

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТОПЛИВНОМ БАЛЛОНЕ С КРИОГЕННОЙ ЗАПРАВКОЙ ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ ПРИ БЕЗДРЕНАЖНОМ ХРАНЕНИИ

© 2007 Т. В. Ашихмина

Самарский государственный аэрокосмический университет

В работе представлена методика численного моделирования процессов в топливном баллоне, способном обеспечивать как криогенную заправку сжиженным природным газом (СПГ), так и заправку компримированным. Полученные результаты расчетов подтверждают реальные перспективы создания опытных образцов универсального баллона, их испытания и эксплуатации.

Экономические и эксплуатационные требования, предъявляемые к емкостям хранения газов и криогенных жидкостей, требуют создания более совершенных конструкций, способных выдерживать большое давление, иметь увеличенный ресурс работы, способствовать снижению потерь рабочего тела и удовлетворять технологиям ускоренной заправки.

В случае использования природного газа на транспорте он заправляется в баллоны до давления 20 МПа. Заправка осуществляется на газонаполнительных станциях путем компримирования, при этом продолжительность заправки составляет несколько минут и сопровождается нагревом баллона, что снижает ресурс последнего, влечет его недозаправку или увеличивает время наполнения.

В последнее время в качестве передовой распространяется технология использования природного газа из криогенно-жидкого состояния. Это требует создания новых топливных емкостей и систем для различных видов транспорта, разработки новых нормативов и инструкций по эксплуатации.

Очевидно, что объективно полезным, своевременным и актуальным будет разработка и создание универсального оборудования, способного удовлетворять существующим технологиям применения компримированных газов и криогенных жидкостей.

Целью исследований, представленных в публикациях автора настоящей статьи, является создание технологии, обладающей новыми функциональными способностями и

повышенными эксплуатационными характеристиками, а именно - универсальной емкости для хранения и транспортировки газов как в компримированном, так и в криогенно-жидком состоянии.

На рис. 1 представлена конструкция такого универсального баллона [1].

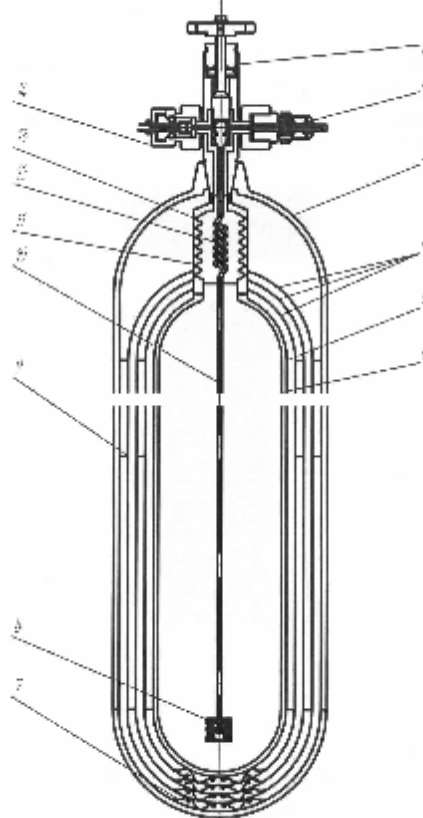


Рис. 1. Конструктивная схема универсального газового баллона: 1 – вентиль; 2 – клапан предохранительный; 3 – баллон; 4 – экраны; 5 – теплоизоляция; 6 – термос; 7 – тарелка прижимная; 8 – фильтр; 9 – вставка амортизационная; 10 – трубка заборная; 11 – сильфон; 12 – змеевик; 13 – стакан; 14 – заправочный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

После заправки во внутреннюю (термосную) емкость баллона [1] (рис. 1) криогенного продукта при подводе тепла извне поведение жидкости и газа в газовой полости может быть различным. Физические процессы в такой системе предсказать довольно сложно, и они будут зависеть не только от конструкции баллона, но и от начального состояния баллона и внешних условий.

Начальное состояние баллона определится остаточным давлением и температурой перед заправкой, а также температурой криоагента (переохлажденная жидкость, состояние насыщения и т. д.). Внешние условия могут меняться во времени: в начале баллон теплый, затем следует захлаживание баллона за счет испарения части жидкости, при этом тепло подводится только от стенки баллона, а тепловые потоки из окружающей среды незначительны, следующая фаза – возрастание теплопритоков к стенке баллона из окружающей среды. Типичным может быть либо случай отсутствия теплопритоков из внешней среды (теплоизолированный сосуд), либо ничтожно малые внешние тепловые потоки.

