

## Определение начального уровня заполнения емкости шугообразным криопродуктом

© А.В. Тарасова, Г.Н. Товарных

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Получены соотношения для нахождения начальной степени заполнения сферической и торовой емкостей жидкой фазой и шугой с учетом изменения объема, занимаемого криопродуктом, вследствие плавления твердой фазы и теплового расширения жидкой фазы. Принято, что область шуги изотермична и имеет температуру плавления твердой фазы, граница раздела шуга — чистая жидкость плоская, свободная поверхность жидкости неподвижна и имеет температуру насыщения при заданном давлении. Температура в области чистой жидкости распределена по линейному закону. Полученные приближенные соотношения позволяют провести оценку размеров требуемой «газовой подушки» при плавлении шугообразного криопродукта в емкости без детального расчета температурных полей в области чистой жидкости.*

**Ключевые слова:** криогенная жидкость, криопродукт, жидкость, шуга, «газовая подушка», плавление, емкость, бак

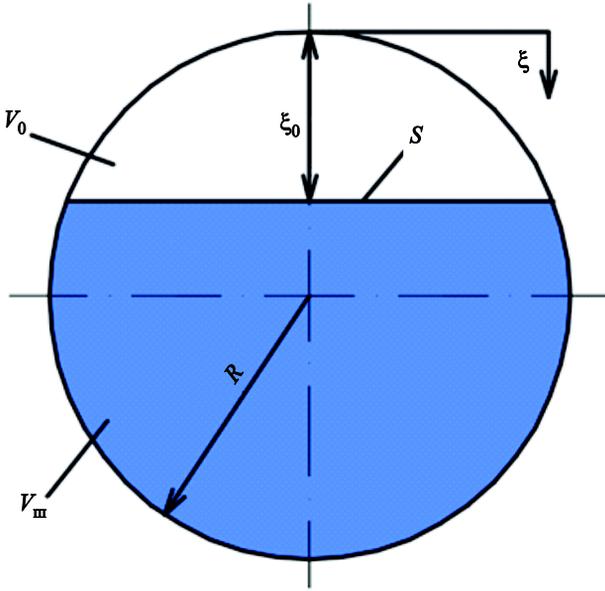
В настоящее время пилотируемое исследование дальнего космоса представляет все больший интерес. При проведении предыдущих работ [1, 2], посвященных расчету времени плавления шугообразного криопродукта в емкостях различной формы, в том числе сферической и торовой, возник вопрос, который может быть актуальным при проектировании топливных баков: каким должен быть начальный уровень заполнения емкости шугообразным криопродуктом?

В работах [3, 4] представлены результаты численного решения задачи о плавлении шугообразного криопродукта в цилиндрической емкости. Использованию предварительного охлаждения жидкостей для уменьшения их потерь при хранении посвящена работа [5]. Методика расчета положения подвижной границы с учетом плавления твердой фазы представлена в работах [6–10].

В данной статье получены приближенные формулы для определения размеров требуемой «газовой подушки» при плавлении шугообразного криопродукта в сферической и торовой емкостях.

Рассмотрим сначала изменение объема, частично занимаемого криопродуктом, только вследствие плавления твердой фазы для сферического бака радиусом  $R$  (рис. 1). При этом шуга, занимающая объем  $V_{ш}$ , рассматривается как квазижидкая среда. Оставшийся объем  $V_0$  — это объем «газовой подушки». Граница раздела шуга — об-

ласть пара характеризуется начальной  $\xi_0$  и текущей  $\xi$  координатами, а также площадью  $S$  поверхности раздела между шугой и областью пара.



**Рис. 1.** Сферический бак, частично заполненный шугообразным криопродуктом

В соответствии с рис. 1 запишем следующие геометрические соотношения:

$$S = \pi(2R - \xi)\xi; \quad dV = \pi(2R - \xi)\xi d\xi.$$

Тогда выражения для первоначального объема «газовой подушки» и шуги имеют вид

$$V_0 = \int_0^{\xi_0} \pi(2R - \xi)\xi d\xi = \pi \xi_0^2 \left( R - \frac{\xi_0}{3} \right) = \frac{\pi}{3} \xi_0^2 (3R - \xi_0);$$

$$V_{\text{ш}} = \int_{\xi_0}^{2R} \pi(2R - \xi)\xi d\xi = \frac{\pi}{3} (4R^3 - 3R\xi_0^2 + \xi_0^3),$$

или

$$V_{\text{ш}} = V - V_0, \tag{1}$$

где  $V$  — полный объем бака.

