

УДК 621.5

Оценка термоциклической прочности баллона с криогенной заправкой

Д-р техн. наук А. И. ДОВГЯЛЛО¹, канд. техн. наук Д. А. УГЛАНОВ²,
А. Б. ШИМАНОВА³, А. А. ШИМАНОВ⁴

¹d.a.i@mail.ru, ²dmitry.uglanov@mail.ru, ³a_tsapkova@mail.ru, ⁴tema444st@mail.ru

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва

В статье приводится решение задачи определения напряжений в стенке баллона с криогенной заправкой. Для решения использован метод расчета нестационарной теплопроводности в классическом виде с учетом методики нахождения термоупругих напряжений в стенках трубопроводов при условиях теплового удара. Было исследовано влияние толщины стенки баллона и коэффициента теплоотдачи в газовой полости баллона. Анализ полученных данных позволяет заключить, что напряжения в стенках баллона различной толщины на протяжении всего процесса регазификации криопродукта, обусловленные как термическим воздействием, так давлением в баллоне, не превышают величины допускаемого напряжения, а максимальные эквивалентные напряжения в стенке баллона имеют место только в начальный момент времени. Рост напряжений от давления компенсируется снижением термических напряжений за счет выравнивания температуры стенки. В результате уменьшение эквивалентных напряжений приводит к более благоприятным условиям по силовым воздействиям в стенке баллона. Показано, что коэффициент теплоотдачи существенно влияет на время теплового воздействия, при этом термоудар приводит к резким температурным деформациям и, соответственно, напряжениям. Однако следует отметить, что уровень напряжений также ниже, чем при заправке компримированием.

Ключевые слова: баллон с криогенной заправкой, криопродукт, температурные напряжения, напряжения, обусловленные давлением.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 12.11.2021, принята к печати 27.01.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-37-43

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Довгялло А. И., Угланов Д. А., Шиманова А. Б., Шиманов А. А. Оценка термоциклической прочности баллона с криогенной заправкой // Вестник Международной академии холода. 2022. № 1. С. 37–43. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-37-43

Thermal cycling toughness estimation of a cylinder with cryogenic filling

D. Sc. A. I. DOVGIALLO¹, Ph. D. D. A. UGLANOV², A. B. SHIMANOVA³, A. A. SHIMANOV⁴

¹d.a.i@mail.ru, ²dmitry.uglanov@mail.ru, ³a_tsapkova@mail.ru, ⁴tema444st@mail.ru

Samara University

This paper provides a solution to the problem of determining the stresses in the wall of a cylinder with cryogenic filling. In order to decide the task, the method of calculating non-stationary thermal conductivity in the classical form is used, taking into account the method of finding thermoelastic stresses in the walls of pipelines under conditions of thermal shock. The effect of the cylinder wall thickness and the heat transfer coefficient in the gas cavity of the cylinder was investigated. Analysis of the data obtained allows us to conclude that stresses in the cylinder walls of various thicknesses throughout the entire process of cryoprodukt regasification, caused by both thermal exposure and pressure in the cylinder, do not exceed the allowable stress, and the maximum equivalent stresses in the cylinder wall occur only at the initial moment of time. The increase in pressure stresses is compensated for by a decrease in thermal stresses due to the equalization of the wall temperature. As a result, a decrease in equivalent stresses leads to more favorable conditions for force effects in the cylinder wall. The results indicate that the heat transfer coefficient significantly affects the time of thermal exposure, while thermal shock leads to sharp temperature deformations and, accordingly, stresses. However, it should be noted that the voltage level is also lower than with compression refueling.

Keywords: cylinder with cryogenic filling, cryoprodukt, temperature stresses, stresses caused by pressure.

Article info:

Received 12/11/2021, accepted 27/01/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-37-43

Article in Russian

For citation:

Dovgyallo A. I., Uglanov D. A., Shimanova A. B., Shimanov A. A. Thermal cycling toughness estimation of a cylinder with cryogenic filling. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 1. p. 37–43. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-37-43

Введение

В настоящее время, при наполнении баллонов компримированием (газом высокого давления), газы, как правило, нагреваются, при этом сам баллон за счет своей теплоемкости стенок греется намного меньше. При этом дополнительные температурные деформации и, соответственно, напряжения имеют определенные величины и знаки, которые накладываются на общую картину напряженного состояния и определяют эквивалентные напряжения в стенке.

При обратных тепловых воздействиях на стенку баллона, а это будет иметь место, когда внутри баллона температура ниже начальной температуры стенки, вопросы оценки напряженного состояния и далее термодинамической стойкости (баллоны периодически испытывают эти условия при заправке) требуют своих подходов к постановке задачи и решений.

