

ОСОБЕННОСТИ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ГАЗОВОГО БАЛЛОНА КАК НЕКЛАССИЧЕСКОЙ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ И ОЦЕНКА ЕГО ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ

© 2006 Т. В. Ашихмина, А. И. Довгялло

Самарский государственный аэрокосмический университет

Описаны процессы в универсальном газовом баллоне, отличающемся от криогенных емкостей с малыми уровнями давления при бездренажном хранении тем, что теплоизоляция находится внутри емкости, а не снаружи. Приводится анализ и расчеты процессов для классической двухфазной системы. Определены закономерности изменения объема (массы) жидкости и газа при повышении температуры и давления. Проведена оценка теплопроводных свойств системы внутренней изоляции баллона.

Особенности предлагаемого по патенту [1] баллона заключаются в его универсальности по заправке. Баллон, содержащий внутренний теплоизолированный сосуд и систему экранов в газовой полости (рис. 1), может заправляться как заливкой (во внутренний сосуд) криогенной жидкости, так и компримированием (заполняется весь объем баллона). Такое устройство баллона и ожидаемые особенности эксплуатации требуют изучения процессов, происходящих при его заправке, хранении продукта в безрасходном состоянии и отборе продукта.

Если процессы при наполнении и опорожнении баллона сжатыми газами достаточно хорошо изучены, то теплофизика процессов в таком баллоне при использовании криопродукта требует самостоятельного изучения.

После наполнения внутреннего сосуда криогенной жидкостью начинается перераспределение низкопотенциального тепла (запасенного в криопродукте холода) по элементам конструкции баллона. Очевидно, что в случае отсутствия теплопритоков снаружи конечное температурное состояние баллона определяется соотношением полной энтальпии стенки теплового баллона и потенциалом криопродукта.

Нетрудно показать, что если тепла определяемого энтальпией стенки баллона, оказывается достаточно для испарения заправленной массы криопродукта, то задача сводится к решению балансовых соотношений перераспределения энергии, но динамика процесса и время полного испарения криоагента определяются из решения задачи теплопереноса. При этом на каждом шаге расчета по времени условия на границах газового

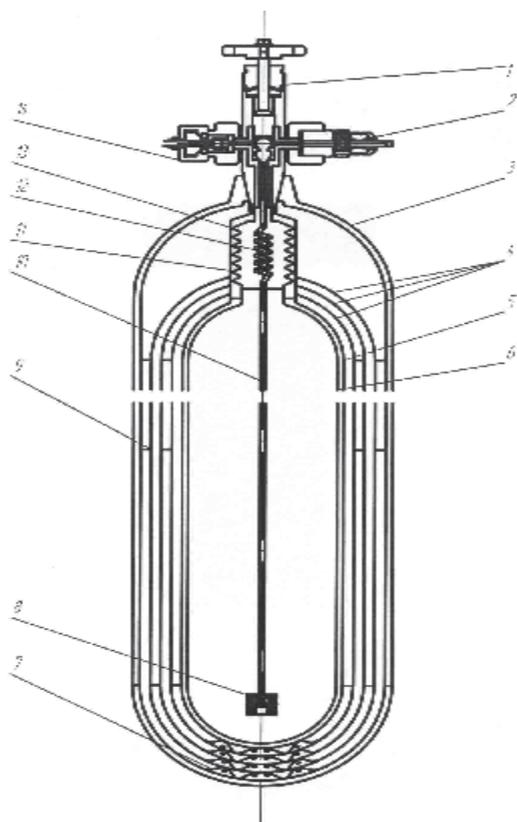


Рис. 1. Конструктивная схема универсального газового баллона:

- 1 – вентиль; 2 – клапан предохранительный;
- 3 – баллон; 4 – экраны; 5 – теплоизоляция;
- 6 – термос; 7 – тарелка прижимная; 8 – фильтр;
- 9 – вставка амортизационная; 10 – трубка газозаборная; 11 – сильфон; 12 – змеевик;
- 13 – стакан; 14 – заправочный штуцер

объема будут соответствовать условиям первого ряда. Изменения теплофизических свойств прослоек газа и криопродукта необходимо учитывать на каждом временном шаге расчета.

