 не указаны). Вышку предполагается изготовить с применением сортового проката из стали марки 09Г2С: раскосы – уголок 50 × 6 мм и элементы пояса – уголок 75 × 8 мм. Крепление конструкции с применением ручной дуговой сварки электродами УОНИ 13/55. В качестве профиля для рамы учебного стенда будет использован швеллер 145 × 65 мм.

С целью обеспечения безопасной эксплуатации данной конструкции был проведен расчет конструкции с учетом выбранного материала и типоразмера конструктивных элементов. Одним из наиболее опасных элементов учебной вышки является непосредственно Λ-образная вышка.

Поверочный расчет конструкции вышки выполнен в ПК SCADOffice, реализующем метод конечных элементов. Материал несущих элементов – сталь С345 (расчетный аналог стали 09Г2С).

Расчетная схема вышки приведена на рисунке 2.

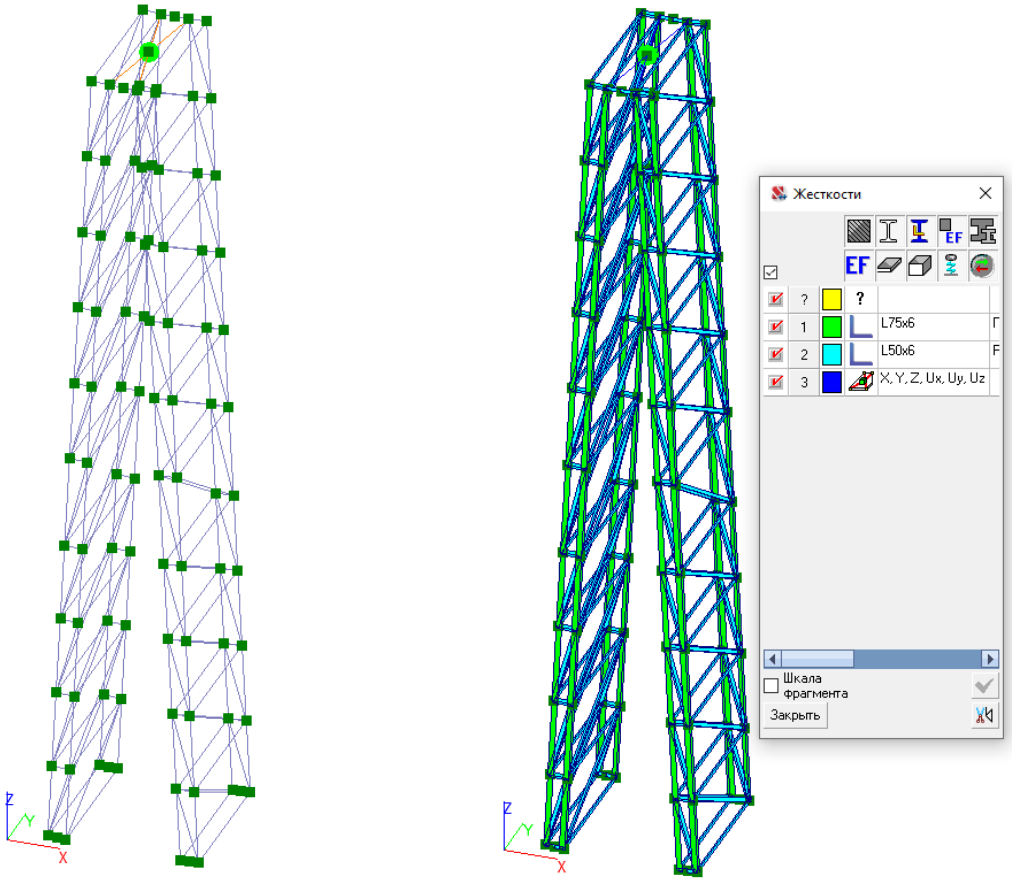


Рисунок 2. Расчетная схема вышки

Figure 2. Design scheme of tower

Элементы поясов и решетки смоделированы стержневыми конечными элементами (5 тип – пространственный стержень). Примыкание элементов решетки к поясам принято шарнирным. На модель наложены связи в соответствии с принятым конструктивным решением.

