Научная статья
Original article
УДК 621.6.658.5

ВЛИЯНИЕ УПЛОТНЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ НА ПОТЕРИ НА ИСПАРЕНИЕ ПРОДУКТА

INFLUENCE OF SEALING OF THERMAL INSULATION OF ISOTHERMAL RESERVOIRS ON THE EVAPORATION LOSS OF THE PRODUCT

Нафикова Эльвира Ильфировна, студент магистратуры 2 курс, факультет «Трубопроводного транспорта», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа
Мусин Артур Эдуардович, студент 4 курс, факультет «Горно-нефтяной», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа
Елкибаев Инсаф Мударисович, студент 4 курс, факультет «Горно-нефтяной», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

Nafikova Elvira Ilfirovna, 2nd year master's student, faculty of "Pipeline transport", Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa
Musin Artur Eduardovich, 4th year student, Faculty of Mining and Oil, Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa
Elkibaev Insaf Mudarisovich, 4th year student, Faculty of Mining and Oil, Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa

Аннотация: Статья посвящена исследованию влияния уплотнения тепловой изоляции изотермически резервуаров на потери на испарение продукта.

Вспученный перлит является наиболее распространенным материалом для теплоизоляции изотермических резервуаров. Однако, в результате температурных деформаций происходит уплотнение перлита, что в свою очередь приводит к увеличению радиального давления изоляции межстенного пространства на стенку внутреннего корпуса резервуара, и образование воздушной прослойки, что приводит дополнительный тепловой приток в резервуар. В данной работе оценено влияние уплотнения тепловой изоляции изотермического резервуара на потери на испарение продукта.

S u m m a r y : The article is dedicated to the study of the effect of sealing the thermal insulation of isothermal tanks on the evaporation loss of the product. Expanded perlite is the most common material for thermal insulation of insulated tanks. However, as a result of temperature deformations, perlite is compacted, which in turn leads to an increase in the radial pressure of the insulation of the interwall space on the wall of the inner tank body, and the formation of an air gap, which leads to additional heat inflow into the tank. In this paper, the effect of sealing the thermal insulation of an insulated tank on the evaporation loss of the product is evaluated.

Ключевые слова: Изотермический резервуар, перлит, тепловой приток, испарения, сжиженный природный газ, тепловая изоляция.

Keywords: Isothermal tank, perlite, heat input, evaporation, liquefied natural gas, thermal insulation.

Сжиженный природный газ (СПГ) стал более популярным в последние годы; и наиболее важными процессами являются сжижение и регазификация, которые облегчают процесс транспортировки на большие расстояния и делают поставки более доступными. Кроме того, процесс сжижения способствует развитию торговли СПГ за счет сокращения затрат и мощностей.

С 2020 по 2040 год мировые мощности СПГ-заводов вырастут почти в два раза, на 91%, и достигнут 886 млн т/г, но производство СПГ за тот же период увеличится всего на 79% — до 672 млн т/г. Таким образом, Rystad Energy прогнозирует образование избыточных мощностей по производству СПГ в мире.

Низкотемпературное хранение СПГ осуществляют в подземных, заглубленных и надземных изотермических резервуарах, конструкции которых принципиально отличаются от конструкций, широко применяемых резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, применением хладостойких материалов и наличием теплоизоляции.

Для изоляции сосудов со сжиженными газами широко используются порошкообразные теплоизоляционные материалы, имеющие низкий коэффициент теплопроводности.

Перлит – порода, представляющая из себя вулканическое стекло с основой из SiO2 (70-75%). При резком термоударном нагреве до температур 900-1200°С, вода, содержащаяся в породе, переходит в пар и вспучивает размягчённую породу. При этом объем перлита увеличивается в 5–20 раз.

Именно высокая пористость перлита обеспечивает его легкость и высокие теплоизоляционные свойства. Плотность вспученного перлита колеблется от 50 до 600 кг/м^3. Для изоляции аппаратов и машин низкотемпературных установок используется вспученный перлитовый порошок с плотностью при свободной насыпке 100 кг/м^3. Коэффициент теплопроводности перлита при температуре минус 90 °С по данным [74] составляет примерно0,025–0,035 Вт/м·К. Вспученный перлит дешев, негорюч и химически инертен.

Но высокопористая структура и открытая гидрофильная поверхность вспученного перлита обуславливает его высокое водопоглощение и гигроскопичность.

Для насыпной теплоизоляции характерны оседание и уплотнение, возникающие в результате деформации стенок при изменении температуры или под действием ее собственного веса. Оседание и уплотнение изоляции ухудшают ее эксплуатационные свойства и приводят к повышению притока тепла в резервуар.