В предположении, что вся шуга расплавится, справедливо соотношение

$$m_{ш} = \rho_{ш} V_{ш} = m_{ж} = \rho_{ж} V, \quad (2)$$

где  $m_{ш}$ ,  $\rho_{ш}$  — масса и плотность шуги;  $m_{ж}$ ,  $\rho_{ж}$  — масса и плотность жидкости.

Подставив в соотношение (2) выражение (1), получим

$$V_0 = \frac{V(\rho_{ш} - \rho_{ж})}{\rho_{ш}}. \quad (3)$$

В то же время

$$\begin{aligned} m_{ш} = \rho_{ш} V_{ш} &= m_{ш.ж} + m_{ш.т} = \rho_{ж} V_{ш.ж} + \rho_{т} V_{ш.т} = \\ &= \rho_{ж} (1 - \varphi) V_{ш} + \rho_{т} \varphi V_{ш}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $m_{ш.ж}$ ,  $V_{ш.ж}$  — масса и объем жидкой фазы шуги;  $m_{ш.т}$ ,  $V_{ш.т}$  — масса и объем твердой фазы шуги;  $\varphi$  — концентрация твердой фазы в шуге.

Из соотношения (4) следует

$$\rho_{ш} = \rho_{ж} (1 - \varphi) + \rho_{т} \varphi. \quad (5)$$

Тогда формула (3) с учетом (5) примет вид

$$V_0 = \frac{V(\rho_{ж} (1 - \varphi) + \rho_{т} \varphi - \rho_{ж})}{\rho_{ж} (1 - \varphi) + \rho_{т} \varphi} = \frac{V\varphi(\rho_{т} - \rho_{ж})}{\rho_{ж} (1 - \varphi) + \rho_{т} \varphi}.$$

Преобразуем полученное выражение:

$$\frac{\pi}{3} \xi_0^2 (3R - \xi_0) = \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{\varphi(\rho_{т} - \rho_{ж})}{\rho_{ж} (1 - \varphi) + \rho_{т} \varphi}.$$

Приведем его к безразмерному виду

$$\bar{\xi}_0^3 - 3\bar{\xi}_0^2 + K_{п} = 0,$$

где  $\bar{\xi}_0 = \frac{\xi_0}{R}$ ;  $K_{п} = 4 \frac{\varphi(\rho_{т} - \rho_{ж})}{\rho_{ж} (1 - \varphi) + \rho_{т} \varphi}$ .

Пусть для водорода  $\rho_{ж} = 71,1 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{т} = 86,7 \text{ кг/м}^3$ ;  $\varphi = 0,7$ ;  $\rho_{ш} = \rho_{ж} (1 - \varphi) + \rho_{т} \varphi = 71,1 \cdot 0,3 + 86,7 \cdot 0,7 = 82,02 \text{ кг/м}^3$ . Тогда

$$K_{п} = 0,533 = \bar{\xi}_0^2 (3 - \bar{\xi}_0); \quad \bar{\xi}_0 = 0,458.$$

Требуемый объем «газовой подушки» при этом составит

$$\bar{V}_0 = \frac{V_0}{V} = \frac{\varphi(\rho_T - \rho_{ж})}{\rho_{ж}(1 - \varphi) + \rho_T \varphi} = \frac{K_{п}}{4} = 0,133,$$

т. е. под область пара необходимо предусмотреть 13,3 % объема топливного бака.

Рассмотрим теперь случай, когда сферический бак радиусом  $R$  частично заполнен только жидкой фазой (рис. 2), и определим изменение объема в результате теплового расширения жидкости.

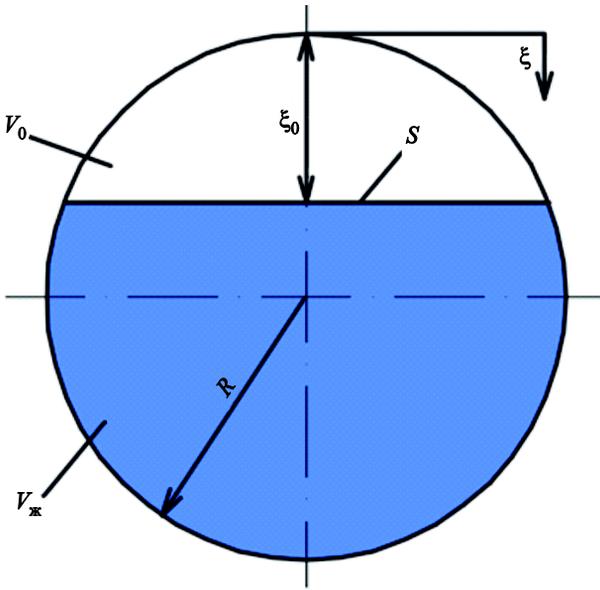


Рис. 2. Сферический бак, заполненный жидкой фазой

Введем коэффициент теплового расширения:

$$\beta = \frac{1}{V_{ж}} \frac{dV}{dT} \approx \frac{1}{V_{ж}} \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{1}{V_{ж}} \frac{V_0}{\Delta T},$$

из которого следует

$$\beta V_{ж} \Delta T = \beta (V - V_0) \Delta T = V_0.$$

Выразим из полученного соотношения  $V_0$  — объем «газовой подушки»:

$$V_0 = V \frac{\beta \Delta T}{1 + \beta \Delta T}.$$

Аналогично предыдущему случаю получим

$$\frac{\pi}{3} \bar{\xi}_0^2 (3R - \bar{\xi}_0) = \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{\beta \Delta T}{1 + \beta \Delta T},$$

или в безразмерном виде

$$\bar{\xi}_0^3 - 3\bar{\xi}_0^2 + K_T = 0, \quad (6)$$

где  $K_T = \frac{4\beta \Delta T}{1 + \beta \Delta T}$ .

Аналогично предыдущему случаю решим уравнение (6) с учетом указанных ранее данных для водорода, приняв

$$\beta = 0,0126; \quad \Delta T = \frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{нас}}}{2} = \frac{20,38 - 13,95}{2} = 3,215 \text{ К},$$

где  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления твердой фазы;  $T_{\text{нас}}$  — температура насыщенных паров (температура раздела жидкость — пар).

Получим

$$K_T \cong 0,156; \quad \bar{\xi}_0 = 0,237.$$

Требуемый объем «газовой подушки» при этом составит

$$\bar{V}_0 = \frac{V_0}{V} = \frac{\beta \Delta T}{1 + \beta \Delta T} = \frac{K_T}{4} = 0,039.$$

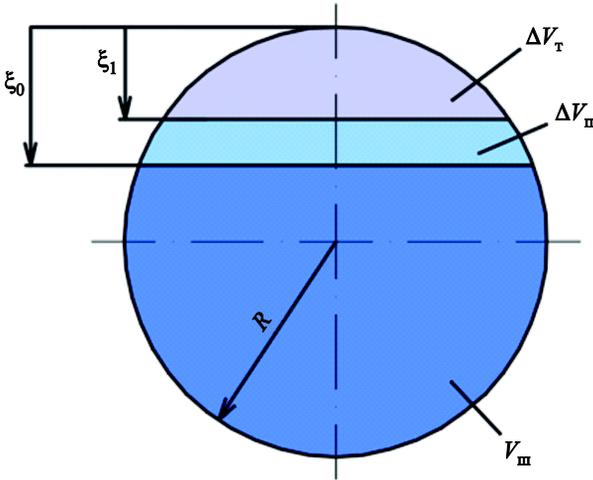
Таким образом, для теплового расширения жидкости необходимо предусмотреть 3,9 % объема топливного бака.

Теперь рассмотрим бак (рис. 3), в котором имеются шуга, первоначально занимающая объем  $V_{\text{ш}}$ , область с жидкой фазой объемом  $\Delta V_{\text{п}}$ , образуемой в результате плавления твердой фазы, а также объем  $\Delta V_{\text{т}}$ , который необходимо предусмотреть для теплового расширения жидкости. При этом учтем изменение объема, занимаемого криопродуктом, вследствие плавления твердой фазы и теплового расширения жидкости.