Сбор нагрузок выполнен в соответствии с требованиями СП 20.13330 [2] и информацией из каталогов действующего погружного оборудования.

На вышку действуют следующие нагрузки:

- собственный вес конструкции;

- технологическая нагрузка от веса оборудования;

- ветровая нагрузка (включая пульсационную составляющую).

Постоянные нагрузки от веса несущих конструкций определены в программе автоматически. Коэффициент надежности по нагрузке – 1,05. Расчетная схема с наложением нагрузок показана на рисунке 3.

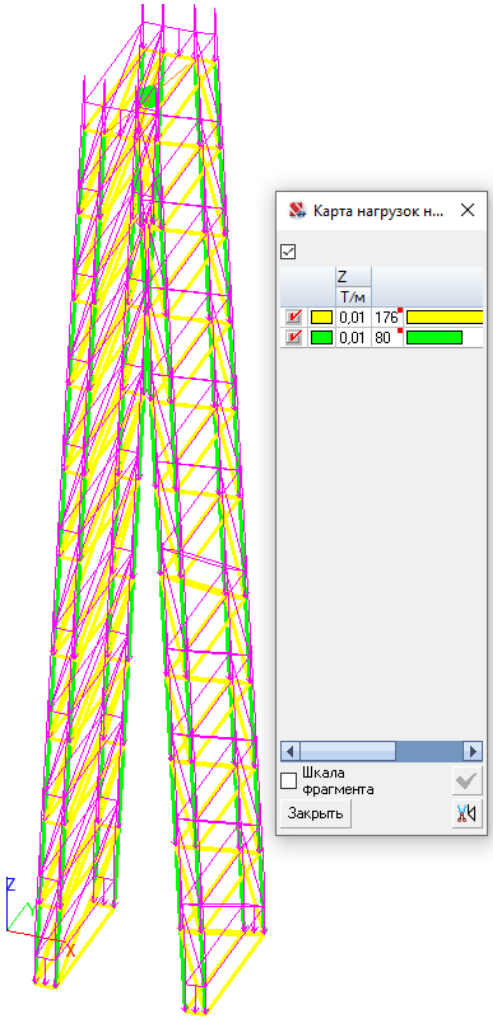


Рисунок 3. Нагрузка от собственного веса конструкций

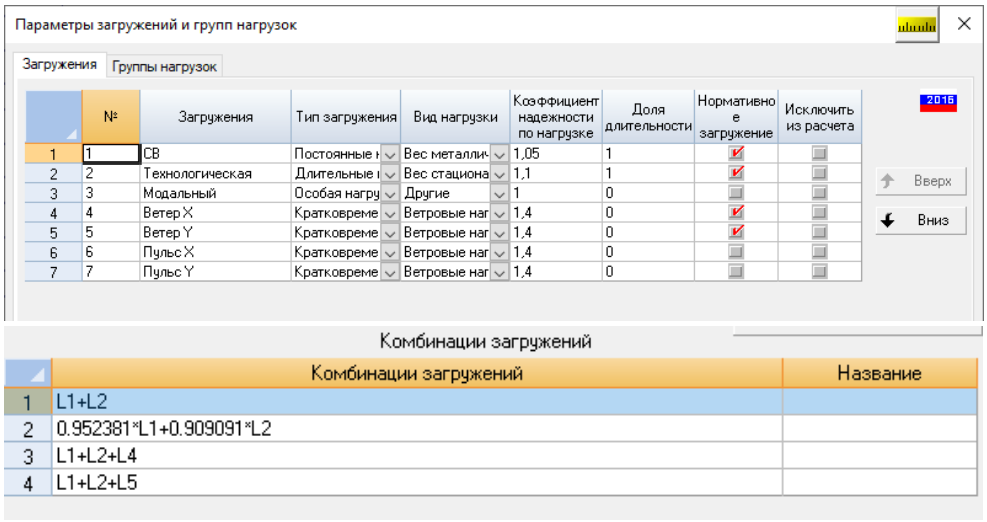
Figure 3. Self-weight load of structures

В полной комплектации максимальный вес УЭЦН, которую планируется подвесить на эту вышку, будет суммарно составлять не более 2000 кг. Коэффициент надежности по нагрузке – 1,1.

