

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-5-144-151

УДК 622.692; 621.544

И.Н. Якшибаев (Правохеттинское ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Югорск», п. Правохеттинский, Ямало-Ненецкий АО, Российская Федерация),
И.Э. Лукьянова (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

ВЫБОР ТИПА УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИИ ПОНТОНА РАДИАЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Ilnar N. Yakshibaev (Gazprom Transgaz Yugorsk LLC, Pravokhettinsky Linear Production Management of Gas Pipelines, p. Pravokhettinskiy, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Russian Federation), **Irina E. Lukyanova** (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

CHOICE OF NODE CONNECTION TYPE IN RADIAL TYPE PONTOON DESIGN FOR CYLINDRICAL VERTICAL STEEL TANKS

Введение

Хранение нефти и нефтепродуктов в цилиндрических вертикальных стальных резервуарах сопровождается процессами потери продукта хранения от испарения. С целью сокращения объемов потерь от испарения резервуары оснащаются плавающими покрытиями. В резервуарах со стационарной кровельной частью распространено применение в качестве плавающего покрытия алюминиевых понтонов поплавкового типа.

На основании математического моделирования с использованием программных комплексов разработан понтон из алюминиевых сплавов поплавкового типа с радиальным расположением силовых профилей. Несущая конструкция состоит из радиально расположенных силовых профилей, борта с затвором, опорного центрального кольца, цилиндрических поплавков и опорных стоек. Понтон также может оснащаться дополнительными конструктивными элементами и оборудованием.

Для изготовления понтонов следует применять коррозионностойкие материалы, основной материал несущей конструкции понтона - алюминиевые сплавы.

Background

Storage of oil and oil products in cylindrical vertical steel tanks is accompanied by processes of loss of the storage product from evaporation. In order to reduce evaporation losses, the tanks are equipped with floating coatings. In tanks with a fixed roof part, the use of float-type aluminum pontoons as a floating coating is widespread.

Based on mathematical modeling using software, a pontoon was developed from aluminum alloys of a float type with a radial arrangement of power profiles. The supporting structure consists of radially arranged power profiles, a bead with a shutter, a support central ring, cylindrical floats and support racks. The pontoon can also be equipped with additional structural elements and equipment.

For the manufacture of pontoons corrosion-resistant materials should be used, the main material of the supporting structure of the pontoon - aluminum alloys.

Исследование вопросов прочности на основе сравнения характеристик несущего каркаса понтонов из алюминиевых сплавов различных конструктивных типов свидетельствует о преимуществах понтона радиально-го типа.

Цели и задачи

Определение оптимального типа соединения конструктивных элементов понтона. Анализ работы схемы при жестком и шарнирном сопряжениях несущих элементов понтона на основании расчета на прочность понтона для резервуара объемом 5000 м³.

Результаты

По результатам экспериментальных и теоретических исследований проведена оптимизация конструктивной схемы понтона путем оценки соединения узлов силовых профилей и опорного кольца. На основании расчета на прочность выбрано шарнирное соединение несущих элементов.

The study of strength issues based on a comparison of the characteristics of the supporting frame of pontoons made of aluminum alloys of various structural types indicates the advantages of a radial-type pontoon.

Aims and Objectives

Determination of the optimal type of connection of structural elements of the pontoon. Analysis of the operation of the circuit during rigid and articulation of the supporting elements of the pontoon based on the calculation of the strength of the pontoon for a tank of 5000 m³.

Results

Based on the results of experimental and theoretical studies, the structural design of the pontoon was optimized by evaluating the connection of the nodes of the power profiles and the support ring. Based on the calculation of the strength bearing elements swivel is selected.

Ключевые слова: резервуар; понтон; алюминий; нагрузка; конструкция; узловое соединение

Key words: tank; pontoon; aluminum; load; structure; nodal connection

Вертикальные стальные резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов с целью сокращения потерь от испарения оснащаются плавающими покрытиями - понтонами. Понтоны из алюминиевых сплавов являются одним из наиболее распространенных типов понтонов [1].

На основании математического моделирования с использованием программных комплексов SCAD Office и Flow Vision разработан понтон из алюминиевых сплавов поплавкового типа с радиальным расположением силовых профилей. Прочностные параметры предложенного понтона при расчете показывают большие значения запаса прочности в сравнении с понтоном с параллельным расположением силовых профилей. Для повышения эксплуатационной надежности

необходимо определить оптимальный тип соединения конструктивных элементов понтона.