В случае теплопритоков к внешней поверхности баллона на каждом временном шаге расчета задача теплопереноса снаружи решается с граничными условиями 3-го рода и со стороны криопродукта – с граничными условиями 1-го рода. В обоих случаях в баллоне ожидаются следующие физические процессы.

Жидкость начинает испаряться, и испарившаяся доля криопродукта перераспределяется по слоям газовой полости. Давление в начальный момент может даже снизиться, что будет способствовать дальнейшему испарению жидкости. Однако через какое-то время давление может возрасти и кипение прекратится. Особенности начального этапа и последующего поведения криопродукта будут обусловлены соотношением объемов жидкой и газовой фаз. Так, если удельный объем двухфазной смеси (при изохорном процессе) больше $v_{\text{ср}}$, то жидкость будет непрерывно испаряться вплоть до полного перехода криопродукта в состояние сухого насыщенного пара.

Приведенные выше рассуждения построены на анализе так называемых классических двухфазных систем, в которых температура и давление насыщенных паров и жидкости равны. Но в рассматриваемом баллоне, когда в газовой полости температура существенно отличается от температуры криопродукта, равновесным (точнее квазиравновесным) можно назвать состояние жидкости и паров только во внутреннем сосуде (термосной емкости).

Тогда для такой термодинамической системы (всего баллона) уравнение Клапей-

рона-Клаузиуса в виде $\frac{dP}{dT} = \frac{r}{T(v_2 - v_1)}$

может быть неприменимым и аналитическое решение задачи будет некорректным.

Наиболее близкой из рассмотренных подобных систем будет система при неодинаковых давлениях фаз [2], в которой на каждую из двух сосуществующих фаз действуют

различные давления (например, наддув сосуда инертным газом). В нашем случае дополнительное давление может задаваться газовой полостью с повышенной температурой за счет внешних теплопритоков, а температура насыщенных паров над жидкостью будет соответствовать ее температуре.

Тогда при общем изменении давления в баллоне и воздействии его на жидкую фазу

по уравнению Д. Г. Пойтинга $\left(\frac{\partial E_2}{\partial E_1}\right)_o = \frac{v_1}{v_2}$

давление в паровой фазе также возрастет, но его увеличение будет во столько раз меньше приращения общего давления, во сколько раз удельный объем одной фазы меньше удельного объема другой фазы. То есть применительно к рассматриваемому баллону при общем росте давления в баллоне давление насыщения должно быть ниже общего давления и процесс испарения должен происходить непрерывно.

Вместе с этим относительно представленных выводов необходимо сделать следующие замечания. Во-первых, в отличие от системы с сосуществующими фазами и инертным газом по [2] в рассматриваемом случае в газовой полости баллона и термосе находится одно и то же рабочее тело, и эти разделенные по объемам составляющие не отвечают закону Дальтона. Во-вторых, уравнение Д. Г. Пойтинга выведено для условия $T = \text{const}$ в сосуществующих фазах, а это условие в рассматриваемом случае сохраняется только в объеме термосной емкости.

Таким образом, для решения задачи требуется найти свой алгоритм. По предварительным оценкам наиболее приемлемым будет численный метод совместного решения задачи энергетики процессов испарения и перераспределения испарившейся массы криопродукта между термосной и газовой полостями и задачи переноса тепла через систему изоляции газовой полости с учетом влияния на теплофизические характеристики рабочего тела изменяющихся давления и температуры.

В настоящее время такой численный метод расчета реализован с применением ввода теплофизических характеристик. Предва-

рительные результаты подтверждают ожидаемые предположения по поведению рабочего тела и тепловому состоянию баллона. Прежде чем реализовать такой уточненный метод расчета, предлагается оценить температурное состояние баллона и процессы в нем по упрощенной методике, приведенной ниже.