Ветровая нагрузка определена в соответствии с СП 20.13330 (раздел 11 и приложение В). Ветровой район – II (нормативное значение скоростного напора 0,3 кПа), тип местности С. Коэффициент надежности по нагрузке – 1,4. Учтены два направления ветра.

Пульсационная составляющая ветровой нагрузки была определена в модуле Динамические воздействия ПК SCAD.

Сведения о нагрузках и комбинациях загружений показаны на рисунке 4.



	№	Загружения	Тип загружения	Вид нагрузки	Коэффициент надежности по нагрузке	Доля длительности	Нормативное загружение	Исключить из расчета
1	1	СВ	Постоянные н	Вес металлич	1,05	1	✓	
2	2	Технологическая	Длительные н	Вес стациона	1,1	1	✓	
3	3	Модальный	Особая нагру	Другие	1	0		
4	4	Ветер X	Кратковреме	Ветровые наг	1,4	0	✓	
5	5	Ветер Y	Кратковреме	Ветровые наг	1,4	0	✓	
6	6	Пульс X	Кратковреме	Ветровые наг	1,4	0		
7	7	Пульс Y	Кратковреме	Ветровые наг	1,4	0		

	Комбинации загружений	Название
1	L1+L2	
2	0.952381*L1+0.909091*L2	
3	L1+L2+L4	
4	L1+L2+L5	

Рисунок 4. Сведения о нагрузках и комбинациях загружений

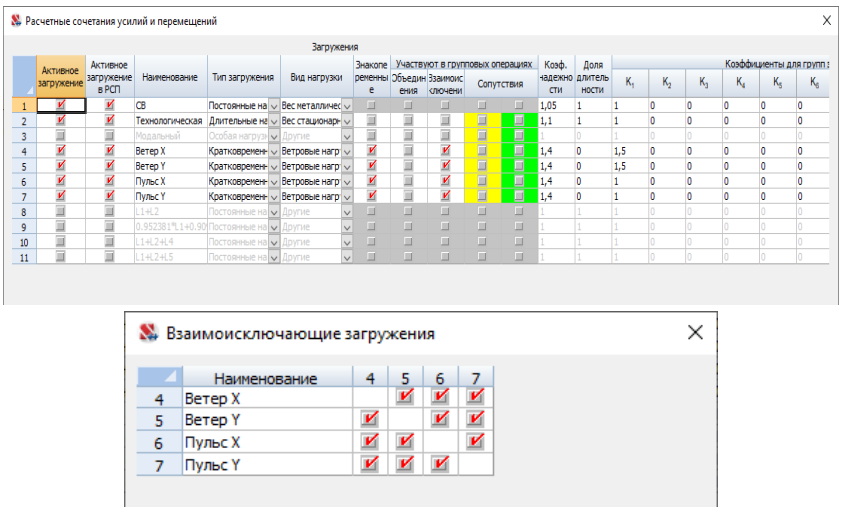
Figure 4. Details of loads and load combinations

Расчетные сочетания усилий определены в соответствии с требованиями раздела 6 СП 20.13330 [2] с использованием встроенного инструмента ПК SCAD. На рисунке 5 представлены сведения для вычисления расчетного сочетания усилий и перемещений (РСУ).

На рисунках 6 и 7 показаны деформированная схема вышки и значения максимальных перемещений.

Группы стальных конструктивных элементов для проверки сечений приведены на рисунке 8.

Сведения о группах представлены в таблице 1 [3, 4].



