

ПРОЦЕССЫ В УНИВЕРСАЛЬНОМ ГАЗОВОМ БАЛЛОНЕ ПРИ ХРАНЕНИИ КРИОПРОДУКТОВ

Довгялло А.И., Ашихмина Т.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет

Отличие универсального газового баллона [1] от криогенных емкостей с малыми уровнями давления при бездренажном хранении заключается в том, что теплоизоляция располагается не снаружи, а внутри самой емкости, и она не может быть вакуумной. Изоляция располагается между внешней стенкой термосной емкости и внутренней поверхностью основной стенки баллона. Внутри универсального газового баллона происходят сложные теплофизические процессы, приводящие к изменению параметров жидкой и паровой фаз.

В литературе [2] приводятся анализ и расчеты процессов для классического случая двухфазной системы (рис. 1).

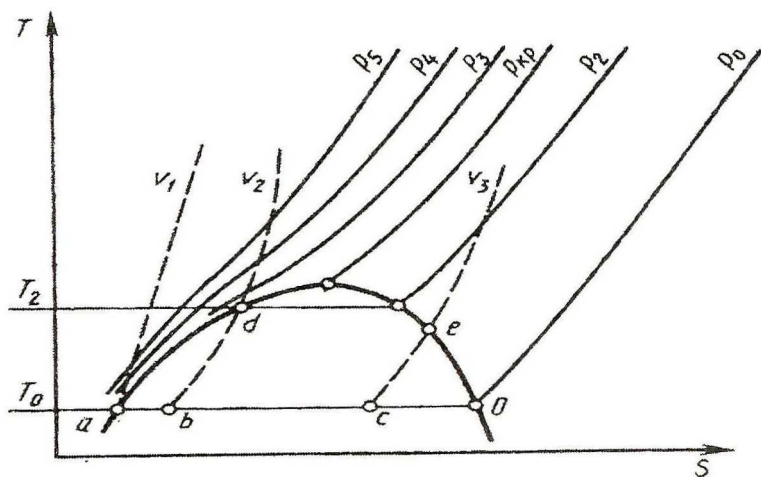


Рис. 1. Схема процесса бездренажного хранения криоагента в закрытой емкости в $T-s$ -диаграмме

Точка «а» соответствует полному заполнению жидкостью всей емкости. В этом случае теплопритоки приводят к резкому повышению дав-

ления (изохора V_1). В связи с этим обстоятельством емкость заполняют не полностью, оставляя паровое пространство, характеризующееся степенью заполнения φ (точка «b»). Для начального момента времени:

$$\varphi_0 = \frac{a-b}{0-a}.$$

За счет теплопритока из окружающей среды $q_{o.c.}$ происходит испарение части жидкости, при этом температура и давление повышаются (участок изохоры «b - d») и при $P = P_2$ (точка «d» на пограничной кривой) паровая фаза исчезает, весь объем заполняется жидкостью, и давление резко возрастает (изохора V_2). Если φ_0 достаточно велико (точка «c»), то повышение температуры и давления (участок изохоры «c - d») ведет к полному испарению жидкости.

Таким образом, степень заполнения φ существенно влияет на ход процесса и его характеристики.

В известных двухфазных системах предполагается, что жидкость находится в равновесном состоянии с паровой фазой. Так, например, в точках «b» или «c» температура пара и жидкости одинакова.

Для универсального газового баллона такие допущения некорректны. Кроме того, сама конструкция должна способствовать тому, чтобы температура газа у стенки баллона была как можно выше температуры испарившейся фазы внутри термоса.

В предполагаемой конструкции баллона (рис. 2) теплоизоляция и экраны в совокупности с газовыми прослойками между ними сами по себе являются многослойной теплоизоляцией. Все это предназначено для предотвращения теплового удара и снижения термических напряжений в стенке баллона.