Полный объем универсального газового баллона находится из условия заполнения его газом при максимально допустимых давлении и температуре:

$$V_{\dot{A}} = \frac{m_{\dot{c}} \cdot R \cdot T_{max}}{P_{max}} \quad (1)$$

По значению массы заправки $m_{\dot{c}}$ определяется объем внутреннего сосуда (термоса):

$$V_{\dot{O}} = \frac{m_{\dot{c}}}{\rho_{\dot{a}.i.}} - \frac{m_{\dot{a}}}{\rho_{\dot{a}.i.}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\dot{a}.i.}$ - плотность жидкого криопродукта при условиях заправки, $m_{\dot{a}}$ - масса газообразной фазы в газовой полости, $\rho_{\dot{a}.i.}$ - средняя плотность газообразного продукта.

Тогда объем газовой полости определится как добавочный объем к объему термоса:

$$\begin{aligned} V_{\dot{a}.i.} &= V_{\dot{A}} - V_{\dot{O}} = \frac{m_{\dot{c}} \cdot R \cdot T_{max}}{P_{max}} - \frac{m_{\dot{c}}}{\rho_{\dot{a}.i.}} = \\ &= m_{\dot{c}} \cdot \left(\frac{R \cdot \dot{O}_{max}}{P_{max}} - \frac{1}{\rho_{\dot{a}.i.}} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Протекание процессов в баллоне и изменение параметров будут зависеть от режима работы баллона.

Основными такими режимами будут: режим заправки (заполнение криопродуктом); безрасходное хранение; работа в расходном режиме.

При этом все три режима могут иметь особенности по начальному состоянию баллона. Например, заправку криопродуктом можно осуществлять в «теплый» баллон (тем-

пература баллона равна температуре окружающей среды) или в баллон с остатками жидкой фазы. Безрасходное хранение может осуществляться при различных уровнях температуры снаружи баллона. Опорожнение баллона может происходить жидкой фазой сразу после заправки криопродуктом либо после частичной газификации спустя некоторое время также жидкой фазой, либо после полной газификации уже отбором газа.

Прежде чем приступить к решению общей задачи, будет полезным оценить теплопроводные свойства системы внутренней изоляции, отвечающей требованию допустимых термических напряжений стенки баллона. Эти напряжения определяются темпом изменения температуры и градиентом температуры в стенке.

Подвод тепла к криопродукту осуществляется через стенку термосной емкости трубопроводом выдачи продукта и сильфонную горловину. По трубке и сильфону тепло передается теплопроводностью

$$\begin{aligned} Q_{\dot{O}} + Q_{\dot{N}} &= \lambda_{\dot{O}} \cdot F_{\dot{O}} \cdot \frac{\dot{O}_{\dot{A}} - \dot{O}_{\dot{a}}}{l_{\dot{O}}} + \\ &+ \lambda_{\dot{N}} \cdot F_{\dot{N}} \cdot \frac{\dot{O}_{\dot{A}} - \dot{O}_{\dot{a}}}{l_{\dot{C}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где λ_T, λ_C - теплопроводность материала трубки и сильфона; F_T, F_C - площади сечения стенки и сильфона; $\dot{O}_{\dot{A}}, \dot{O}_{\dot{a}}$ - текущие значения температуры стенки баллона и криопродукта (температура стенки термоса принимается равной температуре криопродукта $\dot{O}_{\dot{O}} = \dot{O}_{\dot{a}}$).

Тепло, подводимое к боковой поверхности термосной емкости, обусловлено теплопроводностью газа и тепловыми мостами (для предварительного этапа расчета последними можно пренебречь – это доказывается ниже) и определяется следующим выражением:

$$Q_{\dot{e}\dot{c}} = \lambda_{\dot{e}\dot{c}} \cdot \bar{F}_{\dot{y}\dot{o}} \cdot \frac{T_{\dot{A}} - \dot{O}_{\dot{a}}}{\delta_{\dot{e}\dot{c}}}. \quad (5)$$

Здесь $\lambda_{\dot{e}\dot{c}}$ - эквивалентная теплопроводность системы экранов, теплоизоляция термоса и др.; $\bar{F}_{\dot{y}\dot{o}}$ - среднее значение эффективной площади прохождения теплового потока; $\delta_{\dot{e}\dot{c}}$ - толщина газовых прослоек (радиальный зазор между стенкой баллона и стенкой термоса).

