АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПОДЪЕМНИКА ПРИ УСТАНОВКЕ В ПРОЕКТНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

IMPROVEMENT OF VERTICAL EQUIPMENT INSTALLATION TECHNOLOGY USING MODERN MECHANISMS

Д. К. Шарипов
Daniil K. Sharipov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

З. Р. Мухаметзянов
Zinur R. Mukhametzyanov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Т. З. Хакимов
Timur Z. Khakimov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Срок эксплуатации подавляющего числа отечественных нефтеперерабатывающих предприятий составляет более 50 лет, при этом степень износа основных фондов этих объектов составляет 80 %. Ужесточение требований со стороны потребителей к углублению переработки сырья и качеству продукции, соответственно, приводит к повышению требований к условиям эксплуатации аппаратов и необходимости совершенствования технологии производства нефтегазопереработки с учетом пересмотра количественных показателей рабочих параметров технологических процессов. Поэтому существует проблема увеличения срока службы оборудования с учетом выявления факторов, влияющих на эксплуатационные свойства оборудования на всех этапах его жизненного цикла, в том числе и в процессе производства монтажных работ по установке в проектное положение аппаратов нефтегазопереработки. В статье представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния ректификационной колонны и гидравлического подъемника при технологическом процессе монтажа оборудования, расчета такелажной оснастки гидравлического подъемника с целью формирования исходных данных. Из полученных исходных данных смоделирован процесс монтажа, включающий в себя: фундаментную площадку с монтажным шарниром для колонны; фундаментную площадку для двух стоек гидроподъемника; две стойки гидроподъемника; колонный аппарат, состоящий из двух днищ, опоры, обечайки; седла; двух кареток с домкратом. После построения общей модели проведен анализ движения с помощью SolidWorks Simulation и SolidWorks Motion для получения данных (эпюр) по напряжениям и деформациям в узлах монтажа ректификационной колонны и гидравлического подъемника. Результаты расчета такелажной оснастки и экспериментального моделирования с помощью программного обеспечения SolidWorks с использованием нагрузок SolidWorks Motion и структурного анализа SolidWorks Simulation позволяют на этапе конструкторской подготовки производств определить максимальные напряжения и деформации в узлах конструкции при подъеме колонного оборудования гидравлическим подъемником. Исходя из анализа полученных данных (напряженно-деформированного состояния), можно сделать вывод о характере статических нагрузок в узлах конструкции и дать рекомендации по разработке мероприятий по снижению или исключению их негативно-го влияния на срок службы и эксплуатацию ректификационной колонны и гидравлического подъемника.

Ключевые слова

собственная частота колебаний;
нефтепромысловый трубопровод;
прочностные расчёты
трубопроводов; проверка
сейсмической устойчивости
надземных трубопроводов;
моделирование

The life of the vast majority of domestic oil refineries is more than 50 years, while the depreciation of the fixed assets of these facilities is 80 %. Satisfying the requirements for consumers in order to expand production and quality products, respectively, leads to compliance with the requirements for the operation of equipment and the need to improve oil and gas processing technologies, taking into account the revision of quantitative indicators of the operating parameters of technological processes. There are problems of increasing the service life of equipment, taking into account factors affecting the operational properties of equipment at all stages of its life cycle.

The article presents the results of studies of the stress-strain state of a distillation column and hydraulic lifting during the installation process of the equipment, the calculation of the so-called hydraulic lifting force in order to form the initial data. From the obtained initial data, the installation process was simulated, which includes: a foundation platform with a mounting hinge for columns; foundation area for two racks of a hydraulic lift; two racks of a hydraulic lift; column apparatus, consisting of two bottoms, supports, shells; saddles; two carriages with a jack. Modeling SolidWorks and SolidWorks Motion to obtain data (epilation) on stress and deformation in bottlenecks using a distillation column and hydraulic lift. The results of SolidWorks Motion and structural analysis of SolidWorks Simulation allow us to determine the maximum stress and strain in narrow structures when lifting column equipment with a hydraulic lift based on design training. The initial data from the analysis of the obtained data (stress-strain state) allow us to conclude the nature of static loads in narrow structures and give recommendations on the development of measures aimed at reducing or eliminating their negative consequences for the life and operation of a distillation column and hydraulic lift.