Расчетные сочетания усилий и перемещений

Загружения

	Активное загружение	Активное загружение в РСП	Наименование	Тип загружения	Вид нагрузки	Знакопеременное	Участвуют в групповых операциях: Объединения	Взаимоисключение	Сопутствия		Коэф. надежности	Доля длительности	Коэффициенты для групп: K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
1	✓	✓	СВ	Постоянные на	Вес металличе						1,05	1	1	0	0	0	0	0
2	✓	✓	Технологическая	Длительные на	Вес стационарн						1,1	1	1	0	0	0	0	0
3			Модальный	Особая нагруз	Другие						1	0	1	0	0	0	0	0
4	✓	✓	Ветер X	Кратковременн	Ветровые нагр	✓		✓			1,4	0	1,5	0	0	0	0	0
5	✓	✓	Ветер Y	Кратковременн	Ветровые нагр	✓		✓			1,4	0	1,5	0	0	0	0	0
6	✓	✓	Пульс X	Кратковременн	Ветровые нагр	✓		✓			1,4	0	1	0	0	0	0	0
7	✓	✓	Пульс Y	Кратковременн	Ветровые нагр	✓		✓			1,4	0	1	0	0	0	0	0
8			L1+L2	Постоянные на	Другие						1	1	1	0	0	0	0	0
9			0.952381*L1+0.90	Постоянные на	Другие						1	1	1	0	0	0	0	0
10			L1+L2+L4	Постоянные на	Другие						1	1	1	0	0	0	0	0
11			L1+L2+L5	Постоянные на	Другие						1	1	1	0	0	0	0	0

Взаимоисключающие загружения

	Наименование	4	5	6	7
4	Ветер X		✓	✓	✓
5	Ветер Y	✓		✓	✓
6	Пульс X	✓	✓		✓
7	Пульс Y	✓	✓	✓	

Рисунок 5. Сведения для вычисления РСУ

Figure 5. Information for calculating the combination of forces and displacements

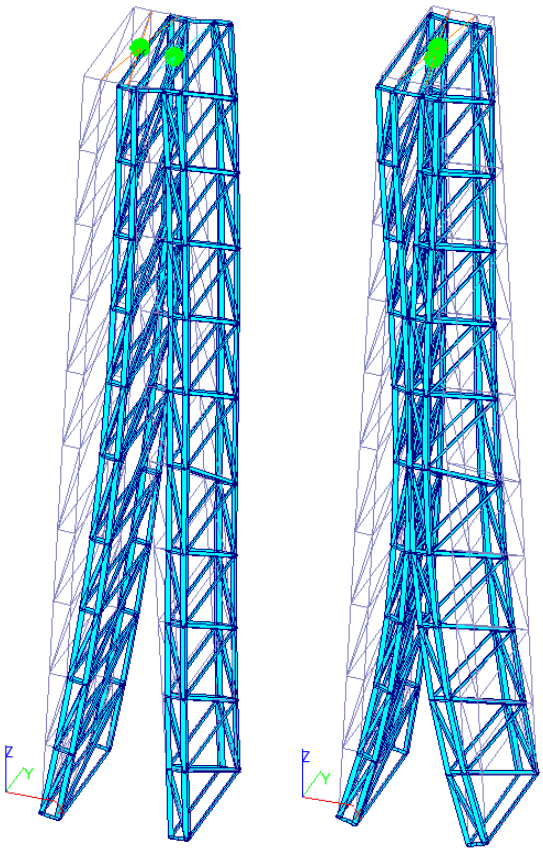


Рисунок 6. Деформированные схемы вышки. Комбинация вертикальные нагрузки + ветер X (слева); вертикальные нагрузки + ветер Y(справа)

Figure 6. Deformed tower schemes. Combination of vertical loads + wind X (left); vertical loads + wind Y (right)

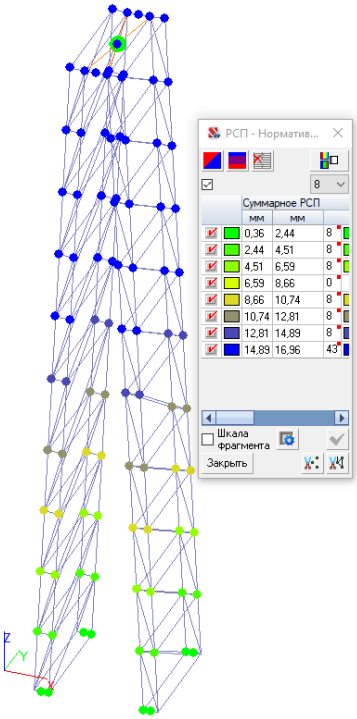


Рисунок 7. Максимальные значения суммарных перемещений от действия нормативных нагрузок. Огибающая по РСУ

Figure 7. Maximum values of total displacements from the action of standard loads. The envelope for the calculated combination of forces and displacements