Такая проблема относится к криогенным емкостям, термосам и различного назначения криогенным резервуарам.

Для существующих емкостей такие задачи решены. Они имеют свои гарантированные характеристики и ресурс, в том числе и по малоцикловой прочности [1]–[4].

Однако, перспектива создания универсального баллона [5], который может заправляться как компримированием, так и заправкой жидким криопродуктом, требует решения более сложных задач.

Наличие конечно-элементных программных комплексов типа PANTOCRATOR [6, 7] в принципе позволяет моделировать процессы в условиях двухфазных сред во временных координатах, но при проектировании и начальном этапе разработки таких баллонов необходим аналитический инструмент, который позволил бы простыми инженерными методиками предопределить характеристики баллона, с учетом прогнозирования термодинамических процессов, что в конечном итоге оценить надежность и его ресурс (циклостойкость в условиях заправки и использования криопродукта).

Решению указанной проблемы посвящается настоящая публикация.

Постановка задачи и методика расчетного исследования

Изучение тепловых процессов в баллоне с криогенной заправкой (БКЗ) (рис. 1) показало, что нагрев и испарение жидкого криопродукта, а также перераспределение газообразного и жидкого криопродукта по полостям БКЗ осуществляется в определенный промежуток времени. Изменение температур и давления в БКЗ при регазификации криопродукта представлено на рис. 2. Числовые значения этих параметров и их динамика позволяют ожидать невысокие напряжения в стенке БКЗ при ее взаимодействии с испаряющимся криопродуктом.

Представленные выше зависимости изменения параметров в баллоне были получены экспериментально

для умеренных уровней давления. Это ограничение было обусловлено требованиями техники безопасности несертифицированного баллона. Однако, полученные зависимости с точностью 5...7% подтвердили адекватность расчетной методики [9], что позволяет прогнозировать поведение криопродукта в баллоне с более высоким уровнем давления.

Задача определения температурных напряжений сводится к совместному решению задач прочности и нестационарной теплопроводности. Для решения этой задачи использован метод расчета теплопроводности при нестационарном режиме в классическом виде, предложенный Исаченко В. П. [10], с учетом методики нахождения термоупругих напряжений в стенках трубопроводов при условиях теплового удара [11].

Преимущество метода заключается в том, что представление температурных полей через полиномы по пространственным координатам дает возможность при определении среднеинтегральной температуры в формулах для термоупругих напряжений, вычисления сложных интегралов от специальных функций свести к интегрированию простых степенных функций [11, 12]. Схема распределения температурных напряжений, возникающих в стенке БКЗ, показана на рис. 3.

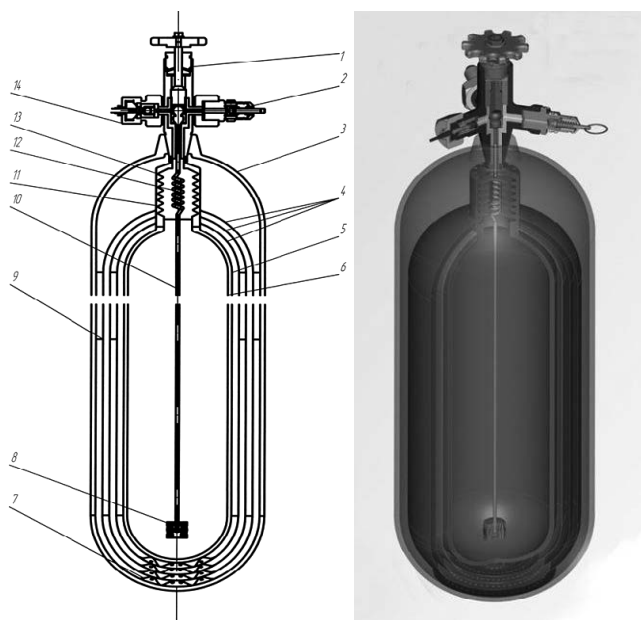


Рис. 1. Конструктивная схема баллона с криогенной заправкой (БКЗ) [5, 8]: 1 – вентиль; 2 – клапан предохранительный; 3 – баллон; 4 – экраны; 5 – теплоизоляция; 6 – термос; 7 – прокладки; 8 – фильтр; 9 – дистанционные проставки; 10 – трубка заборная; 11 – сильфон; 12 – температурный компенсатор; 13 – стакан; 14 – заправочный штуцер

Fig. 1. Cylinder with cryogenic filling [5, 8]: 1 – valve; 2 – safety valve; 3 – cylinder; 4 – screens; 5 – heat insulation; 6 – thermos; 7 – packings; 8 – filter; 9 – spacers; 10 – probe; 11 – bellows; 12 – expansion ring; 13 – bomb; 14 – filler tube