Выражения для объема жидкости и «газовой подушки» имеют следующий вид:

$$V_{\text{ж}} = V_{\text{ш}} + \Delta V_{\text{п}} = V - \Delta V_{\text{т}};$$

$$V_0 = \Delta V_{\text{п}} + \Delta V_{\text{т}}.$$



**Рис. 3.** Сферический бак, заполненный шугообразным криопродуктом и имеющий область с жидкой фазой

Коэффициент теплового расширения вычисляется по формуле

$$\beta \approx \frac{1}{V_{\text{ж}}} \frac{\Delta V_{\text{т}}}{\Delta T},$$

откуда

$$\Delta V_{\text{т}} = \beta V_{\text{ж}} \Delta T = (V - \Delta V_{\text{т}}) \beta \Delta T,$$

или

$$\Delta V_{\text{т}} = V \frac{\beta \Delta T}{1 + \beta \Delta T}. \quad (7)$$

После расплавления всей шуги верно следующее соотношение:

$$m_{\text{ш}} = m_{\text{ж}} \rightarrow \rho_{\text{ш}}(V - V_0) = \rho_{\text{ж}}(V - \Delta V_{\text{т}}),$$

или

$$\rho_{\text{ш}} V_0 - \rho_{\text{ж}} \Delta V_{\text{т}} = V(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}). \quad (8)$$

Подставим в формулу (8) полученные ранее выражения для  $V$ ,  $V_0$ , а также  $\Delta V_{\text{т}}$  из выражения (7):

$$\rho_{\text{ш}} \frac{\pi}{3} \xi_0^2 (3R - \xi_0) = \frac{4}{3} \pi R^3 \left( \rho_{\text{ш}} - \frac{\rho_{\text{ж}}}{1 + \beta \Delta T} \right).$$

В безразмерном виде имеем

$$\bar{\xi}_0^3 - 3\bar{\xi}_0^2 + K = 0,$$

где  $K = 4 \left( 1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_{ш}} \frac{1}{1 + \beta \Delta T} \right)$ .

С учетом данных для водорода получим

$$K = 0,668; \quad \bar{\xi}_0 = 0,518.$$

Требуемый объем «газовой подушки» при этом составит

$$\bar{V}_0 = \frac{V_0}{V} = 1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_{ш}} \frac{1}{1 + \beta \Delta T} = \frac{K}{4} = 0,167.$$

Таким образом, при проектировании топливных баков с шугообразным криопродуктом необходимо предусмотреть 16,7% бака для «газовой подушки».

Следует отметить, что полученное значение относительного объема «газовой подушки»  $\bar{V}_0 = 0,167$  справедливо для емкости любой формы. В то же время линейный размер  $\bar{\xi}_0$  для емкостей разной формы будет различным.

Проведем аналогичные расчеты для торовой емкости, геометрические параметры которой заданы радиусами  $r$  и  $R$ . Рассмотрим сначала изменение объема, занимаемого криопродуктом, только в результате плавления твердой фазы (рис. 4).

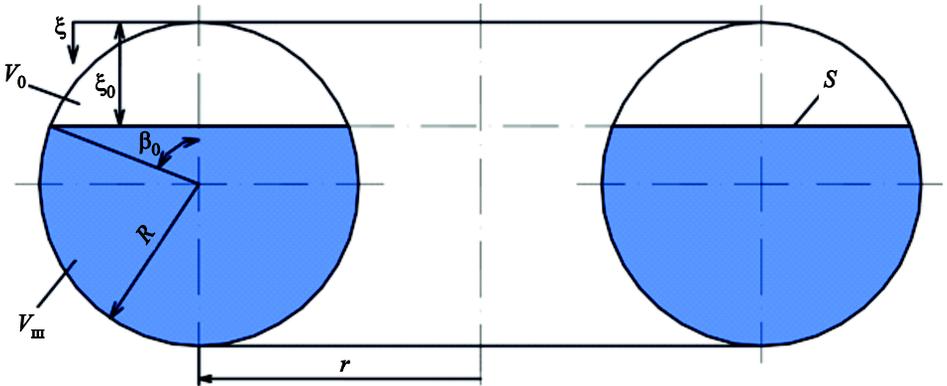


Рис. 4. Торовой бак, заполненный шугообразным криопродуктом

В соответствии с рис. 4 запишем следующие геометрические соотношения:

$$S = 4\pi R r \sin \beta;$$

$$dV = Sd\xi = 4\pi R r \sin \beta r \sin \beta d\beta = 4\pi R r^2 \sin^2 \beta d\beta.$$

Тогда выражения для первоначального объема «газовой подушки» и шуги принимают вид

$$V_0 = \int_0^{\beta_0} 4\pi R r^2 \sin^2 \beta d\beta = 2\pi R r^2 \left( \beta_0 - \frac{\sin 2\beta_0}{2} \right);$$

$$V_{ш} = \int_{\beta_0}^{\pi} 4\pi R r^2 \sin^2 \beta d\beta = \pi R r^2 (2\pi - 2\beta_0 - \sin 2\beta_0).$$
(9)