Для решения этой проблемы насыпную изоляцию в двухстенных резервуарах применяют в комбинации с слоем эластичного материала, частично компенсирующего тепловые деформации конструкций. Компенсационный слой делают из эластичного минерального войлока или упругих стекловолоконных

матов.

Перлитовая засыпка имеет свойство уплотняться в результате термических деформаций резервуара, при этом возникает воздушное пространство между засыпкой и внутренним контейнером резервуара.

Для оценки влияния уплотнения тепловой изоляции ИР на потери на испарение продукта воспользуемся методикой предложенной Рахманиным А.И. [1,2].

Увеличение скорости испарения при нарушении тепловой изоляции резервуара определяется следующим образом:

$$\Delta m = m_1 - m_0 = \frac{q_1^{\text{упл}} \cdot (F - F_{\text{пр}}) + (q_{\text{пр}} - q_1) \cdot F_{\text{пр}}}{(r + c_{\text{рж}} \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{ж}}))}, \text{ кг/с} \quad (1)$$

где m_0 – количество жидкости, испаряющейся в единицу времени в результате теплопритока из окружающей среды, кг/с;

m_1 – количество жидкости, испаряющейся в единицу времени в результате изменившегося теплопритока из окружающей среды, кг/с;

$q_1^{\text{упл}}$ – значение плотности теплового потока через граничащую с жидкой фазой поверхность после уплотнения, Вт/м^2;

F – площадь стенки до уровня налива СПГ, м^2;

$F_{\text{пр}}$– площадь поверхности газовой прослойки, м^2;

$q_{\text{пр}}$ – плотность теплового потока через газовую прослойку, Вт/м^2;

q_1 – плотность теплового потока через поверхность теплообмена, граничащую с жидкой фазой, Вт/м^2.

Плотность теплового потока вычислим без учета конвективных процессов на внутренней поверхности стенки, вследствие их незначительности:

До усадки перлита:

$$q_1 = \frac{(T_{\text{н}} - T_{\text{ж}})}{R_1}, \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

где $R_1 = \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5}$, (м$^2 \cdot$К)/ Вт

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_н} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} = 19{,}567 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/ Вт}$$

$$q_1 = \frac{(T_н - T_ж)}{R_1} = 9{,}352 \text{ Вт/м}^2$$

После усадки перлита:

$$q_{1упл} = \frac{T_н - T_ж}{R_1}, \text{ Вт/м}^2$$

(3)

где $R_{1упл} = \frac{1}{\alpha_н} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_{3упл}} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5}$, (м$^2\cdot$К)/ Вт

Коэффициент теплопроводности перлита после уплотнения:

$$\lambda_{3упл} = \lambda_3 + 8\cdot 10^{-5}\cdot\rho_0\cdot\left(\frac{1}{\left(1-\frac{h_{пр}}{H_ж}\right)} - 1\right), \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

(4)

$$\lambda_{3упл} = \lambda_3 + 8\cdot 10^{-5}\cdot\rho_0\cdot\left(\frac{1}{\left(1-\frac{h_{пр}}{H_ж}\right)} - 1\right) = 0{,}044 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$R_{1упл} = \frac{1}{\alpha_н} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_{3упл}} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} = 19{,}374 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/ Вт}$$

$$q_{1упл} = \frac{(T_н - T_ж)}{R_1} = 9{,}446 \text{ Вт/м}^2$$

Передачу тепла воздушными прослойками вычислим повыражению:

$$q_{пр} = \frac{\Delta t}{\delta_{пр}}(\lambda_0 + \lambda_k + \alpha_л\delta_{пр}) = 11{,}642 \text{ Вт/м}^2 \qquad (5)$$

где Δt – разность температур поверхностей, ограничивающих прослойку;

$\delta_{пр}$ – толщина прослойки.

Для области естественной конвекции при $Gr\cdot Pr < 10^8$ может быть записано:

$$\frac{\lambda_0+\lambda_k}{\lambda_0} = 1 + \frac{m\cdot(Gr\cdot Pr)^r}{(Gr\cdot Pr)+n}$$

(6)

Для вертикальной прослойки толщиной до 200 мм, безразмерные коэффициенты принимают следующие значения: m = 0,0236; r = 1,393; n = $1{,}01 \cdot 10^4$.

$$Gr \cdot Pr = A \cdot p^2 \cdot \delta_{\text{пр}} \cdot \Delta t \cdot \frac{\left(1+\frac{B}{T}\right)^2}{\left(\frac{T}{100}\right)^4} = 1{,}304 \cdot 10^7,$$

(7)

где p – давление газа, кг/м^2;

T – средняя температура воздуха в прослойке, К;

Δt – разность температур поверхностей, ограничивающих прослойку, К.