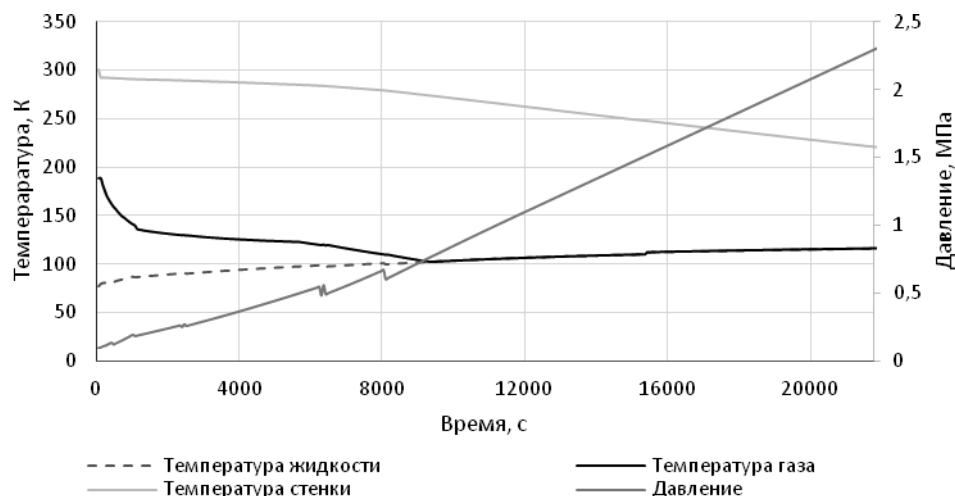


Рис. 2. Давление и температуры стенки, жидкости, газа в БКЗ при отсутствии наружных теплопритоков

Fig. 2. Pressure and temperature of the wall, liquid, and gas in the cylinder with cryogenic filling under the absence of incoming heat load

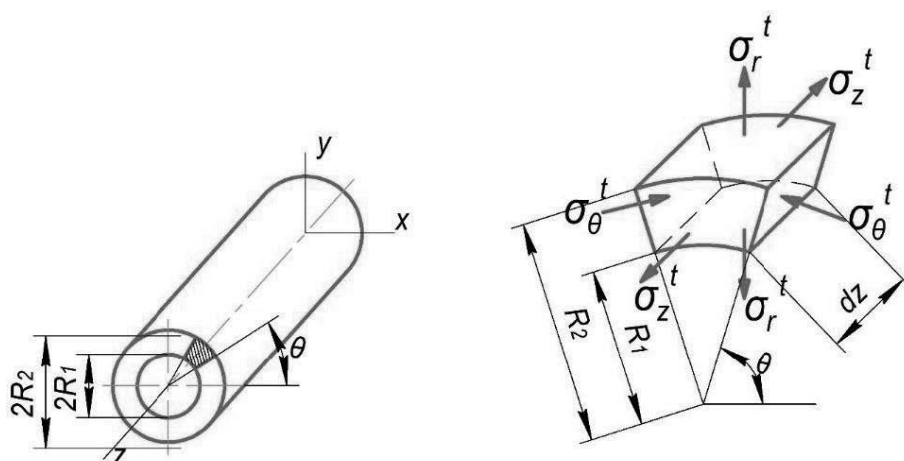


Рис. 3. Элемент стенки БКЗ с распределением термических напряжений

Fig. 3. Element of the wall in the cylinder with cryogenic filling with the distribution of thermal stresses

Исследуем температурные напряжения по толщине стенки баллона, вызванные изменением по времени температуры криопродукта внутри баллона при отсутствии наружных теплопритоков. Так как площадь верхнего и нижнего основания БКЗ (крышек) на порядок меньше, чем площадь его боковой поверхности, при решении данной задачи не учитывались осевые напряжения σ_z^t .

По расчетным формулам, приведенным в методике, рассмотренной в [11, 12] вычислялись относительная избыточная температура стенки баллона с учетом ее зависимости от времени θ (ρ , Fo , Bi , k), распределение температуры в стенке баллона $T(\rho, Fo)$ во времени, а также радиальные σ_r^t и окружные напряжения σ_θ^t в стенке баллона.

Так как силовое воздействие на стенку обусловлено не только термическим воздействием, но и давлением, то очевидно, что эквивалентные напряжения будут складываться с учетом этих двух факторов. На рис. 4 представлен элемент стенки баллона и действующие на него усилия, обусловленные давлением. По граням элемента приложены радиальные σ_r^p и окружные σ_θ^p . Осевые напряжения σ_z^p также не учитывались при решении данной задачи.