Проведя рассуждения, аналогичные рассуждениям для случая сферической емкости, получим

$$V_0 = \frac{V\varphi(\rho_T - \rho_{ж})}{\rho_{ж}(1 - \varphi) + \rho_T\varphi}.$$

Преобразуем последнее выражение к виду

$$2\pi R r^2 \left( \beta_0 - \frac{\sin 2\beta_0}{2} \right) = 2\pi^2 R r^2 \frac{\varphi(\rho_T - \rho_{ж})}{\rho_{ж}(1 - \varphi) + \rho_T\varphi}$$

или

$$\beta_0 - \frac{\sin 2\beta_0}{2} - K_{п} = 0,$$

где  $K_{п} = \pi \frac{\varphi(\rho_T - \rho_{ж})}{\rho_{ж}(1 - \varphi) + \rho_T\varphi}$ ;  $\beta_0 = \arccos(1 - \bar{\xi}_0)$ ;  $\bar{\xi}_0 = \frac{\xi_0}{R}$ .

С учетом приведенных ранее данных для водорода получим

$$K_{п} = 0,418; \quad \beta_0 = 51,8^\circ; \quad \bar{\xi}_0 = 0,382.$$

Рассмотрим теперь случай, когда торовый бак заполнен только жидкой фазой (рис. 5), и определим изменение объема в результате теплового расширения жидкости.

Аналогично случаю сферической емкости получим объем «газовой подушки»:

$$V_0 = V \frac{\beta \Delta T}{1 + \beta \Delta T}.$$

Приведем полученное выражение к виду

$$2\pi R r^2 \left( \beta_0 - \frac{\sin 2\beta_0}{2} \right) = 2\pi^2 R r^2 \frac{\beta \Delta T}{1 + \beta \Delta T},$$

или

$$\beta_0 - \frac{\sin 2\beta_0}{2} - K_T = 0,$$

где  $K_T = \pi \frac{\beta \Delta T}{1 + \beta \Delta T}$ .

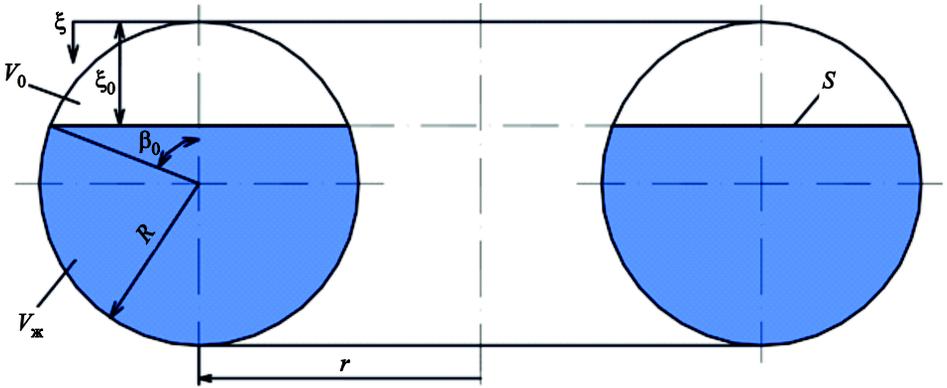


Рис. 5. Торковый бак, заполненный жидкой фазой

С учетом указанных ранее данных для водорода получим

$$K_T = 0,122; \quad \beta_0 = 33,3^\circ; \quad \bar{\xi}_0 = 0,164.$$

Теперь рассмотрим бак (рис. 6), в котором имеются шуга, первоначально занимающая объем  $V_{ш}$ , область с жидкой фазой объемом  $\Delta V_{л}$ , образуемой за счет плавления твердой фазы, и объем  $\Delta V_T$ , который необходимо предусмотреть для теплового расширения жидкости. При этом учтем изменение объема, занимаемого криопродуктом, вследствие плавления твердой фазы и вследствие теплового расширения жидкости.