Key words

natural frequency; oilfield pipeline; pipeline strength calculations; verification of seismic stability of above-ground pipelines; simulation

На объектах нефтегазового комплекса РФ в настоящее время находится в эксплуатации большое количество изношенного оборудования. Такая ситуация является причиной техногенных аварий, причиняющих большой ущерб экономике предприятий нефтегазоперерабатывающего комплекса. Одной из причин считается негативное влияние нагрузок, возникающих при монтаже, на срок службы оборудования. Поэтому возникает в первую очередь необходимость изучения механизма влияния этих нагрузок на эксплуатационные свойства оборудования [1–4].

Для выявления напряженно-деформированного состояния ректификационной колонны и гидроподъемника в статье приведены результаты их детального анализа на основе экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводились в программном обеспечении SolidWorks. Для этого понадобилось проведение дополнительного расчета такелажной оснастки гидравлического подъемника с целью формирования исходных данных.

Для расчета были установлены следующие параметры:

- высота фундамента 0,5 м;
- масса аппарата 225 т;
- диаметр 4,8 м;

— расстояние от центра массы аппарата до его основания 30 м.

Методика расчета такелажной оснастки состоит в следующем:

1) Вычисляется минимальная высота стоек гидравлического подъемника для установки колонного аппарата в вертикальное положение (рисунок 1):

$$H_c = \frac{l_c}{\cos \beta} + h_{o.c} + h_H + h_3, \quad (1)$$

где $l_c = l_{ц.м.} + (1 \div 1,5)$ — расстояние от поворотного шарнира оборудования до плоскости основания стоек гидравлического подъемника, м;

$l_{ц.м.}$ — расстояние от основания оборудования до его центра массы, м;

β — угол между горизонтом и осью стойки в момент вертикального положения оборудования, $\beta = 45^\circ$,

$h_{o.c}$ — высота шарнирных опор стоек гидроподъемника, м (при низком фундаменте под оборудование принимается $h_{o.c} = h_\phi$);

h_ϕ — высота фундамента;

h_H — максимальная высота подвижной системы подъемного устройства, м, $h_H = 3,5$ м;

h_3 — запас свободного конца стоек: $h_3 = 0,5$ м.

Рисунок 1. Расчетные схемы подъема оборудования гидроподъемником

2) Вычисляется максимальное сжимающее усилие, кН, действующее на стойку гидроподъемника в начальный момент подъема оборудования, при угле наклона оборудования к горизонту $\varphi=0^\circ$:

$$N_c = \frac{5G_0 \cdot \kappa_n \cdot \kappa_d \cdot l_{ц.м.}}{l_c} + 10G_c \cdot \kappa_n + 5G_\sigma \cdot \kappa_n + 10G_k \cdot \kappa_n, \quad (2)$$

где G_0 — масса поднимаемого оборудования, т;

G_c — масса стойки, т (ориентировочно принимается равной 0,4 т на 1 м высоты стойки);

G_σ — масса балки и балансирной системы (зависит от ряда факторов и прежде всего от массы поднимаемого аппарата и расстояния между стойками гидроподъемника, для подъема аппаратов диаметрами от 3 до 5 м масса балки может быть принята предварительно $G_\sigma = (0,03 \div 0,05) \cdot G_0$);

G_k — масса нижней и верхней кареток гидроподъемника, $G_k \approx 8,5$ т.

3) Рассчитывается требуемая площадь поперечного сечения стойки, см^2 :

$$F_{тр} = \frac{N}{\varphi_0 \cdot m \cdot 0,1 \cdot R}, \quad (3)$$

где φ_0 — коэффициент продольного изгиба ($\varphi_0 = 0,32$ справочная величина по допустимой гибкости стойки $[\lambda] = 150$).

4) Далее рассчитывается расчетная рабочая высота стойки, см:

$$H_c^p = (H_c - h_k - h_3) \cdot \mu, \quad (4)$$

где μ — коэффициент приведения расчетной длины, зависящей от условия закрепления концов, величина справочная, $\mu = 1$.