Экспериментальные исследования подтвердили характер работы радиальной конструктивной схемы понтона, полученный с помощью исследований на математической модели, и равномерное распределение усилий по несущим элементам покрытия по сравнению со схемой традиционного исполнения.

В целях оптимизации разработанной схемы поставлена задача - выполнение анализа работы схемы при жестком и шарнирном сопряжениях несущих элементов понтона. Для анализа работы схемы произведем расчет на прочность. Исходные данные для расчета приняты для вертикального стального резервуара с понтоном РВСП-5000 (таблица 1) [2-4].

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Конструктивный элемент	Радиальный (узлы - шарнир)	Радиальный (узлы - заделка)
Профиль силовой	швеллер 30 x 50 x 30 x 4, 24 шт.	швеллер 30 x 50 x 30 x 4, 24 шт.
Периферийное кольцо	фигурный профиль 400 x 10 мм, диаметр понтона $D = 22,4$ м	фигурный профиль 400 x 10 мм, $D = 22,4$ м
Опорное кольцо	швеллер 8П ГОСТ 8240-89	швеллер 8П ГОСТ 8240-89
Стойки опорные	$H = 1800$ мм, $d = 40$ мм, толщина стенки 2,5 мм	$H = 1800$ мм, $d = 40$ мм, толщина стенки 2,5 мм
Настил листовой	листовой прокат толщиной $b = 0,5$ мм	листовой прокат толщиной $b = 0,5$ мм

Расчеты на прочность произведем для понтона радиального типа с шарнирным соединением узлов и для понтона радиального типа с жестким соединением узлов. Расчетное сочетание нагрузок для обоих типов понтонов принимаем одинаковое, в соответствии с нормативной литературой [5]:

- 1) собственный вес и равномерно распределенная нагрузка;
- 2) случай потопления - нагрузка от нефтепродукта на всю поверхность;
- 3) налив продукта хранения при крене - нефтепродукт распределен на половине поверхности понтона.

Рассмотрим *понтон радиальной конструктивной схемы с шарнирным сопряжением силовых профилей*.

Сечения силового профиля определены и рассчитаны с применением программы SCAD Office.

Расчет нагрузки на понтон производим по наибольшему расстоянию между силовыми профилями.

Внешний периметр понтона

$$P = \pi \cdot D = 3,14 \cdot 22,4 = 70,34 \text{ м}, \quad (1)$$

где D - диаметр понтона, м.

Максимальное расстояние между силовыми профилями

$$C = \frac{P}{n} = \frac{70,34}{24} = 2,93 \text{ м} \approx 3 \text{ м}, \quad (2)$$

где P - внешний периметр понтона, м;

n - количество силовых профилей, шт.

Расчет первого сочетания (собственный вес и равномерно распределенная нагрузка 0,24 кПа).

Понтон загружен равномерно распределенной нагрузкой 0,03 кН/м, также воздействие оказывает собственный вес 0,02 кН/м.

Общая нагрузка на понтон:

$$q = q_1 + q_{св}, \quad (3)$$

где q_1 - равномерно распределенная нагрузка на понтон, кН/м;

$q_{св}$ - нагрузка от собственного веса понтона, кН/м.

$$q = 0,03 + 0,02 = 0,05 \text{ кН / м}.$$

Максимальный изгибающий момент (рисунок 1)

$$M_{\max} = \frac{ql^2}{8}, \quad (4)$$

где l - длина силового профиля, м.

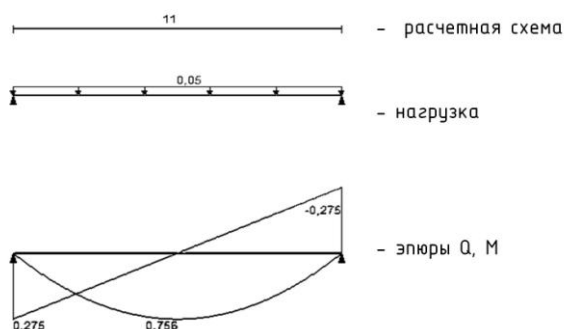


Рисунок 1. Эпюры внутренних усилий от действия нормативной нагрузки на понтон шарнирной радиальной схемы

$$M_{max} = \frac{0,05 \cdot 11^2}{8} = 0,76 \text{ кН} / \text{м}.$$

Максимальное значение поперечной силы (рисунок 1)

$$Q_{max} = \frac{ql}{2}, \quad (5)$$

$$Q_{max} = \frac{0,05 \cdot 11}{2} = 0,275 \text{ кН}.$$

Определим прочность при действии изгибающего момента. Расчетное сопротивление профиля 55 Н/мм² [5].