Радиальные σ_r^p и окружные σ_θ^p напряжения, обусловленные давлением (см. рис. 1), находятся с помощью известных выражений

$$\sigma_r^p = \frac{p \cdot R_1}{R_2 - R_1}; \quad (1)$$

$$\sigma_\theta^p = p - \sigma_r^p (R_2 - R_1); \quad (2)$$

Тогда радиальные напряжения в стенке БКЗ, обусловленные давлением в баллоне и термическим воздействием в совокупности, определяются как

$$\sigma_{r\Sigma} = \sigma_r^t + \sigma_r^p, \quad (3)$$

в то время как суммарные напряжения, возникающие в стенке БКЗ, в окружном направлении:

$$\sigma_{\theta\Sigma} = \sigma_\theta^t + \sigma_\theta^p, \quad (4)$$

Стоит отметить, что напряжения, обусловленные давлением, всегда будут иметь характер растягивающих усилий, так же как температурные напряжения в радиальном направлении σ_r^t , а осевые напряжения от температурного воздействия σ_z^t имеют обратное воздействие.

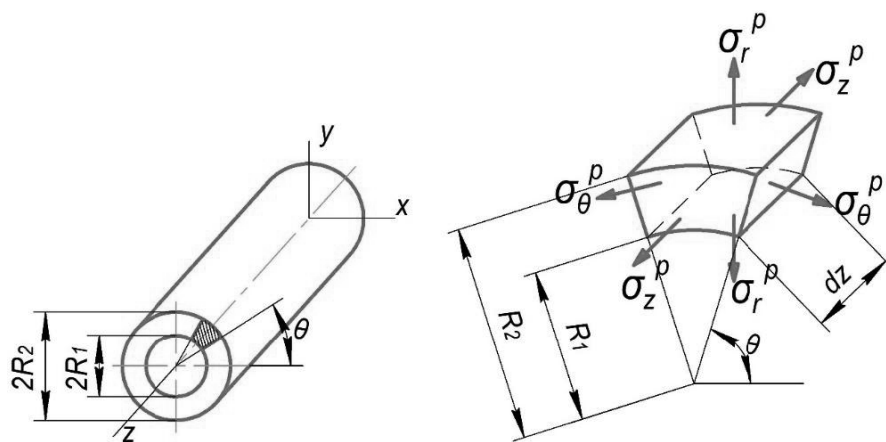


Рис. 4. Элемент стенки БКЗ с распределением напряжений, обусловленных давлением

Fig. 4. Element of the wall in the cylinder with cryogenic filling with the distribution of stresses due to pressure

Тогда эквивалентные напряжения, обусловленные как термическим воздействием, так давлением в баллоне, в стенке БКЗ определяются как

$$\sigma_{\text{экр. IV}} = \sqrt{\sigma_{r\Sigma}^2 + \sigma_{\theta\Sigma}^2 - \sigma_{\theta\Sigma}\sigma_{r\Sigma}}; \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{экр. IV}} \leq [\sigma]; \quad [\sigma] = \frac{\sigma_T}{n}. \quad (6)$$

Результаты расчетов

Оценка термоциклической прочности БКЗ проводилась для различных значений толщины стенки баллона $\delta_{\text{ст}}$ с учетом коэффициента теплоотдачи α в газовой полости. В соответствии с ГОСТ [13]–[15], запас прочности для сосудов под давлением принимается $n=1,5$.

На рис. 5 и 6 представлены графики изменения радиальных $\sigma_{r\Sigma}$, окружных $\sigma_{\theta\Sigma}$ и эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экр}}$ в стенке БКЗ, в зависимости от ее толщины $\delta_{\text{ст}}$ при коэффициенте теплоотдачи $\alpha=10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ в газовой

полости. Коэффициент теплоотдачи (теплопереноса) задан как максимальный, полученный из предварительных расчетов для условий процессов в БКЗ [16].

Анализ полученных данных позволяет заключить, что напряжения в стенках толщиной $\delta_{\text{ст}}=5\ldots 8 \text{ мм}$ на протяжении всего процесса регазификации криопродукта не превышают величины допускаемого напряжения $[\sigma]$ для баллона, изготовленного из стали 30ХМА, ($\sigma_T=735 \text{ МПа}$), а максимальная величина эквивалентных напряжений в стенке БКЗ имеет место только в начальный момент времени.

Результаты расчетов напряжений в стенке БКЗ толщиной $\delta_{\text{ст}}=6 \text{ мм}$ (согласно ГОСТу, толщина для баллонов 10 МПа) при различных значениях коэффициента теплоотдачи α в газовой полости приведены на рис. 7 и 8. Полученные зависимости позволяют сделать вывод, что напряжения, возникающие в стенке БКЗ при регазификации криопродукта, значительно ниже величины допускаемого напряжения.