Коэффициенты для воздуха равны A =38,3 (м·К^3) /кг^2 и B =113 К.

Подставляем полученное значение произведения $Gr \cdot Pr$ в уравнение (2):

$$\frac{\lambda_0+\lambda_k}{\lambda_0} = 1 + \frac{m \cdot (Gr \cdot Pr)^r}{(Gr \cdot Pr)+n} = 15{,}751$$

Вычисляем коэффициент передачи тепла конвекцией:

$$\lambda_k = \lambda_0 \cdot (12{,}636 - 1) = 0{,}23 \text{ Вт/(м·К)}$$

Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_л$ вычислим из классических соображений теплотехники:

$$\alpha_л = b \cdot C' = 0{,}155 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

(8)

По данным многочисленных источников при малых температурах излучающих поверхностей величина b колеблется в пределах 0,73...0,9. Примем среднее 0,815.

Коэффициент взаимного излучения C' для прослоек толщиной менее 200 мм составляет 0,13...0,25. Примем среднее 0,19.

Площадь поверхности газовой прослойки:

$$\text{F}_{\text{пр}} = \text{h}_{\text{пр}} \cdot \pi \cdot \text{D}_{\text{ж}}, \text{ м}^2$$

(9)

$$\text{F}_{\text{пр}} = \text{h}_{\text{пр}} \cdot \pi \cdot \text{D}_{\text{ж}} = 188{,}496 \text{ м}^2$$

Теперь можно вычислить потери продукта на испарение при образовании воздушной прослойки:

$$\Delta m = m_1 - m_0 = \frac{q_1^{упл} \cdot (F - F_{пр}) + (q_{пр} - q_1) \cdot F_{пр}}{\left(r + c_{рж} \cdot (T_{вых} - T_ж)\right)} = 6{,}541 \text{ кг/ч}$$

Увеличение испарения для других значений высоты воздушной прослойки, рассчитанное по уравнениям (1-9) представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1 – Зависимость увеличения испарения от высоты воздушной прослойки

Высота прослойки, м	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Отношение высоты прослойки к высоте резервуара, %	3	4,43	5,91	7,39	8,86	10,34	11,82	13,3	14,77
Увеличение испарения, кг/ч	6,5	9,9	13,2	16,5	19,9	23,3	26,6	31,1	33,5
Увеличение испарения, кг/сутки	156	237,6	316,8	396	477,6	559,2	638,4	722,4	804
Увеличение испарения, т/месяц	4,68	7,13	9,5	11,88	14,33	16,78	19,15	21,67	24,12