Расчет силового профиля на прочность

$$\frac{M_{max}}{W_{n,min} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (6)$$

где M_{max} - максимальный изгибающий момент, Н/м;

$W_{n, min}$ - минимальный момент сопротивления, м³;

R_y - расчетное сопротивление алюминия на изгиб, Н/м²;

γ_c - коэффициент условий работы.

$$\frac{0,76 \cdot 10^3}{6,1 \cdot 10^{-6} \cdot 55 \div 10^{-6} \cdot 1} = 0,23 < 1,$$

сечение удовлетворяет нормативным требованиям по несущей способности.

Расчет на устойчивость при изгибе

$$\frac{M_{max}}{\varphi_b \cdot W_{n,min} \cdot R_y \cdot \gamma_c} < 1. \quad (7)$$

Здесь M_{max} - максимальный изгибающий момент, Н/м;

φ_b - коэффициент устойчивости при изгибе.

Коэффициент устойчивости при изгибе

$$\varphi_b = \varphi_1 \leq 0,667, \quad (8)$$

где φ_1 - коэффициент устойчивости при центральном сжатии;

$$\varphi_1 = 1,4\psi \frac{I_x}{I_y} \left(\frac{h}{l_{ef}} \right)^2 \frac{E}{R}, \quad (9)$$

где ψ - коэффициент, вычисляемый согласно нормативным требованиям [5];

I - момент инерции относительно оси, см⁴;

h - полная высота сечения, см;

l_{ef} - расчетная длина балки или консоли, см;

E - модуль упругости алюминия, кН/см³;

R - расчетное сопротивление алюминия на изгиб, Н/см²;

Коэффициент ψ , вычисляемый согласно нормативным требованиям, определяем в зависимости от параметра α

$$\alpha = 1,54 \frac{I_t}{I_y} \left(\frac{l_{ef}}{h} \right)^2, \quad (10)$$

$$\alpha = 1,54 \frac{0,18}{3,5} \left(\frac{100}{5} \right)^2 = 38,33.$$

Следовательно, $\psi = 2,79$ [5].

Коэффициент устойчивости при центральном сжатии по формуле (9)

$$\varphi_1 = 1,41 \cdot 2,79 \cdot \frac{3,5}{15,2} \cdot \left(\frac{5}{1100} \right)^2 \cdot \frac{700}{55} = 1,84.$$

Расчет на устойчивость при изгибе

$$\frac{0,76 \cdot 10^3}{1,84 \cdot 6,1 \cdot 10^{-6} \cdot 55 \div 10^{-6} \cdot 1} = 0,12 < 1,$$

условие устойчивости выполняется.

Проверка прочности по поперечному усилию:

$$\frac{Q_{\max} \cdot s}{I_x \cdot R_s \cdot \gamma_c} < 1, \quad (11)$$

$$\frac{0,275 \cdot 10,2}{15,2 \cdot 7,5 \cdot 1} = 0,03 < 1.$$

Сечение силового профиля отвечает требованиям на действие нормативной нагрузки.

Расчет второго сочетания нагрузок - нагрузки от веса продукта хранения на всю поверхность понтона при потоплении

Проверка прочности по поперечному усилию (11):

$$\frac{Q_{\max} \cdot s}{I_x \cdot R_s \cdot \gamma_c} = \frac{0,33 \cdot 10,2}{15,2 \cdot 7,5} = 0,03 < 1.$$

Сечение силового профиля отвечает требованиям на действие нагрузки при потоплении.

Расчет третьего сочетания (нефтепродукт на половину поверхности). Определение нагрузки в случае перекоса понтона и действия нагрузки от продукта хранения на половину поверхности понтона

Проверка прочности по поперечному усилию (11):

$$\frac{Q_{\max} \cdot s}{I_x \cdot R_s \cdot \gamma_c} = \frac{0,17 \cdot 10,2}{15,2 \cdot 7,5} = 0,015 < 1.$$

Сечение силового профиля отвечает требованиям на действие нагрузки при крене.

Рассмотрим понтон радиальной конструктивной схемы с жестким сопряжением силовых профилей. Геометрические характеристики сечения, расчетное сочетание нагрузок принимаем такие же, как для случая с шарнирным сопряжением силовых профилей.

Расчет первого сочетания (собственный вес и равномерно распределенная нагрузка 0,24 кПа). Проводим расчет и проверку прочности по поперечному усилию аналогично расчету при шарнирном соединении.