Предлагается рассмотреть поведение рабочего тела в баллоне при отсутствии внешних теплопритоков (изолированный баллон).

В начальный момент времени можно ожидать испарения жидкости. При этом часть испарившейся жидкости в виде паров перетекает в газовую полость, а другая часть остается в освободившемся после испарения объеме $\Delta V_{ж}$ над жидкой фазой.

Поступление холодных паров в газовую полость можно организовать несколькими способами. С целью снижения продольного градиента температуры по стенке баллона предполагается направить холодный газ сначала в полость внутренней (прилегающей к термосу) прослойки, а затем в радиальном направлении через перфорацию в экранах он будет перемещаться к периферии (рис. 2).

Следует отметить, что при движении к стенке расход газа будет уменьшаться в пределе до нуля. Не следует считать это перемещение газа аналогом конвективного движения, например, при естественной конвекции. Именно для предотвращения конвекции в газовой полости она разделена экранами на ряд узких прослоек, но массоперенос за счет натекания испарившейся части жидкости будет иметь место.

Таким образом, с одной стороны, от стенки баллона к термосу осуществляется передача тепла теплопроводностью как через многослойную стенку, что должно способ-

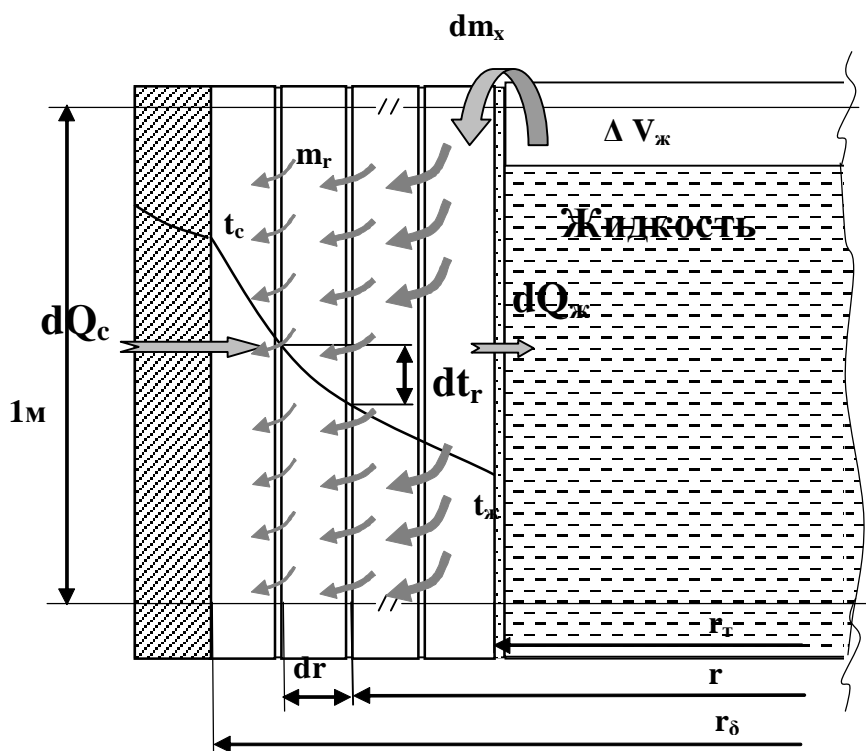


Рис. 2. Схема для постановки задачи и разработки алгоритма расчета процессов в баллоне

ствовать прогреву газа, но, с другой стороны, натекание в газовые прослойки низкотемпературных паров испарившейся жидкости приводит к захлаживанию газа и, в конечном счете, стенки баллона. Температурное поле в газовой полости будет изменяться во времени, причем распределение массы газа произойдет в соответствии с объемами кольцевых газовых прослоек и значениями температуры в них.

Предварительная оценка энергетике этих процессов представлена в [2]. Сложность задачи заключается в том, что рассматриваемая термодинамическая система «газовая полость-жидкость» не является равновесной. Как подсистема газовая полость является открытой (т. е. с переменной массой рабочего тела), и теплоперенос осуществляется теплопроводностью через многослойную газовую стенку со встречным потоком газа с переменным по радиусу расходом, причем эти процессы не стационарны.

Предшествующие данному анализу предварительные расчеты показали, что для любого временного промежутка натекающая в газовую полость масса по величине составляет не более 5 % от массы находящегося там газа, а сам процесс полной газификации криопродукта по времени занимает от 10 часов до нескольких суток.