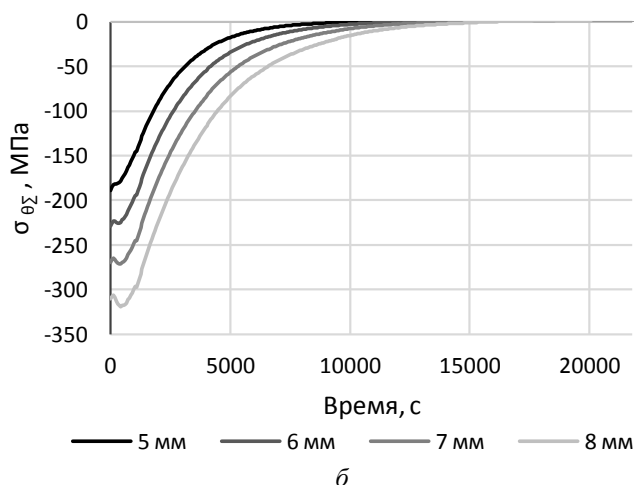
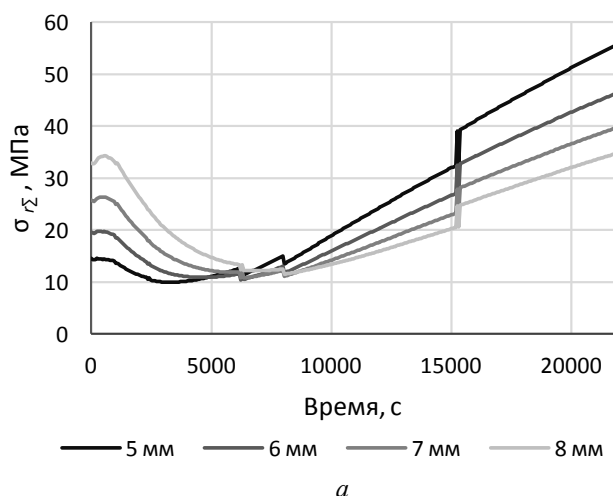


Рис. 5. Радиальные $\sigma_{r\Sigma}$ (а) и окружные напряжения $\sigma_{\theta\Sigma}$ (б) в стенке БКЗ при различной толщине $\delta_{\text{ст}}$ при коэффициенте теплоотдачи $\alpha=10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$

Fig. 5. Radial $\sigma_{r\Sigma}$ (a) and hoop stresses $\sigma_{\theta\Sigma}$ (b) in the wall of the cylinder with cryogenic filling for various thickness δ_{cm} at the coefficient of heat transfer $\alpha=10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$

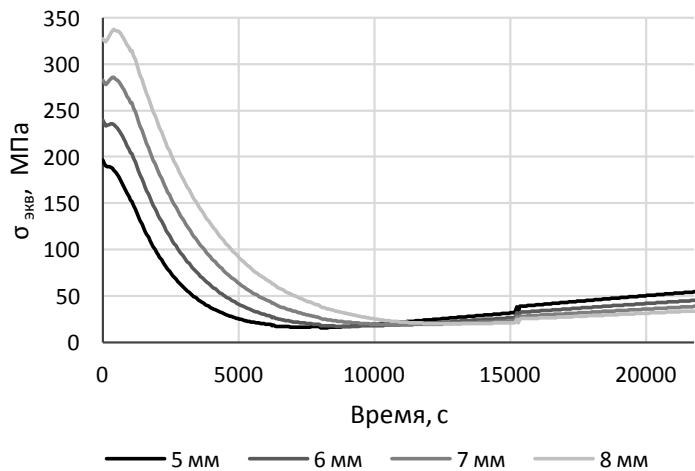


Рис. 6. Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ в стенке БКЗ при различной толщине $\delta_{\text{ст}}$ при коэффициенте теплоотдачи $\alpha=10 \text{ Вт/ (м}^2\cdot\text{К)}$
Fig. 6. Equivalent stresses $\sigma_{\text{экв}}$ in the wall of the cylinder with cryogenic filling for various thickness $\delta_{\text{ст}}$ at the coefficient of heat transfer $\alpha=10 \text{ Вт/ (м}^2\cdot\text{К)}$