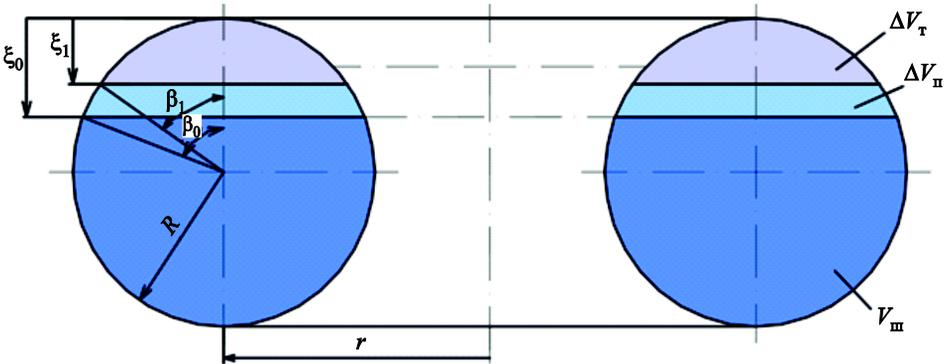


Рис. 6. Торковый бак, заполненный шугообразным криопродуктом и имеющий область с жидкой фазой

Используя соотношения (7)–(9), получим

$$2\pi R r^2 \rho_{\text{ш}} \left( \beta_0 - \frac{\sin 2\beta_0}{2} \right) - V \rho_{\text{ж}} \frac{\beta \Delta T}{1 + \beta \Delta T} = V (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}),$$

или

$$2\pi R r^2 \rho_{\text{ш}} \left( \beta_0 - \frac{\sin 2\beta_0}{2} \right) = 2\pi^2 R r^2 \left( \rho_{\text{ш}} - \frac{\rho_{\text{ж}}}{1 + \beta \Delta T} \right).$$

Приведем полученное выражение к виду

$$\beta_0 - \frac{\sin 2\beta_0}{2} - K = 0,$$

где  $K = \pi \left( 1 - \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ш}}} \frac{1}{1 + \beta \Delta T} \right)$ .

С учетом данных для водорода получим

$$K = 0,524; \quad \beta_0 = 56,4^\circ; \quad \bar{\xi}_0 = 0,447.$$

Требуемый объем «газовой подушки» при этом составит

$$\bar{V}_0 = \frac{V_0}{V} = 1 - \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ш}}} \frac{1}{1 + \beta \Delta T} = \frac{K}{\pi} = 0,167.$$

Таким образом, при проектировании топливных баков торовой формы с шугообразным криопродуктом необходимо предусмотреть 16,7 % бака для «газовой подушки».

В ходе данной работы были получены соотношения, позволяющие оценить начальную степень заполнения жидкой фазой и шугой не только сферического и торового баков, но и бака любой формы, при этом учитывалось изменение объема, занимаемого криопродуктом, в результате плавления твердой фазы и теплового расширения жидкой фазы. Полученные приближенные соотношения позволяют провести оценку размеров требуемой «газовой подушки» при плавлении шугообразного криопродукта в емкости без детального расчета температурных полей в области чистой жидкости. Данные результаты можно использовать при проектировании топливных баков систем долговременного хранения криогенных компонентов топлива.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тарасова А.В., Товарных Г.Н. Приближенный метод расчета плавления шугообразного криопродукта в сферической емкости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 4 (40).  
URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/itae/1394.html>

- [2] Тарасова А.В., Товарных Г.Н. Приближенный метод расчета времени плавления шугообразного криопродукта в торовой емкости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 12 (48).  
URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/itae/1449.html>
- [3] Товарных Г.Н. Тепловая конвекция в замкнутой емкости, заполненной компонентом в трех фазовых состояниях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7 (19).  
URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/861.html>
- [4] Товарных Г.Н. Плавление шугообразного водорода в вертикальной цилиндрической емкости. *Инженерный вестник*, 2014, № 10.  
URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/738604.html>
- [5] Александров А.А., Денисов О.Е., Золин А.В., Чугунков В.В. Охлаждение ракетного топлива стартовым оборудованием с применением жидкого азота. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 4, с. 24–29.
- [6] Товарных Г.Н. Рост давления в плоской щели при замерзании теплоносителя. *Инженерный вестник*, 2014, № 11.  
URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/gcle/1396.html>
- [7] Кувыркин Г.Н., Ломохова А.В. Математическое моделирование процесса кристаллизации в установках для выращивания монокристаллов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2007, № 4, с. 37–44.
- [8] Крылов Д.А., Сидняев Н.И. Метод расчета массовой кристаллизации многофазных реологических сред. *Материалы IV конф. геокриологов России. Т. 1, ч. 1: Физико-химия, теплофизика и механика мерзлых пород. Москва, 7–9 июня 2011 г.*, МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва, Университетская книга, 2011, с. 129–136.
- [9] Крылов Д.А. Математическое моделирование температурных полей с учетом фазовых переходов в криолитозоне. *Наука и образование*, 2012, № 4.  
URL: <http://technomag.edu.ru/doc/354740.html>
- [10] Парфентьева Н.А., Самарин О.Д. О колебаниях фронта промерзания в ограждениях и численном моделировании задачи Стефана. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI*, 2002, № 11, с. 46–47.