Тогда общие теплопритоки определяются суммой:

$$Q = Q_T + Q_C + Q_{\dot{e}\dot{c}} = (\dot{O}_A - \dot{O}_e) \cdot \left(\frac{F_T}{l_T/\lambda_T} + \frac{F_C}{l_C/\lambda_C} + \frac{\bar{F}_{\dot{y}\dot{o}}}{\delta_{\dot{e}\dot{c}}/\lambda_{\dot{e}\dot{c}}} \right). \quad (6)$$

Несложно показать, что комплекс

$$\frac{F_T}{l_T/\lambda_T} + \frac{F_C}{l_C/\lambda_C}$$

составляет менее 1 % от вели-

$$\frac{\bar{F}_{\dot{y}\dot{o}}}{\delta_{\dot{e}\dot{c}}/\lambda_{\dot{e}\dot{c}}}$$

чины. Таким образом, основные теп-

лопритоки будут осуществляться от боковых стенок баллона:

$$Q = \lambda_{\dot{e}\dot{c}} \cdot \frac{\dot{O}_A - \dot{O}_e}{\delta_{\dot{e}\dot{c}}} \cdot \bar{F}_{\dot{y}\dot{o}}. \quad (7)$$

Предположим, что время полной газификации криопродукта составляет 1 сутки, т. е. 24 часа, и за это время термические деформации и напряжения находятся в допустимых пределах.

Ставится вопрос: какого уровня должно быть значение коэффициента теплопроводности $\lambda_{\dot{e}\dot{c}}$, обеспечивающее заданное время газификации. Энергетический баланс будет следующим:

$$Q = \lambda_{\dot{e}\dot{c}} \cdot \frac{\dot{O}_A - \dot{O}_e}{\delta_{\dot{e}\dot{c}}} \cdot \bar{F}_{\dot{y}\dot{o}} \cdot \Delta\tau = \bar{r} \cdot m_{\dot{c}}. \quad (8)$$

Здесь \bar{r} - среднее значение теплоты испарения криопродукта в диапазоне давлений

до критического значения ($r_{\dot{e}\dot{o}} = 0$). Для метана $r_{112}^{01} = 511 \frac{\dot{e}\dot{A}\dot{e}}{\dot{e}\dot{a}}$, $\bar{r} = 255 \frac{\dot{e}\dot{A}\dot{e}}{\dot{e}\dot{a}}$ (для предварительных оценок такое осреднение допустимо).

Из предыдущего выражения эквивалентная теплопроводность изоляции и газовых прослоек определится следующим образом:

$$\lambda_{\dot{e}\dot{c}} = \frac{\bar{r} \cdot m_{\dot{c}} \cdot \delta_{\dot{e}\dot{c}}}{(\dot{O}_A - \dot{O}_e) \cdot \bar{F}_{\dot{y}\dot{o}} \cdot \Delta\tau}. \quad (9)$$

Температура баллона \dot{O}_A понижается с 300 К до 200 К, т. е. среднее значение температуры баллона $\bar{\dot{O}}_A = 250$ К, а температура криопродукта \dot{O}_e повышается от 112 К до 190 К, т. е. среднее значение температуры криопродукта $\bar{\dot{O}}_e = 150$ К.