Эти обстоятельства позволяют предположить условия квазистационарности процессов на выбранном шаге расчета по времени Δt . Так как изменение объема жидкости $\Delta V_{ж}$ за счет испарения незначительно, и сама газовая полость без учета объема газа в термосе имеет постоянный объем, то для рассматриваемого момента времени процессы в газовой полости можно рассматривать как при $V = const$. Термодинамика такого процесса рассмотрена в [3]. Однако известные решения приведены с допущениями равновесности процессов.

Если отвлечься от источника поступления газа и условно убрать экраны, разделяющие газовую полость, то задача для последней будет поставлена следующим образом.

Для рассматриваемого момента времени необходимо определить:

- количество тепла, транспортируемого через газовую полость к жидкости;
- количество испарившегося криопродукта;
- текущие параметры жидкости;
- текущие параметры в газовой полости;
- текущие значения температуры стенки баллона.

В случае испарения жидкости и натекании ее в газовую полость, тепло, подводимое к газу, определится разницей между dQ_c и $dQ_{жс}$. Очевидно, что при стационарном процессе переноса тепла теплопроводностью $dQ_c = dQ_{жс} = dI_c$. При квазистационарном (во временном промежутке Dt) процессе при натекании холодной массы m_x часть тепла dQ_c будет расходоваться на изменение внутренней энергии натекающей массы газа dm_x :

$$dQ_c - dQ_{жс} = dU_x. \quad (1)$$

Этот процесс аналогичен рассмотренному у В. П. Исаченко [4] в задаче о теплопроводности пористой стенки со стационарным транзитным потоком жидкости через поры. В этом случае правомерно сделать такие же, как в [4], допущения о том, что температура основного и вновь поступающего газа на координате r одинакова, а перенос тепла можно представить как теплопроводность основного газа и теплообмен между ним и поступающими массами газа dm_{xr} .

Получение функции температурного поля по радиусу $t = t(r)$ в условиях постоянства m_{xr} и изменения I, C_v, r затруднительно по причине сложности задания функций $I = I(P, T), C_v = C_v(P, T)$ для реального газа. В связи с этим предлагается пошедшее на изменение внутренней энергии газа тепло определять по осредненным параметрам.

Изменение внутренней энергии вновь поступившей массы газа в каждую газовую прослойку dm_{xr} определится

$$du_{xr} = m_{xr} \cdot C_{vr} \cdot dt_r,$$

$$\text{при этом } m_x = \int_{r_T}^{r_B} m_{xr}(r) \cdot dr.$$

Здесь определение распределения $m_{xr} = f(r)$ аналитическим путем также весьма сложно и не точно. Поэтому были выполнены расчеты вручную с использованием реальных табличных значений теплофизических свойств рабочего тела (для метана), которые показали, что поступившая в газовую полость масса dm_x распределяется в каждой газовой прослойке объемом $dV = 2\pi r dr$ практически поровну. Этого следовало ожидать, так как газ распределится в кольцевых полостях пропорционально их объемам, которые, в свою очередь, пропорциональны текущему радиусу r и обратно пропорционально температуре, являющейся также линейной функцией радиуса

$$t = t_{жс} + \left(\frac{t_c - t_{жс}}{r_B - r_T} \right) \cdot (r - r_T).$$

Таким образом, dU_x определится интегральной суммой du_{xr} по всем слоям.

С учетом вышеизложенного средневзвешенное по массе значение температуры газа в газовой полости будет соответствовать среднеарифметическому значению

$$\bar{t} = \frac{t_c + t_{жс}}{2}.$$

До такого среднего температурного уровня \bar{t} нагреется натекающая масса холодного газа dm_x , и изменение ее внутренней энергии как доли от изменения внутренней энергии всей массы газа в полости составит:

$$dU_x = dm_x (C_v \cdot \bar{t} - C_v \cdot t_{жс}), \quad (2)$$

где значения C_v взяты при соответствующих значениях t .

Таким образом, для рассматриваемого момента времени при заданном линейном распределении температуры газа по радиусу имеется возможность определить dQ_c и $dU_x \approx DU_x$.

Тепловой поток от стенки определится теплопроводностью:

$$dQ_c = \frac{p(t_c - t_{жс})}{\frac{1}{2\bar{I}} \ln \frac{r_B}{r_T} + \frac{1}{2I_{уз}} \ln \frac{r_{уз}}{r_T}} \cdot dt, \quad (3)$$

где \bar{I} - среднее значение теплопроводности газа;

$I_{уз}$ - теплопроводность изоляции термоса (если она присутствует).