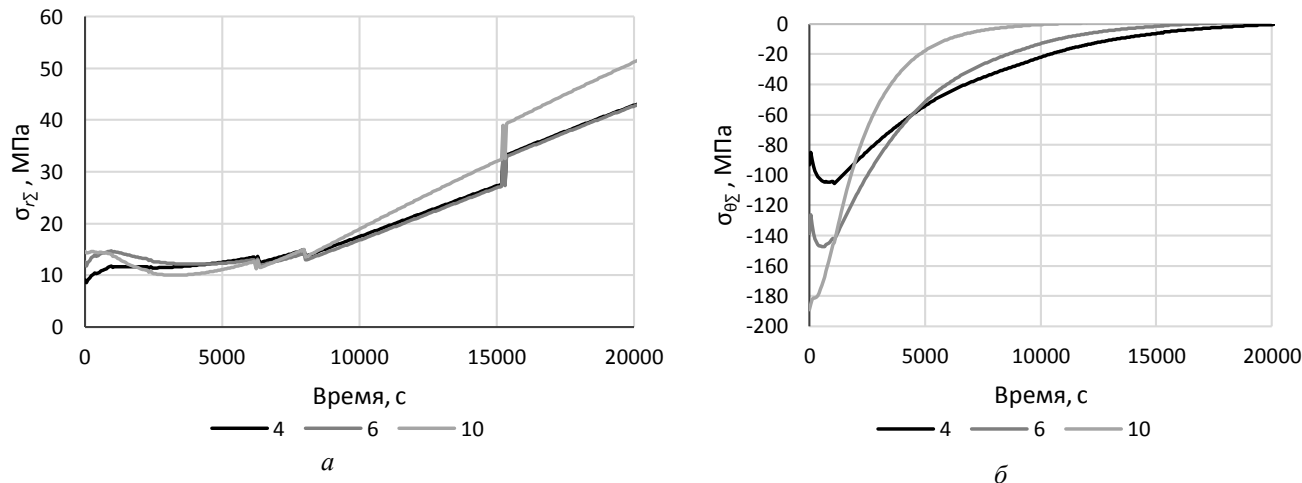


Рис. 7. Радиальные $\sigma_{r\Sigma}$ (а) и окружные напряжения $\sigma_{\theta\Sigma}$ (б) в стенке БКЗ толщиной $\delta_{\text{ст}}=6 \text{ мм}$ при различных значениях коэффициента теплоотдачи α
Fig. 7. Radial $\sigma_{r\Sigma}$ (a) and hoop stresses $\sigma_{\theta\Sigma}$ (б) in the 6 mm thick wall of the cylinder with cryogenic filling at various values of heat transfer coefficient α

Очевидно, что чем выше коэффициент теплоотдачи, тем меньше время теплового взаимодействия, и термудар приводит к резким температурным деформациям и, соответственно, напряжениям. Но, тем не менее, уровень напряжений ниже, чем при заправке компримированием.

Вполне естественно, что с ростом давления в процессе регазификации криогенной жидкости напряжения в стенке будут расти. Если аппроксимировать зависимость (см. рис. 7, а) линейной функцией, то только радиальные напряжения $\sigma_{r\Sigma}$ вырастут в десять раз и составят 500 МПа при коэффициенте теплоотдачи $\alpha=10 \text{ Вт/ (м}^2\cdot\text{К)}$ в газовой полости. Но это все равно будет ниже предела прочности материала стенки. Рост напряжений от роста давления компенсируется снижением термических напряжений за счет выравнивания температуры в стенке баллона, что приводит к более благоприятным условиям по силовым воздействиям в стенке баллона.

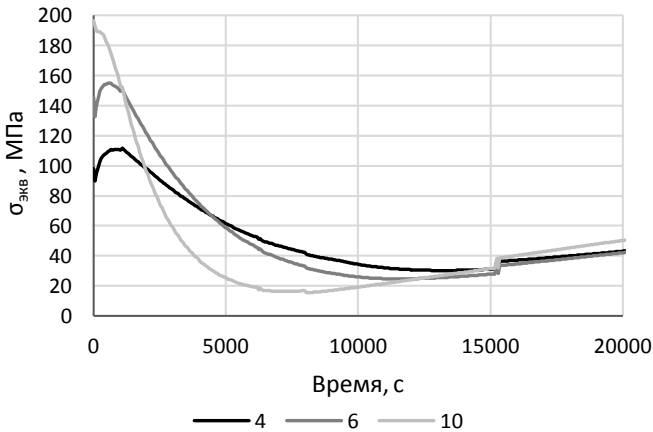


Рис. 8. Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ в стенке БКЗ толщиной $\delta_{\text{ст}}=6 \text{ мм}$ при различных значениях коэффициента теплоотдачи α
Fig. 8. Equivalent stresses $\sigma_{\text{экв}}$ in the 6 mm thick wall of the cylinder with cryogenic filling at various values of heat transfer coefficient α

Таким образом, оценка термоциклической прочности БКЗ позволяет сделать вывод о том, что при регазификации криопродукта ресурс БКЗ повышается как минимум в два раза, по сравнению с баллоном, заправляемым компримированием.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Напряжения в стенке БКЗ на протяжении всего процесса регазификации криопродукта в стенках толщиной $\delta_{ст}=5...8$ мм не превышают величины допускаемого напряжения для стали 30ХМА, ($\sigma_T=735$ МПа), а максимальные эквивалентные напряжения в стенке БКЗ, имеющие место в начальный момент времени также ниже допустимых.