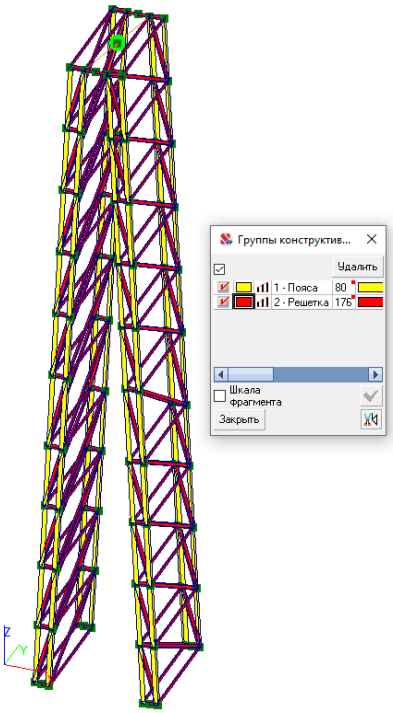


Рисунок 8. Группы стальных конструктивных элементов для проверки сечений

Figure 8. Groups of steel structural members for cross-section verification

Таблица 1. Информация о группах стальных конструктивных элементов

Table 1. Information on steel structural member groups

	Пояса	Решетка
Конструктивный элемент	-	-
Группа конструктивных элементов	+	+
Дополнительная группа		
Тип конструктивной группы	Элемент общего вида	Элемент общего вида
Неупругая работа сечения не допускается	+	+
Работа сечения с неустойчивой стенкой не допускается	+	+
Сталь	С345	С345
Коэффициент условий работы γ_c	0,8	0,8
Коэффициент надежности по ответственности	1	1
Дополнительные коэффициенты условий работы		
- расчет на прочность при сейсмике	0	0
- расчет на устойчивость при сейсмике	0	0
- при особых (не сейсмических) воздействиях	1	1
- коэффициент понижающий расчетное сопротивление	1	1
Предельные гибкости:		
- сжатые элементы	180 - 60α	200
- растянутые элементы	400	400
Коэффициенты расчетной длины		
- в плоскости X_1OZ_1	1	0,9
- в плоскости X_1OY_1	1	0,9
Коэффициенты расчетной длины отличаются от рекомендаций норм	-	-
Расчетная длина, м		
- в плоскости X_1OZ_1	-	-
- в плоскости X_1OY_1	-	-
Расстояние между точками раскрепления из плоскости изгиба, м	0	0
Примечания: Нормы проектирования: СП 16.13330.2017 с изменениями № 1, 2; Нормы по надежности: ГОСТ 27751-2014		

На рисунке 9 показаны значения максимальных коэффициентов использования несущей способности элементов вышки.