Статья поступила в редакцию 26.12.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Тарасова А.В., Товарных Г.Н. Определение начального уровня заполнения емкости шугообразным криопродуктом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-02-1590>

**Тарасова Анастасия Владимировна** родилась в 1994 г. Студентка кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер Научно-производственного центра «Специальная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, сотрудник Студенческого конструкторского бюро «Молодежного космического центра» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — механика жидкости и газа, тепломассопереноса. e-mail: [madam.amazonka83@yandex.ru](mailto:madam.amazonka83@yandex.ru)

**Товарных Геннадий Николаевич** родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 25 научных работ в области механики жидкости и газа, тепломассопереноса. e-mail: [tovarnjx@yandex.ru](mailto:tovarnjx@yandex.ru)

## Determining the initial level of the reservoir fill with slush cryogen

© A.V. Tarasova, G.N. Tovarnykh

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article considers obtained relations for finding the initial degree of filling spherical and toroid reservoirs with the liquid phase and slush taking into account changes in the volume occupied by cryogen due to melting the solid phase and the thermal expansion of the liquid phase. It is assumed that the area of slush is isothermal and has a melting temperature of the solid phase; the sludge — pure liquid interface is flat; free liquid surface is still and has a saturation temperature at a given pressure. In the pure liquid the temperature is distributed linearly. These approximate relationships allow assessing the size of the required “gas cushion” when melting slush cryogen in a reservoir without detailed calculation of temperature fields in the area of pure liquid.*

**Keywords:** cryogenic liquid, cryogen, liquid, slush, “gas cushion”, melting, reservoir, tank

### REFERENCES

- [1] Tarasova A.V., Tovarnykh G.N. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, issue. 4 (40). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/arse/itae/1394.html>
- [2] Tarasova A.V., Tovarnykh G.N. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, issue. 12 (48). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/arse/itae/1449.html>
- [3] Tovarnykh G.N. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue. 7 (19). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/861.html>
- [4] Tovarnykh G.N. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, no. 10. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/738604.html>
- [5] Aleksandrov A.A., Denisov O.E., Zolin A.V., Chugunkov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 4, pp. 24–29.
- [6] Tovarnykh G.N. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, no. 11. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/arse/gcle/1396.html>
- [7] Kuvyrkin G.N., Lomokhova A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2007, no. 4, pp. 37–44.
- [8] Krylov D.A., Sidnyaev N.I. Metod rascheta massovoy kristallizatsii mnogofaznykh reologicheskikh sred [Method of calculating of mass crystallization of multi-phase rheological media]. *Materialy IV konferentsii geokriologov Rossii, Moskva, 7–9 iyunya 2011 g., MGU imeni M.V. Lomonosova. T. 1, Chast 1: Fiziko-khimiya, teplofizika i mekhanika merzlykh porod* [Proceedings of the Fourth Conference of Russian geocryologists. Moscow, June 7–9, 2011, Lomonosov State University. Vol. 1. Part 1: Physical chemistry, thermal physics and mechanics of frozen ground]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2011, pp. 129–136.
- [9] Krylov D.A. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2012, no. 4. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/354740.html>

- [10] Parfentyeva N.A., Samarin O.D. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI — Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*, 2002, no. 11, pp. 46–47.

**Tarasova A.V.** (b. 1994), student, Department of Spacecrafts and Carrier Rockets, engineer, Research and Production Center “Special Equipment”, member of the staff, Student Design Bureau “Youth Space Center”, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: gas and fluid mechanics, heat and mass transfer.  
e-mail: madam.amazonka83@yandex.ru

**Tovarnykh G.N.** (b. 1946) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Spacecrafts and Carrier Rockets, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 25 research papers in the field of gas and fluid mechanics, heat and mass transfer.  
e-mail: tovarnjx@yandex.ru