5) Вычисляется радиус инерции, см, сечения по предельной гибкости $[\lambda] = 150$:

$$r = \frac{H_c^p}{[\lambda]}, \quad (5)$$

6) Рассчитывают размеры сечения стойки [5, 6]:

$$a_{тр} = \frac{r}{a_x}; b_{тр} = \frac{r}{a_y}, \quad (6)$$

где a_x и a_y — коэффициенты формы, $a_x = 0,41$; $a_y = 0,52$.

7) По принятым размерам a и b рассчитывается площадь сечения стойки:

$$F_c = 2 \cdot a \cdot \delta_1 + 2 \cdot (b - 2 \cdot \delta_1) \cdot \delta_2 \geq F_{тр}, \quad (7)$$

где δ_1 и δ_2 — толщины стенок, соответствующие периметрам сечения.

8) Усилие в стяжке, кН, соединяющей основание стойки гидроподъемника с поворот-

ным шарниром оборудования, которое будет иметь максимальное значение при угле подъема аппарата φ около 50° , рассчитывается:

$$S_{\text{сг}} = N_{\text{с}} \cdot \cos\beta - F_{\text{т}}, \quad (8)$$

где $N_{\text{с}}$ — усилие, кН, сжимающее стойку в момент подъема аппарата на угол φ :

$$N_{\text{с}} = \frac{5 \cdot G_0 \cdot (l_{\text{н.м.}} - 0,5 \cdot D \cdot \tan\varphi) \cdot \cos\varphi + 5 \cdot (G_0 + 2 \cdot G_{\text{к}}) \cdot l_{\text{с}} \cdot \cos\varphi}{l_{\text{с}} \cdot \sin\beta} + \frac{5 \cdot G_0 \cdot [(\frac{H_{\text{с}}}{2} - h_{\text{к}} - h_3) \cdot \cos\beta + l_{\text{с}} \cdot \cos\varphi]}{l_{\text{с}} \cdot \sin\beta}, \quad (9)$$

где D — диаметр аппарата, м,

β — угол наклона стойки к горизонту (определяется графически или по формуле $\beta = \frac{\arctg \sin\varphi}{(1 - \cos\varphi)}$);

$F_{\text{т}}$ — усилие трения между опорой стойки и фундаментом под нее, кН, $F_{\text{т}} = N_{\text{в}} \cdot f$;

$N_{\text{в}}$ — вертикальная составляющая усилия в стойке, кН, $N_{\text{в}} = N_{\text{с}} \cdot \sin\beta$;

f — коэффициент трения о фундамент.

9) Вычисляется усилие в тормозной оттяжке, кН, при посадке оборудования на фундамент в проектное вертикальное положение:

$$P_{\text{т}} = \frac{10 \cdot G_0 \cdot 0,6 \cdot D}{h_{\text{т}} \cdot \cos\alpha_{\text{т}}}, \quad (10)$$

где $h_{\text{т}}$ — высота крепления тормозной оттяжки на оборудовании, м;

$\alpha_{\text{т}}$ — угол наклона тормозной оттяжки к горизонту.

10) Подсчитывается усилие, кН, действующее на балку и балансирующую систему в начальный момент подъема оборудования при угле $\varphi_0 = 0$ без учета собственной массы балки:

$$P = \frac{10 \cdot G_0 \cdot \kappa_{\text{п}} \cdot \kappa_{\text{д}} \cdot l_{\text{н.м.}}}{l_{\text{с}}}, \quad (11)$$

11) Максимальный изгибающий момент, кН·с, в балке определяется:

$$M = \frac{P \cdot l}{4} + \frac{10 \cdot g \cdot l^2}{8}, \quad (12)$$

где l — рабочая длина балки, см (величиной l задаются в зависимости от поперечных размеров поднимаемого оборудования);

g — масса 1 см балки, т (принимается ориентировочно с учетом ранее назначенной массы балки G_0 и ее выбранной длины l , см, $g = \frac{G_0}{l}$).

12) Требуемый момент сопротивления поперечного сечения балки, см³, подсчитывается:

$$W_{\text{тр}} = \frac{M}{(m \cdot 0,1 \cdot R)}. \quad (13)$$

Результаты расчета такелажной оснастки для дальнейшего моделирования представлены в таблице 1 [7, 8].