Очевидно также, что каждая газовая прослойка будет иметь свое значение температуры при одинаковом в рассматриваемый момент времени давлении. В этом случае для каждого слоя газа удельные объемы (плотности) будут также различными, и процесс в газовой (паровой) части объема баллона нельзя считать изохорным.

Для изучения процессов в баллоне необходимо определить закономерности изменения объема (массы) жидкости и газа при повышении температуры и давления.

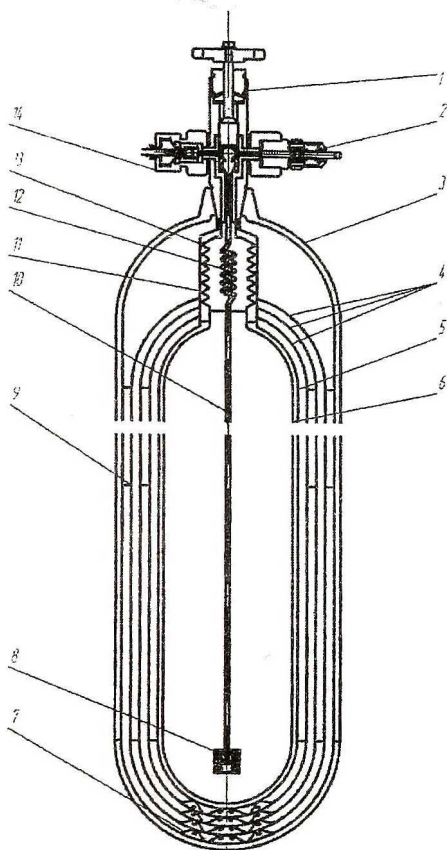


Рис. 2. Конструктивная схема универсального газового баллона: 1 – вентиль; 2 – клапан предохранительный; 3 – баллон; 4 – экраны; 5 – теплоизоляция; 6 – термос; 7 – тарелка прижимная; 8 – фильтр; 9 – вставка амортизационная; 10 – трубка газозаборная; 11 – сифон; 12 – змеевик; 13 – стакан; 14 – заправочный штуцер

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

$$V_B = \frac{m_3 \cdot R \cdot T_{\max}}{P_{\max}}$$

По значению массы заправки m_3 определяется объем внутреннего сосуда (термоса):

$$V_T = \frac{m_3}{\rho_{ж.о.}} - \frac{m_2}{\rho_{г.о.}},$$

где $\rho_{ж.о.}$ – плотность жидкого криопродукта при условиях заправки, m_2 – масса газообразной фазы в газовой полости, $\rho_{г.о.}$ – средняя плотность газообразного продукта.

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

$$V_{г.н} = V_B - V_T = \frac{m_3 \cdot R \cdot T_{\max}}{P_{\max}} - \frac{m_3}{\rho_{ж.о.}} = m_3 \cdot \left(\frac{R \cdot T_{\max}}{P_{\max}} - \frac{1}{\rho_{ж.о.}} \right).$$

Объемная и массовая степень заполнения баллона продуктом выразится для начального момента времени следующим образом:

$$\varphi_0 = \frac{V_{ж.о.}}{V_B}; \quad \varphi_{0.м} = \frac{G_{ж.о.}}{\sum V_{гi} \cdot \rho_{гi} + m_з}.$$

Текущие значения объемной и массовой степени заполнения объема будут определяться как:

$$\varphi = \frac{V_{ж}}{V_B}; \quad \varphi_{м} = \frac{G_{ж}}{\sum V_i \cdot \rho_i \cdot m_{жi}},$$

где $m_{жi} = \rho' \cdot (V_T - V_{ж})$; ρ' - плотность жидкости, определяемая по равновесным диаграммам; ρ_i - плотность газа в i -той прослойке, представляющая собой функцию температуры в i -той прослойке при текущем давлении P_i .

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 (температура 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 так же жидкой фазой, либо после полной газификации уже отбором газа.