Вычислим значение теплопроводности изоляции:

$$\lambda_{\dot{e}\dot{c}} = \frac{255 \cdot 12 \cdot 0,05 \cdot 10^3}{(250 - 150) \cdot 1 \cdot 3600 \cdot 24} = 0,018 \frac{\dot{A}\dot{o}}{\dot{i} \cdot \dot{E}}.$$

Если время полной газификации криопродукта уменьшится до 2,4 часа, то теплопроводность изоляции, соответственно, изменит-

$$\text{ся до значения } \lambda_{\dot{e}\dot{c}} \cong 0,2 \frac{\dot{A}\dot{o}}{\dot{i} \cdot \dot{E}}.$$

Для метана критические значения температуры и давления: $T_{кр} = 190$ К, $P_{кр} = 4,64$ МПа. Если считать, что теплопроводность системы изоляции будет равна собственной теплопроводности газа, то среднее значение теплопроводности газообразного метана [3] составит $\bar{\lambda} = 0,03 \frac{\dot{A}\dot{o}}{\dot{i} \cdot \dot{E}}$. Это позволит получить продолжительность процесса испарения до 14 часов.

Уточним, до какой температуры охладится баллон при полной газификации криопродукта. При толщине стенки в 10 мм масса баллона $m_A = 90$ кг ($V = \pi \cdot 27 \cdot 1 \cdot 135 = 11445 \text{ м}^3$,

$$\rho = 7,8 \frac{\dot{a}}{\dot{n}\dot{i}^3}, m_A = 11445 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 89 \dot{e}\dot{a}).$$

При захлаживании баллона от 300 К до 190 К без внешних теплопритоков потребуются испарить некоторое количество криопродукта, для СПГ это будет

$$\Delta m_{\tilde{N}\tilde{A}} \cdot \bar{r} = m_{\tilde{A}} \cdot \tilde{N}_{\tilde{A}} \cdot (\dot{O}_0 - 190); \quad (10)$$

$$\Delta m_{\tilde{N}\tilde{A}} = \frac{90 \cdot 0,5 \cdot 100}{255} = 17,6 \text{ êã.}$$

Масса заправки составляет $m_{\tilde{c}} = 12 \text{ êã}$, т. е. $\Delta m_{\tilde{N}\tilde{A}} > m_{\tilde{c}}$, и, соответственно, температура баллона будет выше 190 К, а именно:

$$\begin{aligned} \dot{O}_A^{min} &= T_0 - \frac{m_{\tilde{c}} \cdot \bar{r}}{m_{\tilde{A}} \cdot \tilde{N}_{\tilde{A}}} = 300 - \frac{12 \cdot 255}{90 \cdot 0,5} = \\ &= 230 \text{ Ê} \approx -40 \text{ }^{\circ}\tilde{N}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, из предварительных оценок следует, что при существующих допустимых уровнях давления заправки и температуры баллона (-40°C) [4] универсальный газовый баллон может иметь допустимую

температуру стенки, причем ее захлаживание будет происходить в течение нескольких часов без термоудара, что обеспечивает больший ресурс работы.

Представленные здесь расчетно-аналитические данные дают основание считать универсальный газовый баллон перспективным для практического применения не только по снижению энергозатрат при заправке, но и по ресурсу.

Список литературы

1. Топливный баллон./ Довгялло А. И., Лукачев С. В. и др.// Патент № 2163699, Россия, МПК 7F17C9/02, 99114577/06 заявл. 02.07.1999, опубл. 27.02.2001. Бюл. № 6.
2. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. - М.: Энергия, 1968.
3. Загорученко В. А., Журавлев А. М. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана. - М.: Изд-во стандартов, 1969.
4. ГОСТ 949-73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P \leq 16,6$ МПа (200 кгс/см²). Технические условия.

PECULIARITIES OF SETTING UP A PROBLEM OF CALCULATING PROCESSES FOR A GENERAL-PURPOSE GAS CYLINDER AS A NON-CLASSICAL TWO-PHASE SYSTEM AND ESTIMATION OF ITS TEMPERATURE CONDITION

© 2006 T. V. Ashikhmina, A. I. Dovgyallo

Samara State Aerospace University

The paper describes the processes in a general-purpose gas cylinder different from cryogenic capacities with low pressure levels stored without draining in that heat isolation is inside the vessel. Existing approaches to solving the problem of process calculation for similar two-phase systems are analysed. The results of calculating cylinder temperature condition carried out using a simplified method are presented.