Уравнение энергии для газовой полости с внешним подводом тепла и натеканием массы газа будет выглядеть следующим образом:

$$dQ_c - dQ_{жс} + i_x \cdot dm_x = dU, \quad (4)$$

где $(dQ_c - dQ_{жс})$ - тепло, равное разности подводимого и отводимого теплового потока, идет на dU_x , т. е.

$$dQ_c - dQ_{жс} = dU_x, \quad (5)$$

где dU - изменение внутренней энергии газа в полости за счет внешнего тепла и натекания массы холодного газа.

В свою очередь, dU как полный дифференциал можно выразить следующим образом:

$$dU = \bar{C}_v \cdot m \cdot dT + \bar{C}_v \cdot T \cdot dm, \quad (6)$$

где m и T соответственно масса и температура газа в газовой полости.

Подстановка (5) в (4) дает следующее уравнение:

$$dU_x + i_x \cdot dm_x = dU \quad (7)$$

или с учетом (6)

$$dU_x + i_x \cdot dm_x = \bar{C}_v \cdot m \cdot dT + \bar{C}_v \cdot T \cdot dm_x. \quad (8)$$

Уравнение (8) необходимо рассмотреть более подробно.

Как уже отмечалось, dU_x есть изменение внутренней энергии поступившей массы холодного газа за счет внешнего тепла, а dU - это изменение внутренней энергии всего газа за счет натекания холодной массы dm_x . Причем первая ее составляющая в (8) обусловлена изменением температуры для всей массы газа, а вторая – привнесением энергии с массой dm_x . Таким образом, физически причины для dU_x и dU разные.

Суммарный эффект изменения внутренней энергии газа можно считать алгебраической суммой dU_Σ и уравнение (8) запишется в следующем виде:

$$i_x \cdot dm_x = -dm_x (\bar{C}_v \cdot T - C_{v,жс} \cdot T_{жс}) + \bar{C}_v \cdot m \cdot dT + \bar{C}_v \cdot T \cdot dm_x \quad (9)$$

После преобразований получаем

$$i_x \cdot dm_x = \bar{C}_v \cdot m \cdot dT + C_{v,жс} \cdot T_{жс} \cdot dm_x,$$

откуда изменение температуры в газовой полости определится следующим образом:

$$dT = \frac{i_x \cdot dm_x - C_{v,жс} \cdot T_{жс} \cdot dm_x}{\bar{C}_v \cdot m}. \quad (10)$$

При расчете численным методом $dm_x \approx \Delta T$.

Таким образом, новое значение температуры газа в газовой полости на следующем временном шаге определится через приращение ΔT :

$$T_{i+1} = T_i + \Delta T. \quad (11)$$

Основываясь на приведенных выше соотношениях, был разработан алгоритм и составлена программа расчета.

Алгоритм содержит следующую последовательность расчетных действий:

- задаются конструктивные параметры баллона, параметры заправки, начальные параметры рабочего тела в баллоне, температура стенки и др.;

- расчет ведется на один погонный метр цилиндрического баллона;

- для первого шага расчета определяют параметры состояния газа в газовой полости баллона, параметры жидкости, насыщенных паров над жидкостью в термосной емкости, занимаемые ими объемы и массы;

- задаваясь в качестве шага расчета величину испарившейся доли жидкости $\Delta m_{жс}$, рассчитывается потребное количество тепла, необходимое для его испарения;

- исходя из последней и располагаемой тепловой мощности (3) определяется время процесса для текущего шага расчета;

- по потере энтальпии стенки баллона находится ее температура;

- масса испарившейся жидкости расчетным образом распределяется между освобожденным в термосе объемом и газовой полостью баллона;

- по температуре и удельному объему в газовой полости находится давление в баллоне;

- по изменению внутренней энергии в газовой полости за счет притока низкотемпературных паров Δm_x из термоса уточняется значение температуры стенки;

- с новыми данными по состоянию рабочего тела и стенки баллона расчет входит в новый цикл.

Следует отметить, что все теплофизические характеристики рабочего тела и стенки баллона, а также изоляции термосной емкости на каждом временном шаге определялись по формулам, полученным после обработки таблиц с достоверностью аппроксимации не ниже 0,98.

Расчеты, проведенные для баллонов различных типов показали, что процессы изменения параметров являют собой монотонные функции по времени (рис. 3), причем температурные зависимости для стенки, жидкости и газа в газовой полости асимптотически приближаются к равновесному состоянию, характеризующемуся равенством температуры по всему объему баллона, а давление соответствует давлению насыщения при данной температуре, причем в зависимости от типа баллона давление может быть как ниже, так и выше критического.