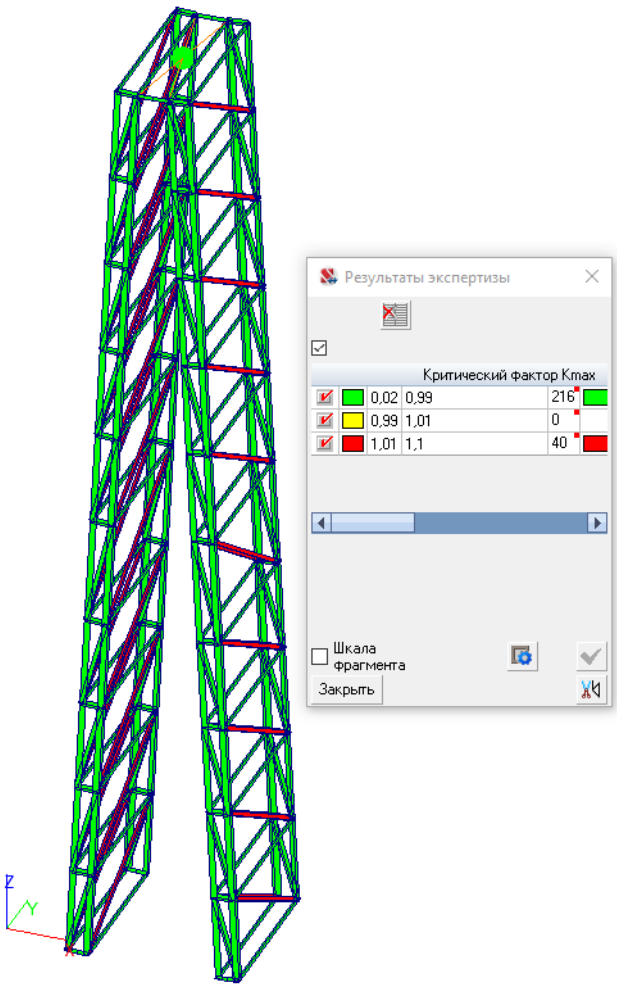


Рисунок 9. Максимальные коэффициенты использования несущей способности элементов вышки

Figure 9. Maximum utilization factors of the bearing capacity of the tower elements

Экстремальные значения всех проверяемых факторов для каждой из групп приведены в таблице 2 [3].

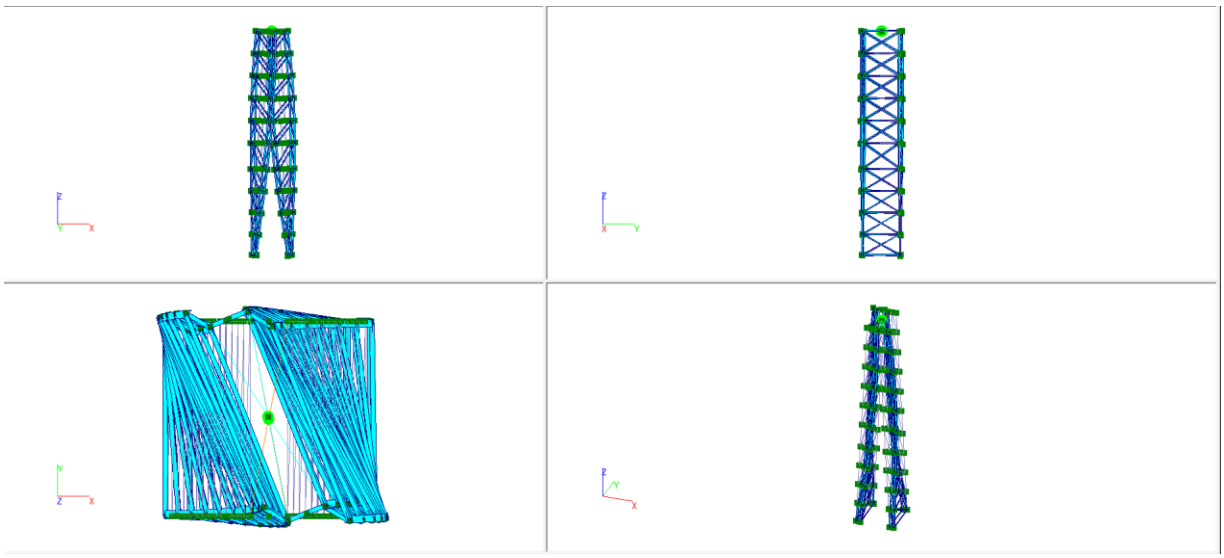
Дополнительно выполнена оценка общей устойчивости системы. Формы потери устойчивости и соответствующие им коэффициенты запаса общей устойчивости приведены на рисунке 10. Расчет выполнен в линейной постановке.

Таблица 2. Экстремальные значения факторов [СП 16.13330.2017 с изменениями № 1, 2]