Проверка прочности по поперечному усилию (11):

$$\frac{Q_{\max} \cdot s}{I_x \cdot R_s \cdot \gamma_c} = \frac{0,275 \cdot 10,2}{15,2 \cdot 7,5} = 0,1 < 1.$$

Сечение силового профиля отвечает требованиям на действие нормативной нагрузки.

Расчет второго сочетания (нефтепродукт на всю поверхность 20 т). Определение нагрузки в случае потопления и действия 20 т продукта хранения на всю поверхность понтона

Проверка прочности по поперечному усилию (11):

$$\frac{Q_{\max} \cdot s}{I_x \cdot R_s \cdot \gamma_c} = \frac{0,33 \cdot 10,2}{15,2 \cdot 7,5} = 0,03 < 1.$$

Сечение силового профиля отвечает требованиям на действие нагрузки при потоплении.

Расчет третьего сочетания (нефтепродукт на половину поверхности 10 т). Определение нагрузки в случае перекоса понтона и действия 10 т продукта хранения на половину поверхности (12, 13, 14)

Проверка прочности по поперечному усилию (11):

$$\frac{Q_{\max} \cdot s}{I_x \cdot R_s \cdot \gamma_c} = \frac{0,165 \cdot 10,2}{15,2 \cdot 7,5} = 0,01 < 1.$$

Сечение силового профиля отвечает требованиям на действие нагрузки при крене.

Также рассмотрим понтон традиционной конструктивной схемы с шарнирным сопряжением силовых профилей.

Геометрические характеристики сечения, расчетное сочетание нагрузок принимаем такие же, как для случая с шарнирным сопряжением силовых профилей:

1) собственный вес и равномерно распределенная нагрузка 0,24 кПа;

2) случай потопления - нагрузка от нефтепродукта на всю поверхность;

3) налив продукта хранения при крене - нефтепродукт на половину поверхности понтона.

Расчет первого сочетания (собственный вес и равномерно распределенная нагрузка 0,24 кПа)

Проверка прочности по поперечному усилию (11):

$$\frac{Q_{\max} \cdot s}{I_x \cdot R_s \cdot \gamma_c} = \frac{0,74 \cdot 10,2}{15,2 \cdot 7,5} = 0,1 < 1.$$

Сечение силового профиля отвечает требованиям на действие нормативной нагрузки.

Расчет второго сочетания (нефтепродукт на всю поверхность 20 т)

Произведем расчет по несущей способности, по формуле (6):

$$\frac{M_{\max}}{W \cdot R_y \cdot \gamma_c} = \frac{240,2}{6,1 \cdot 20,0 \cdot 1,0} = 1,96 > 1.$$

Сечение силового профиля не отвечает требованиям при действии нагрузки при потоплении.

*Расчет третьего сочетания (нефтепродукт действует на половину поверхности 10 т).
Определение нагрузки в случае перекоса понтона и действия 10 т продукта хранения на половину поверхности*

Проверка прочности по поперечному усилию (11):

$$\frac{Q_{\max} \cdot s}{I_x \cdot R_s \cdot \gamma_c} = \frac{0,775 \cdot 10,2}{15,2 \cdot 7,5} = 0,069 < 1.$$

Условие выполнено.

Произведем проверку понтона на плавучесть:

$$T_0 < H, \quad T_0 = \frac{P + P_{\text{конд.}}}{\rho \pi R^2}, \quad (12)$$

где T_0 - глубина погружения, м;

H - высота борта с затвором, 0,3 м;

P - масса алюминиевого понтона, 2250 кг;

$P_{\text{конд.}}$ - масса конденсата на поверхности понтона, 1816 кг;

ρ - плотность жидкости, 700 кг/м³;

R - радиус понтона, 11,2 м.

$$T_0 = \frac{2250 + 1816}{700 \cdot 3,14 \cdot 11,2^2} = 0,05 \text{ м} < 0,3 \text{ м}.$$

Плавучесть понтона обеспечена.