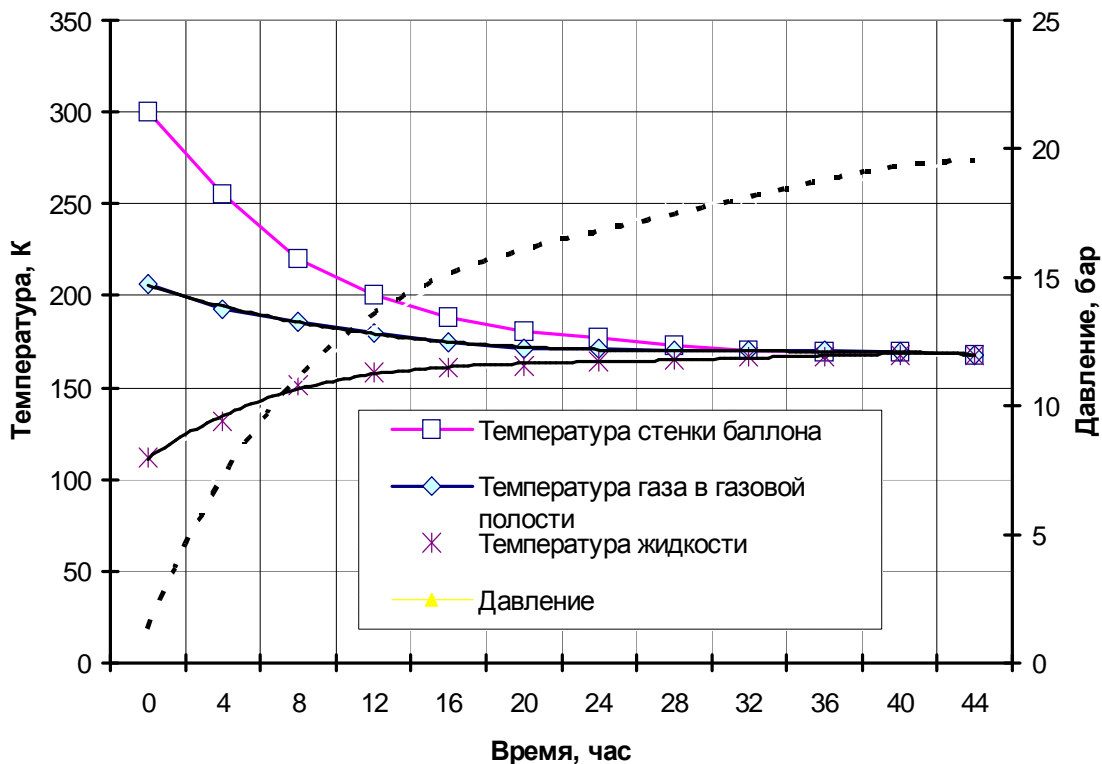


Рис. 3. Изменение параметров в баллоне при бездренажном хранении СПГ (баллон автомобильный, объем 40 л, эксплуатационное давление 20 МПа, наружный диаметр 0,212 м, толщина стенки 6 мм, масса заправки 4,04 кг природного газа, температура заправки 112 К, давление заправки 0,1 МПа. Время прогрева до равновесного состояния (температура 168 К, давление 1,96 МПа) – 44 часа)

Интересным является тот факт, что для баллонов других типоразмеров (наружный диаметр до 0,377 м, эксплуатационное давление до 30 МПа) равновесная температура оказалась также на уровне 160 ... 170 К, и только для баллонов из нелегированной стали (с большей толщиной стенки) равновесная температура достигала уровня 180... 190 К.

Расчеты на прочность показали, что термические напряжения в стенке даже на первых минутах после заправки криопродуктом на два порядка ниже, чем напряжения от внутреннего давления.

Таким образом, представленные в настоящей публикации методика и результаты расчетов позволяют утверждать, что универсальный баллон, способный обеспечивать как криогенную заправку СПГ, так и заправку компримированием, имеет реальные перспек-

тивы к созданию опытных образцов, их испытаниям и эксплуатации.

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, опубли. 27.02.2001. Бюл. № 6.
2. Довгялло А. И., Ашихмина Т. В. Особенности постановки задачи расчета процессов для универсального газового баллона как неклассической двухфазной системы и оценка его температурного состояния // Вестник СГАУ № 1(9). – Самара, 2006. – С. 133-137.
3. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. - М.: «Энергия», 1968.
4. В. П. Исаченко, В. А. Омпова, А. С. Сукомел. Теплопередача. - М.: Энергоиздат, 1981.