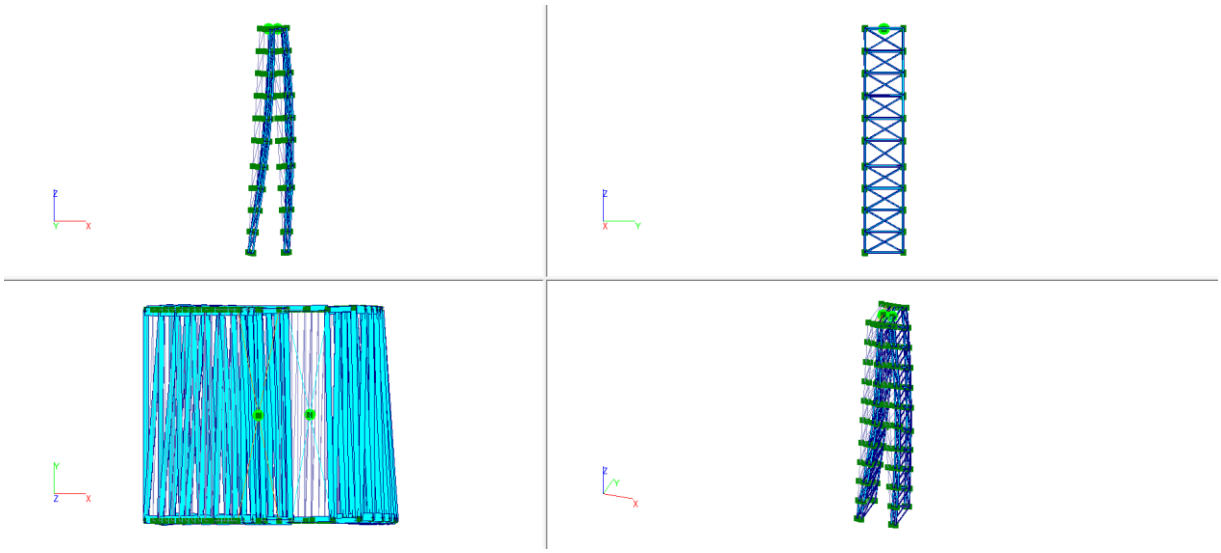
Table 2. Extreme values of factors [SP 16.13330.2017 with amendments No. 1, 2]

Экстремальные значения факторов. Группа 1:Пояса				
Проверка	Фактор	Максимум		
		Элемент	Значение	Комбинация
п. 8.2.1	Прочность при действии изгибающего момента My	130	0,55	L1-L6~Сечение 3
п. 8.2.1	Прочность при действии изгибающего момента Mz	150	0,3	L1+L6~Сечение 3
п. 8.2.1	Прочность при действии поперечной силы Qy	150	0,01	L1+L6~Сечение 3
п. 8.2.1	Прочность при действии поперечной силы Qz	130	0,02	L1-L6~Сечение 3
п. 9.1.1	Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов без учета пластики	130	0,73	L1-L6~Сечение 3
п. 7.1.1	Прочность при центральном сжатии/растяжении	64	0,09	L1+L2+L6~Сечение 1
п. 7.1.3	Устойчивость при сжатии уголка относительно главных осей	64	0,17	L1+L2+L6~Сечение 1
п. 10.4.1	Предельная гибкость в плоскости XOY	29	0,59	L1-L7~Сечение 1
п. 10.4.1	Предельная гибкость в плоскости XOZ	29	0,31	L1-L7~Сечение 1
п. 7.3.8, 7.3.11, 8.5.18, 9.4.7, 9.4.9	Предельная гибкость свеса полки (поясного листа) из условия местной устойчивости	44	0,66	L1+L2-L6~Сечение 3
п. 8.2.1	Прочность при действии изгибающего момента My	21	0,08	L1+L2+L7~Сечение 1
п. 8.2.1	Прочность при действии изгибающего момента Mz	110	0,1	L1+L2-L7~Сечение 3

Экстремальные значения факторов. Группа 1:Пояса				
Проверка	Фактор	Максимум		
		Элемент	Значение	Комбинация
п. 8.2.1	Прочность при действии поперечной силы Qy	22	4,48e-003	L1-L7~Сечение 3
п. 8.2.1	Прочность при действии поперечной силы Qz	22	0,01	L1+L2+L7~Сечение 3
п. 9.1.1	Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов без учета пластики	110	0,15	L1+L2-L7~Сечение 3
п. 7.1.1	Прочность при центральном сжатии/растяжении	76	0,05	L1+L2+L6~Сечение 1
п. 7.1.3	Устойчивость при сжатии уголка относительно главных осей	76	0,14	L1+L2+L6~Сечение 1
п. 8.2.1	Прочность по приведенным напряжениям при одновременном действии изгибающего момента и поперечной силы	107	0,04	L1+1.5*L5~Сечение 3
п. 10.4.1	Предельная гибкость в плоскости XOY	245	**1,1**	L1+L2+1.5*L5~Сечение 1
п. 10.4.1	Предельная гибкость в плоскости XOZ	245	0,57	L1+L2+1.5*L5~Сечение 1
п. 7.3.8, 7.3.11, 8.5.18, 9.4.7, 9.4.9	Предельная гибкость свеса полки (поясного листа) из условия местной устойчивости	107	0,57	L1+L7~Сечение 1