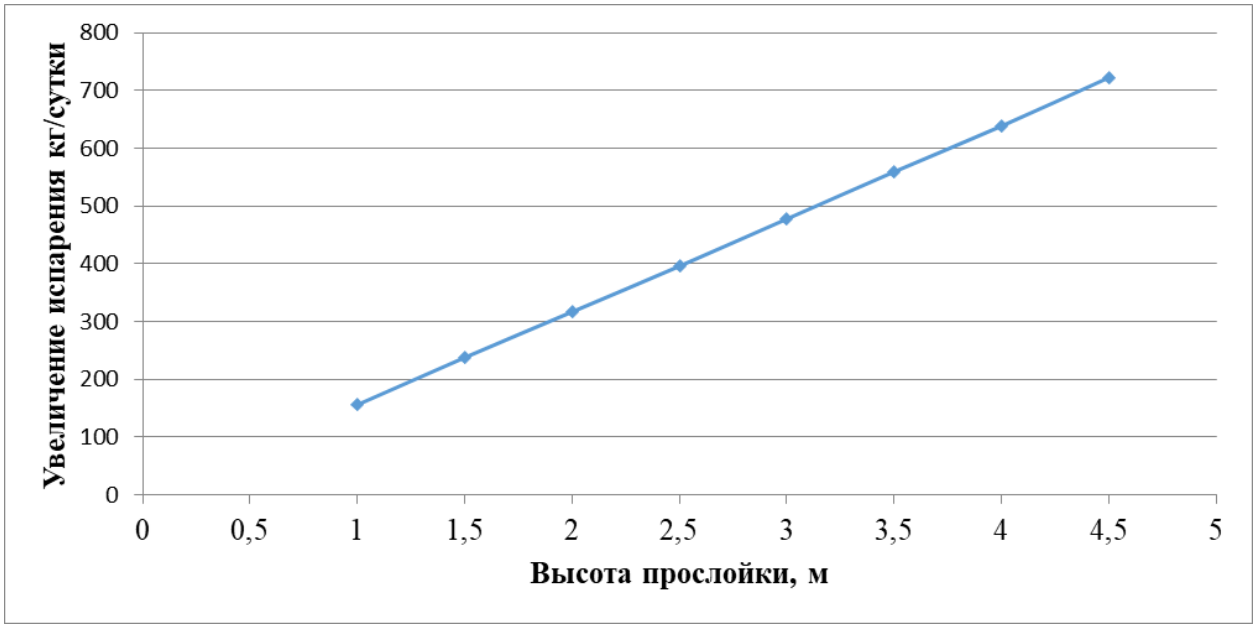

Рисунок 1 – График зависимости увеличения испарения от высоты прослойки

Как видно из представленных значений, скорость испарения СПГ при уплотнении перлита в 1% по высоте резервуара может увеличиться на 156 кг в сутки, что в месяц составит всего около 4,68 т, но при дальнейшей осадке, хотя бы до 15% потери продукта увеличатся до 24 т в месяц, что уже приведет к ощутимым экономическим потерям. Относительное увеличение скорости испарения при разной высоте прослойки составляет 1,5-8 % от нормального (0.025% от хранящейся массы жидкости), что не может привести к аварийным ситуациям, но должно учитываться при подборе количества и производительности компрессоров, осуществляющих откачку отпарного газа на дальнейшее повторное сжижение.

Литература

1. Рахманин А.И. Обеспечение безопасности резервуаров для хранения сжиженного природного газа с учетом негативных эксплуатационных факторов: дис. … канд. тех. наук / А.И. Рахманин. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2015. С. 137.
2. Рахманин А.И., Иванцова С.Г. Исследование теплового режима двустенных изотермических резервуаров с нарушенной тепловой изоляцией// Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2012. №2 (30).

3. СП 495.1325800.2020 Резервуары изотермические для хранения сжиженных газов. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/603121179 (дата обращения 20.03.2022).
4. Ханухов Х.М., Алипов А.В. Нормативно-техническое и организационное обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных конструкций. Предотвращение аварий зданий и сооружение: Сборник научных трудов, выпуск 10, Москва. 2011. С. 384-422.
5. EN 1473(2007). Installation and equipment for liquefied natural gas – Design of onshore installations. [Электронный ресурс]. URL: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/cb1d5d9a-be75-4132-a310-0510fb930515/en-1473-2007 (дата обращения 20.03.2022).
6. EN 14620. Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical flat bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and –165°C. [Электронный ресурс]. URL: https://www.en-standard.eu/csn-en-14620-1-design-and-manufacture-of-site-built-vertical-cylindrical-flatbottomed-steel-tanks-for-the-storage-of-refrigerated-liquefied-gases-with-operating-temperatures-between-0-c-and-165-c-part-1-general/ (дата обращения 20.03.2022).

Literature

1. Rakhmanin A.I. Ensuring the safety of storage tanks for liquefied natural gas, taking into account negative operational factors: Cand. … cand. those. Sciences / A.I. Rakhmanin. - M .: Russian State University of Oil and Gas. THEM. Gubkin. 2015, p. 137.
2. Rakhmanin A.I., Ivantsova S.G. Investigation of the thermal regime of double-walled isothermal tanks with broken thermal insulation// Pipeline transport: theory and practice. 2012. No. 2 (30).
3. SP 495.1325800.2020 Isothermal tanks for storage of liquefied gases. Design rules. [Electronic resource]. URL: https://docs.cntd.ru/document/603121179 (accessed 20.03.2022).

4. Khanukhov Kh.M., Alipov A.V. Regulatory, technical and organizational support for the safe operation of tank structures. Prevention of accidents in buildings and construction: Collection of scientific papers, issue 10, Moscow. 2011. S. 384-422.
5. EN 1473(2007). Installation and equipment for liquefied natural gas – Design of onshore installations. [Electronic resource]. URL: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/cb1d5d9a-be75-4132-a310-0510fb930515/en-1473-2007 (Accessed 03/20/2022).
6. EN 14620. Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical flat bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165°C. [Electronic resource]. URL: https://www.en-standard.eu/csn-en-14620-1-design-and-manufacture-of-site-built-vertical-cylindrical-flatbottomed-steel-tanks-for-the-storage-of-refrigerated-liquefied-gases-with-operating-temperatures-between-0-c-and-165-c-part-1-general/ (Accessed 03/20/2022).

© Нафикова Э.И., Мусин А.Э., Елкибаев И.М., 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №5/2022.

Для цитирования: Нафикова Э.И., Мусин А.Э., Елкибаев И.М., ВЛИЯНИЕ УПЛОТНЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ НА ПОТЕРИ НА ИСПАРЕНИЕ ПРОДУКТА// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №5/2022.