Таблица 1. Результаты расчета такелажной оснастки

Параметр	Значение
Минимальная высота стоек гидравлического подъемника, м	65
Максимальное сжимающее усилие, кН	1671,1
Требуемая площадь поперечного сечения стойки, см ²	276
Расчетная высота стойки, м	45
Радиус инерции сечения по предельной гибкости, см	30
Размеры сечения стойки:	
$a_{\text{тр}}$, см	73,2
$b_{\text{тр}}$, см	57,7
Площадь сечения стойки, см ²	324
Толщина стенок стойки	
δ_1 , мм	15
δ_2 , мм	15
Усилие, действующее на балку и балансирующую систему, кН	830,7
Максимальный изгибающий момент в балке, кН·см ²	364856
Требуемый момент сопротивления поперечного сечения балки, см ²	20440

Исходя из полученных расчетов такелажной оснастки при подъеме вертикального оборудования гидравлическим подъемником, получили необходимые данные для построения моделей, которые состоят из деталей (рисунок 3):

— фундаментной площадки с монтажным шарниром для колонны;

— фундаментной площадки для двух стоек гидроподъемника;
— две стойки гидроподъемника;
— колонного аппарата, состоящего из днища и цилиндра;
— седла;
— каретки с домкратом.

1 — стойка гидropодъёмника; 2 — фундамент площадки для двух стоек; 3 — колонный аппарат; 4 — седло; 5 — фундамент площадки с монтажным шарниром для колонны; 6 — общая сборка

Рисунок 3. 3D модель процесса монтажа оборудования

После построения общей сборки провели анализ движения с помощью SolidWorks Simulation и SolidWorks Motion, чтобы в дальнейшем получить данные по напряжениям и деформациям в узлах монтажа вертикального аппарата гидравлическим подъемником [9].

Далее после вычисления всей симуляции процесса монтажа на расчёт в программе SolidWorks получили данные.

Для получения более точной информации об узлах в сборке были выбраны три точки во времени при подъеме:

- первая точка, положение при 10°;
- вторая точка, положение при 50°;
- третья точка, положение при 85°.

Полученные эпюры напряжений и деформаций в узлах представлены в таблице 2.

Таблица 2. Эпюры напряжений и деформаций в узлах.

Узел сопряжения	Эпюра напряжения	Эпюра деформации
Колонна		
Подъемник с седлом		
Стойка		
Фундамент и шарнирное соединение		

В ходе анализа полученных эпюр напряжений и деформаций в узлах процесса подъема колонного аппарата были выявлены самые

опасные участки. Опасные участки в узлах конструкции представлены в таблице 3.

Таблица 3. Опасные участки в узлах конструкции

Максимальные напряжения	Максимальные деформации
Колонный аппарат	
1. В опоре колонны вокруг крепления шарнира	1. Низ опоры в колонне
	2. В кольце шарнира
Подъемник с седлом	
1. Вокруг места крепления седла и поперечной балки подъемника	1. По всей длине балки
	2. В креплении седла и балки
Стойка	
1. В начале стойки в местах зацепления кулачков кареток	1. В начале стойки по его ребрам
	2. В шарнирном креплении стойки и фундамента
Фундамент подъемника и шарнирное крепление колонны	
1. В штифтах крепления стойки	1. По грани фундамента с двух сторон
	2. Все крепления стойки

Выводы

На этапе конструкторской подготовки производства определены максимальные напряжения и деформации в узлах конструкции при подъеме колонного оборудования гидравлическим подъемником на основе расчета параметров технологического процесса монтажа оборудования с использованием нагрузок