Литература

1. Василькин А. А., Колосков А. Д. Расчет напряженно-деформированного состояния стенки резервуара РВС10000 методом конечных элементов // Долговечность строительных материалов и конструкций. / Материалы научно-практ. конф. Саранск. Изд-во Мордов. ун-та, 2005. с. 108–114.
2. Лукьянцев М. А., Вильданов Р. Г., Исхаков Р. Р. Оценка остаточного ресурса резервуаров при малоцикловом нагружении // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6.
3. Зинин А. В., Бычков Н. Г., Першин А. В., Авруцкий В. В., Смирнова Л. Л. Термоциклическая прочность жаропрочного сплава и кинетика накопления повреждений при наложении вибрационных нагрузок // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. № 2. с. 53–55.
4. Кондаков Г. П., Кузнецов В. В., Лукиенко М. И. Анализ причин аварий вертикальных цилиндрических резервуаров. // Трубопроводный транспорт. 1994. № 5. С. 6–7.
5. Топливный баллон/ Довгялло А. И., Лукачев С. В. и др. // Патент № 2163699, Россия, МПК 7F17C9/02, 99114577//06 заявл. 02.07.1977, опубл. 27.02.2001. Бюл. № 6.
6. Семенов А. С., Грищенко А. И., Колотников М. Е., Гецов Л. Б. Конечн-элементный анализ термоциклической прочности лопаток газовых турбин. Часть 1. Модели материала, критерии разрушения, идентификация параметров // Вестник УГАТУ. 2019. № 1 (83). с. 70–81.
7. Семенов А. С., Грищенко А. И., Колотников М. Е., Гецов Л. Б. Конечн-элементный анализ термоциклической прочности лопаток газовых турбин. Часть 2. Результаты расчетов // Вестник УГАТУ. 2019. № 2 (84). с. 61–74.
8. Аэрокосмические бортовые криогенные системы охлаждения [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / А. И. Довгялло, С. О. Некрасова, Д. В. Сармин, А. А. Шиманов, А. Б. Цапкова, Д. А. Угланов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). Самара, 2013.
9. Довгялло А. И., Сармин Д. В., Угланов Д. А. Предварительные исследования тепловых процессов в баллоне с криогенной заправкой бортовой дроссельной системы // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3 (27), Ч. 4. С. 78–84.
10. Карнаух В. В., Крылова А. Д., Лопатин А. Л., Мироненкова А. С., Тремкина О. В., Угланов Д. А. Расчет и подбор оп-

2. Показано, что коэффициент теплоотдачи существенно влияет на время теплового воздействия, при этом термоудар приводит к резким температурным деформациям и, соответственно, напряжениям. Однако следует отметить, что уровень напряжений также ниже, чем при заправке компримированием.

3. Рост напряжений от давления компенсируется снижением термических напряжений за счет выравнивания температуры стенки. В результате уменьшение эквивалентных напряжений приводит к более благоприятным условиям по силовым воздействиям в стенке баллона.

Результаты работы получены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Межкафедральный учебно-производственный научный центр САМ-технологий» при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2020-0019).