Таким образом, в первую очередь, необходимо поставить задачу об энергетике процессов и распределении температуры, после чего ввести ее в общую задачу определения изменения массы жидкой и газовой фаз, а также изменения давления.

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 (рис. 1).

По трубке и сильфону тепло передается теплопроводностью:

$$Q_T + Q_C = \lambda_T \cdot F_T \cdot \frac{T_B - T_{жк}}{l_T} + \lambda_C \cdot F_C \cdot \frac{T_B - T_{жк}}{l_C},$$

где λ_T , λ_C - теплопроводность материала трубки и сильфона; F_T , F_C - площади сечения стенки и сильфона; T_B , $T_{жк}$ - текущие значения температуры стенки баллона и криопродукта (температура стенки термоса принимается равной температуре криопродукта $T_T = T_{жк}$).

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

$$Q_{из} = \lambda_{из} \cdot \bar{F}_{эф} \cdot \frac{T_B - T_{жк}}{\delta_{из}}.$$

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

Тогда общие теплопритоки определяются суммой:

$$Q = Q_T + Q_C + Q_{из} = (T_B - T_{жк}) \cdot \left(\frac{F_T}{l_T / \lambda_T} + \frac{F_C}{l_C / \lambda_C} + \frac{\bar{F}_{эф}}{l_{из} / \lambda_{из}} \right).$$

Можно допустить, что и сильфон и трубка будут выполнены из стали с низкой теплопроводностью (например, X18H10T, $\lambda = 10 \frac{Bm}{M \cdot K}$),

причем $l_C \approx 10 \cdot l_T$, $F_C \approx F_T = 5 \dots 10 \text{ мм}^2$.

Получаем:

$$Q = (T_B - T_{жс}) \cdot \left(\frac{F_T}{l_T / \lambda_T} + \frac{F_C}{l_C / \lambda_C} + \frac{\bar{F}_{\text{эф}}}{l_{\text{из}} / \lambda_{\text{из}}} \right) = (T_B - T_{жс}) \cdot \left(\frac{10 \cdot F_T + F_T}{10 \cdot l_T / \lambda_T} + \frac{\bar{F}_{\text{эф}}}{\delta_{\text{из}} / \lambda_{\text{из}}} \right).$$

Учитывая, что $\bar{F}_{\text{эф}} \approx 1 \text{ м}^2$, $\lambda_{\text{из}} \approx 0,2 \frac{Bm}{M \cdot K}$, $\delta_{\text{из}} = 50 \text{ мм}$,

$F_T = 10 \text{ мм}^2$, $\lambda_T = 10 \frac{Bm}{M \cdot K}$, $l_T = 1 \text{ м}$, несложно показать комплекс

$$\frac{10 \cdot l_T}{10 \cdot l_T / \lambda_T} \text{ составляет менее 1\% от величины } \frac{\bar{F}_{\text{эф}}}{\delta_{\text{из}} / \lambda_{\text{из}}}.$$

Таким образом, основные теплопритоки будут осуществляться от боковых стенок баллона:

$$Q = \lambda_{\text{из}} \cdot \frac{T_B - T_{жс}}{\delta_{\text{из}}} \cdot \bar{F}_{\text{эф}}.$$

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 $\lambda_{\text{из}}$, обеспечивающего заданное время газификации. Энергетический баланс будет следующим:

$$Q = \lambda_{\text{из}} \cdot \frac{T_B - T_{жс}}{\delta_{\text{из}}} \cdot \bar{F}_{\text{эф}} \cdot \Delta \tau = \bar{r} \cdot m_3.$$

Здесь \bar{r} - среднее значение теплоты испарения криопродукта в диапазоне давлений до критического значения ($r_{кр} = 0$). Для метана $\bar{r} = 255 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ (для предварительных оценок такое усреднение допустимо).