a)



b)

a) Форма потери устойчивости системы при действии комбинации расчетных нагрузок вертикальные + ветер X ($К_{зап}$ = 18,12);
b) Форма потери устойчивости системы при действии комбинации расчетных нагрузок вертикальные + ветер Y ($К_{зап}$ = 27,33)

a) The form of loss of stability of the system under the action of a combination of design loads vertical + wind X ($К_{зап}$ = 18,12);
b) The form of buckling of the system under the action of a combination of design loads vertical + wind Y ($К_{зап}$ = 27,33)

Рисунок 10. Формы потери устойчивости системы

Figure 10. Forms of loss of stability of the system

Выводы

1. Результаты расчета показали, что максимальные коэффициенты использования несущей способности стальных элементов вышки находятся в диапазоне нормативно допустимых величин. Исключение составляют раскосы из уголка 50 × 6 мм, установленные вдоль длинной стороны вышки. Для этих элементов не выполняются требования норм по предельной гибкости (коэффициент использования 1,1). Для обеспечения безопасной эксплуатации конструкции рекомендуется заменить указанные элементы на уголок 60 × 6 мм.

2. Несмотря на то, что в большинстве случаев для элементов поясов вышки используется уголок 75 × 8 мм, наш расчет показал, что использование в качестве элементов поясов уголка 75 × 6 мм не приведет к нарушению нормативных требований по прочности, жесткости и устойчивости конструкции. Применение уголка 75 × 6 мм облегчит конструкцию, удешевит её, при этом в полной мере обеспечит безопасность конструкции.

Список источников

1. Бухаленко Е.И., Абдуллаев Ю.Г. Монтаж, обслуживание и ремонт нефтепромыслового оборудования. М.: Недра, 1985. 391 с.

2. СП 20.13330.2017. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. М.: Минстрой России, 2017. 87 с.

3. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81. М.: Стандартинформ, 2017. 151 с.

4. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.

References

1. Bukhalenko E.I., Abdullaev Yu.G. *Montazh, obsluzhivanie i remont neftepromyslovogo oborudovaniya* [Installation, Maintenance and Repair of Oilfield Equipment]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 391 p. [in Russian].

2. *SP 20.13330.2017. Nagruzki i vozdeistviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85* [SP 20.13330.2017. Loads and Impacts. Updated Edition of SNiP 2.01.07-85]. Moscow, Minstroi Rossii Publ., 2017. 87 p. [in Russian].

3. *SP 16.13330.2017. Stal'nye konstruktsii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23-81* [SP 16.13330.2017. Steel Structures. Updated Edition of SNiP II-23-81]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 151 p. [in Russian].

4. *GOST 27751-2014. Nadezhnost' stroitel'nykh konstruktsii i osnovanii. Osnovnye polozheniya* [State Standard 27751-2014. Reliability for Constructions and Foundations. General Principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 20 p. [in Russian].

Сведения об авторах

About the Authors

Файрушин Айрат Миннуллович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Оборудование и технология сварки и контроля», УГНТУ, Уфа, Россия

Airat M. Fairushin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Equipment and Technology of Welding and Control Department, USPTU, Ufa, Russia

e-mail: otsk@rusoil.net

Бадертдинов Диаз Данисович, студент кафедры «Оборудование и технология сварки и контроля», УГНТУ, Уфа, Россия

Diaz D. Badertdinov, Student of Equipment and Technology of Welding and Control Department, USPTU, Ufa, Russia

e-mail: diaz.badertdinov@gmail.com

Марченко Илья Алексеевич, студент кафедры «Оборудование и технология сварки и контроля», УГНТУ, Уфа, Россия

Ilya A. Marchenko, Student of Equipment and Technology of Welding and Control Department, USPTU, Ufa, Russia

e-mail: ilya_marchenko_1976@mail.ru