Произведем сравнение максимальных изгибающих моментов, возникающих в исследуемых конструктивных схемах при одинаковой нормативной нагрузке, - в радиальной схеме с шарнирным соединением узлов и в радиальной схеме с жестким соединением узлов:

$$M_{\max} = \frac{M_{\max.}^{\text{шарн.}} - M_{\max.}^{\text{жестк.}}}{M_{\max.}^{\text{шарн.}}}, \quad (13)$$

где $M_{\max.}^{\text{шарн.}}$ - максимальный изгибающий момент в шарнирно соединенной схеме;

$M_{\max.}^{\text{жестк.}}$ - максимальный изгибающий момент в жестко соединенной схеме.

$$M_{\max} = \frac{0,76 - 0,504}{0,76} \cdot 100\% = 33,68\%.$$

На основании полученных результатов выбираем шарнирное соединение несущих элементов. Произведем сравнение с понтонном традиционного исполнения:

$$M_{max} = \frac{M_{max}^{trad.} - M_{max}^{шарн.}}{M_{max}^{trad.}}, \quad (14)$$

где $M_{max}^{trad.}$ - максимальный изгибающий момент в традиционной схеме.

$$M_{max} = \frac{1,15 - 0,76}{1,15} \cdot 100\% = 33,91\%.$$

Список литературы

1. Гадельшин Р.З., Лукьянова И.Э. Повышение надежности плавающих покрытий резервуаров. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. 239 с.
2. ГОСТ 21631-76*. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Введ. 01.07.77. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 30 с.
3. ГОСТ 8617-81. Профили, прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Введ. 01.01.83. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1987. 30 с.
4. ГОСТ Р 21.1101-2013. Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации. М.: Стандартинформ, 2014. 55 с.
5. СП 128.13330.2012. Алюминиевые конструкции. Актуализированная редакция СНиП 2.03.06-85. М.: Минрегион России, 2012. 91 с.

Результаты расчета подтверждают преимущества понтона радиального типа по сравнению с шарнирным соединением силовых элементов понтона.

Вывод

Обосновано, что разработанную радиальную конструкцию алюминиевого понтона поплавкового типа вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов целесообразно конструировать и изготавливать с шарнирными узлами соединения несущих элементов.

References

1. Gadel'shin R.Z., Lukyanova I.E. *Povyshenie nadezhnosti plavayushchikh pokrytii rezervuarov* [Improving the Reliability of Floating Reservoir Coatings]. Ufa, UGNTU Publ., 1999. 239 p. [in Russian].
2. *GOST 21631-76*. Listy iz alyuminiya i alyuminiyevykh splavov. Tekhnicheskie usloviya. Vved. 01.07.77.* [State Standard 21631-76*. Sheets of Aluminum and Aluminum Alloys. Technical Requirements. Enacted 01.07.77]. Moscow, IPK izd-vo standartov, 2002. 30 p. [in Russian].
3. *GOST 8617-81. Profili, pressovannye iz alyuminiya i alyuminiyevykh splavov. Tekhnicheskie usloviya. Vved. 01.01.83.* [State Standard 8617-81. Profiles Extruded from Aluminum and Aluminum Alloys. Technical Requirements. Enacted 01.01.83]. Moscow, IPK izd-vo standartov, 1987. 30 p. [in Russian].
4. *GOST R 21.1101-2013. Sistema proektnoy dokumentatsii dlya stroitel'stva. Osnovnye trebovaniya k proektnoy i rabochey dokumentatsii* [State Standard R 21.1101-2013. System of Design Documents for Construction. Basic Requirements for Design and Working Documentation]. Moscow, Standartinform, 2014. 55 p. [in Russian].
5. *SP 128.13330.2012. Alyuminiyevye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.03.06-85* [SP 128.13330.2012. Aluminum Constructions. Updated Edition of SNiP 2.03.06-85]. Moscow, Minregion Rossii, 2012. 91 p. [in Russian].

Авторы

• Якшибаев Ильнар Наилевич
ООО «Газпром трансгаз Югорск»
Правохеттинское Линейное производственное
управление магистральных газопроводов
Начальник службы по хранению
материально-технических ресурсов
и содержанию объектов
Российская Федерация, 629745,
Ямало-Ненецкий АО, п. Правохеттинский
e-mail: rb.stroitel@gmail.com

• Лукьянова Ирина Эдуардовна, доктор
технических наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Сооружение и ремонт
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: iri-lou@mail.ru

The Authors

• Yakshibaev Ilnar N.
Gazprom Transgaz Yugorsk LLC
Pravokhettinsky Linear Production Management
of Gas Pipelines
Head of Storage of Material and Technical
Resources and Objects Maintenance Department
p. Pravokhettinskiy, Yamalo-Nenets Autonomous
Okrug, 629745, Russian Federation
e-mail: rb.stroitel@gmail.com

• Lukyanova Irina E., Doctor of Engineering
Sciences, Associate Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Construction and Maintenance of Oil
and Gas Pipelines and Storages Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: iri-lou@mail.ru