References

1. Vasilkin A. A., Koloskov A. D. Calculation of the stress-strain state of the tank wall RVS10000 by the finite element method. *Durability of building materials and structures. Materials scientific and practical. conf.* Saransk. Publishing house of Mordovs. un-ta, 2005. p. 108–114. (in Russian)
2. Lukyantsev M. A., Vildanov R. G., Iskhakov R. R. Estimation of the residual resource of reservoirs under low-cycle loading. *Modern problems of science and education.* 2013. No. 6. (in Russian)
3. Zinin A. V., Bychkov N. G., Pershin A. V., Avrutskiy V. V., Smirnova L. L. Thermocyclic strength of a heat-resistant alloy and the kinetics of damage accumulation upon application of vibration loads. *Zavodskaya laboratory. Diagnostics of materials.* 2017. No. 2. p. 53–55. (in Russian)
4. Kondakov G. P., Kuznetsov V. V., Lukienko M. I. Analysis of the causes of accidents in vertical cylindrical tanks. *Pipeline transport.* 1994. No. 5. P. 6–7 (in Russian)
5. Fuel cylinder / Dovgyallo A. I., Lukachev S. V. et al. // Patent No. 2163699, Russia, IPC 7F17C9 / 02, 99114577 // 06 app. 07/02/1977, publ. February 27, 2001. Bul. No. 6. (in Russian)
6. Semenov A. S., Grishchenko A. I., Kolotnikov M. E., Getsov L. B. Finite element analysis of thermocyclic strength of gas turbine blades. Part 1. Models of material, fracture criteria, identification of parameters. *Vestnik USATU.* 2019. No. 1 (83). p. 70–81. (in Russian)
7. Semenov A. S., Grishchenko A. I., Kolotnikov M. E., Getsov L. B. Finite element analysis of thermocyclic strength of gas turbine blades. Part 2. Calculation results. *Vestnik USATU.* 2019. No. 2 (84). p. 61–74. (in Russian)
8. Aerospace onboard cryogenic cooling systems [Electronic resource]: electron. study. allowance / A. I. Dovgyallo, S. O. Nekrasova, D. V. Sarmin, A. A. Shimanov, A. B. Tsapkova, D. A. Uglanov; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Samar. state aerospace un-t them. S. P. Koroleva (National Research University). Samara, 2013.
9. Dovgyallo A. I., Sarmin D. V., Uglanov D. A. Preliminary studies of thermal processes in a cylinder with cryogenic filling of the onboard throttle system. *Vestnik SSAU.* 2011. No. 3 (27), Part 4. p. 78–84. (in Russian)
10. Karnaukh V. V., Krylova A. D., Lopatin A. L., Mironenkova A. S., Tremkina O. V., Uglanov D. A. Calculation and

- тимальной схемы гибридной криогенной энергетической установки, работающей на жидком водороде // Вестник Международной академии холода. 2020. № 2. С. 9–18.
11. Цой П. В. Методы расчета задач тепломассопереноса. М.: Энергоатомиздат, 1984. 416 с.
 12. Довгялло А. И., Угланов Д. А., Ашихмина Т. В. Оценка термоциклической прочности в топливном баллоне с криогенной заправкой // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2007. № 2. с. 83–86.
 13. ГОСТ 949–73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P_p \leq 19,6$ МПа (200 кгс/см²). Технические условия.
 14. ГОСТ 25859–83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.
 15. ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
 16. Довгялло А. И., Угланов Д. А., Шиманова А. Б., Шиманов А. А. Расчетные исследования процесса реконденсации в емкости с криогенной заправкой // Насосы. Турбины. Системы. 2021. № 1 (38).
 - selection of the optimal scheme of a hybrid cryogenic power plant running on liquid hydrogen. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020. No 2. p. 9–18. (in Russian)
 11. Tsoi P. V. Methods of calculation of heat and mass transfer problems. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 416 p. (in Russian)
 12. Dovgyallo A. I., Uglanov D. A., Ashikhmina T. V. Thermal cycling toughness estimation of fuel tank refueled by cryogenic product. *Vestnik SSAU*. 2007. No. 2. p. 83–86. (in Russian)
 13. GOST 949–73. Steel cylinders of small and medium volume for gases at $P_p \leq 19.6$ MPa (200 kgs/cm²). Technical conditions. (in Russian)
 14. GOST 25859–83. Steel vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation under low-cycle loads. (in Russian)
 15. GOST 14249–89. Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation. (in Russian)
 16. Dovgyallo A. I., Uglanov D. A., Shimanova A. B., Shimanov A. A. Computational studies of the recondensation process in a tank with cryogenic filling. *Pumps. Turbines. Systems*. 2021. No. 1 (38). (in Russian)

Сведения об авторах

Довгялло Александр Иванович

Д. т. н., профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, d. a. i.@mail.ru

Угланов Дмитрий Александрович

К. т. н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, dmitry.uglanov@mail.ru

Шиманова Александра Борисовна

Младший научный сотрудник НОЦ ГДИ-209 Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, a_tsapkova@mail.ru

Шиманов Артем Андреевич

Научный сотрудник НОЦ ГДИ-209 Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, tema444st@mail.ru

Information about authors

Dovgyallo Aleksandr I.

D. Sc., Professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University, Russia, 443086, Samara, Moscow highway, 34, d. a. i.@mail.ru

Uglanov Dmitry A.

Ph. D., Associate Professor of the Department of heat engineering and thermal engines of the Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Russia, 443086, Samara, dmitry.uglanov@mail.ru

Shimanova Aleksandra B.

Researcher specialist of Department of Aircraft Engine Theory, Samara National Research University, Russia, 443086, Samara, Moskovskoe shosse, 34, a_tsapkova@mail.ru

Shimanov Artem A.

Researcher of Department of Aircraft Engine Theory, Samara National Research University, 443086, Samara, Moskovskoe shosse, 34, tema444st@mail.ru