(SolidWorks Motion) и структурного анализа (SolidWorks Simulation). Обоснован вывод о характере статических нагрузок в узлах конструкции, что позволяет дать рекомендации по разработке мероприятий по снижению или исключению их негативного влияния на срок службы и эксплуатацию ректификационной колонны и гидравлического подъемника.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Молоканов Ю.К., Харас З.Б. Монтаж аппаратов и оборудования нефтяной и газовой промышленности. М.: Недра, 1982. 391 с.
2. Гальперин М.П., Артемьев В.И., Местечкин Л.М. Монтаж технологического оборудования нефтеперерабатывающих заводов. М.: Стройиздат, 1982. 351 с.
3. Мухаметзянов З.Р., Котов М.Ю., Якупов А.А., Мухаметзянов И.З. Особенности моделирования технологии строительства объектов трубопроводного транспорта // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2011. № 2. С. 8–10.
4. Mukhametzyanov Z.R., Rubtsov A.V., Valiev A.S. Estimation of Influence Character of Installation Loads on Degree of Corrosive Wear of Column Apparatus // Proceedings of the 4th International Conference «Industrial Engineering». Moscow, Russia. 2018. P. 1999–2006. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_215.
5. Харас З.Б. Подъем методом поворота ректификационных колонн весом до 300 тонн // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1963. № 9. С. 16–19.
6. Матвеев В.В., Крупин Н.Ф. Примеры расчета такелажной оснастки. М.: Стройиздат, 1987. 287 с.
7. Харас З.Б. Справочник строителя. Подъем и перемещение грузов. М.: Стройиздат, 1987. 135 с.
8. Харас З.Б. Монтаж аппаратов нефтяной и газовой промышленности. М.: Недра, 1974. 335 с.
9. Руководство по монтажу вертикальных аппаратов гидродъемником грузоподъемностью 400 тонн. М.: ЦБТИ, 1977. 54 с.

REFERENCES

1. Molokanov Yu.K., Kharas Z.B. *Montazh apparatov i oborudovaniya neftyanoi i gazovoi promyshlennosti* [Installation of Apparatus and Equipment for the Oil and Gas Industry]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 391 p. [in Russian].
2. Galperin M.P., Artemev V.I., Mestechkin L.M. *Montazh tekhnologicheskogo oborudovaniya neftepererabatyvayushchikh zavodov* [Installation of Processing Equipment of Oil Refineries]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 351 p. [in Russian].
3. Mukhametzyanov Z.R., Kotov M.Yu., Yakupov A.A., Mukhametzyanov I.Z. Osobennosti modelirovaniya tekhnologii stroitel'stva ob'ektov truboprovodnogo transporta [Features of Modeling Technology for the Construction of Pipeline Transport Facilities]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya* — *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2011, No. 2, pp. 8–10. [in Russian].
4. Mukhametzyanov Z.R., Rubtsov A.V., Valiev A.S. Estimation of Influence Character of Installation Loads on Degree of Corrosive Wear of Column Apparatus. Proceedings of the 4th International Conference «Industrial Engineering». Moscow, Russia, 2018. pp. 1999–2006. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_215.
5. Kharas Z.B. Pod'em metodom povorota rektifikatsionnykh kolonn vesom do 300 tonn [Distillation Lifting of Distillation Columns Weighing up to 300 Tons]. *Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve* — *Mounting and Special Works in Construction*, Journal, 1963, No. 9, pp. 16–19. [in Russian].

6. Matveev V.V., Krupin N.F. *Primery rascheta takelazhnoi osnastki* [Examples of Rigging Calculation]. Moscow, Stroizdat Publ., 1987. 287 p. [in Russian].

7. Kharas Z.B. *Spravochnik stroitelya. Pod'em i peremeshchenie грузов* [Reference Builder. Lifting and Moving Loads]. Moscow, Stroizdat Publ., 1987. 135 p. [in Russian].

8. Kharas Z.B. *Montazh apparatov neftyanoi i gazovoi promyshlennosti* [Installation of Apparatus for the Oil and

Gas Industry]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 335 p. [in Russian].

9. *Rukovodstvo po montazhu vertikal'nykh apparatov gidropod'emnikom gruzopod'emnost'yu 400 tonn* [Installation Manual for Vertical Devices with a Hydraulic Lift of 400 Tons]. Moscow, TsBTI Publ., 1977. 54 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Шарипов Даниил Константинович, магистрант кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Daniil K. Sharipov, Undergraduate Student of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: kyban969@gmail.com

Мухаметзянов Зинур Ришатович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Zinur R. Mukhametzyanov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: zinur-1966@mail.ru

Хакимов Тимур Зинурович, студент кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Timur Z. Khakimov, student of Oil Processing Equipment Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: Khakimov9393@mail.ru