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

$$\lambda_{из} = \frac{\bar{r} \cdot m_3 \cdot \delta_{из}}{(T_B - T_{жс}) \cdot \bar{F}_{эф} \cdot \Delta \tau}$$

Температура баллона T_B понижается с 300 К до 200 К, т.е. среднее значение температуры баллона $\bar{T}_B = 250$ К, а температура криопродукта $T_{жс}$ повышается от 112 К до 190 К, т.е. среднее значение температуры криопродукта $\bar{T}_{жс} = 150$ К.

Вычислим значение теплопроводности изоляции:

$$\lambda_{из} = \frac{255 \cdot 12 \cdot 0,05 \cdot 10^3}{(250 - 150) \cdot 1 \cdot 3600 \cdot 24} = 0,018 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Если время полной газификации криопродукта уменьшится до 2,4 часа, то теплопроводность изоляции, соответственно, изменится до значения $\lambda_{из} \cong 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

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 теплопроводность метана принимает следующие значения [3]:

$$\text{при } P = 20 \text{ МПа и } T = 196 \text{ К} \quad \lambda = 0,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\text{при } P = 20 \text{ МПа и } T = 298 \text{ К} \quad \lambda = 0,063 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\text{при } P = 2 \text{ МПа и } T = 196 \text{ К} \quad \lambda = 0,024 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

при $P = 2$ МПа и $T = 298$ К $\lambda = 0,035 \frac{Вт}{м \cdot К}$

Таким образом, среднее значение теплопроводности газообразного метана составит $\bar{\lambda} = 0,03 \frac{Вт}{м \cdot К}$. 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 $m_B = 90$ кг
 $(V = \pi \cdot 27 \cdot 1 \cdot 135 = 11445 \text{ см}^3, \rho = 7,8 \frac{г}{\text{см}^3}, m_B = 11445 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 89 \text{ кг})$.

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

$$\Delta m_{СПГ} \cdot \bar{r} = m_B \cdot C_B \cdot (T_0 - 190); \Delta m_{СПГ} = \frac{90 \cdot 0,5 \cdot 100}{255} = 17,6 \text{ кг}.$$

Масса заправки составляет $m_3 = 12$ кг, т.е. $\Delta m_{СПГ} > m_3$ и, соответственно, температура баллона будет выше 190 К, а именно:

$$T_B^{\min} = T_0 - \frac{m_3 \cdot \bar{r}}{m_B \cdot C_B} = 300 - \frac{12 \cdot 255}{90 \cdot 0,5} = 230 \text{ К} \approx -40 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Таким образом, из предварительных оценок следует, что при существующих допустимых уровнях давления заправки и температуры баллона (-40 °С) [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.

Ожидаемый термодинамический процесс в этом случае для жидкости будет осуществляться из области однофазного состояния, расположенной левее линии насыщения, а процессы в газовых прослойках пойдут в области однофазного газового состояния, что будет способствовать

уменьшению теплопритоков к криопродукту за счет исключения фазовых переходов (обратной конденсации) в газовых прослойках между экранами.

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./ Д о в г я л л о А.И., Л у к а ч е в С.В и др.// Патент № 2163699, Россия, МПК 7F17C9/02, 99114577/06 заявл. 02.07.1999, опубл. 27.02.2001. Бюл. № 6.
2. Криогенные системы: Учеб. для ВУЗов по курсу «Криогенная техника» / А р х а р о в А.М., Б е л я к о в В.П., М и к у л и н Е.И. и др. // М.: Машиностроение. 1987. – С. 475-526.
3. Загорученко В. А, Журавлев А.М. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 236 с.
4. ГОСТ 949-73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P \leq 16,6$ МПа (200 кгс/см²). Технические условия. -12 с.

УДК 536.46

ИСКРОВОЕ ЗАЖИГАНИЕ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В ПОТОКЕ

Егоров А.Г.

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

К настоящему времени проведено достаточно много теоретических и экспериментальных исследований по определению влияния электрических параметров системы зажигания и параметров потока на величину минимально необходимой энергии искрового разряда в движущейся смеси воздуха и капель топлива.