

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 компримированием. 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].

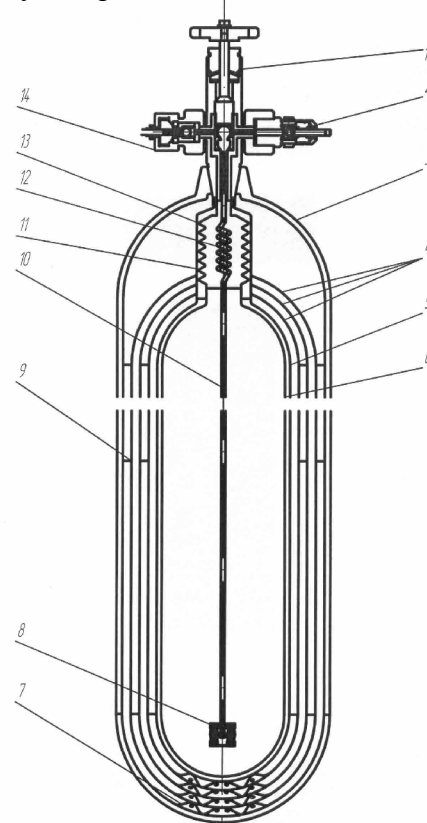


Рис. 1. Конструктивная схема универсального газового баллона: 1 – вентиль; 2 – клапан предохранительный; 3 – баллон; 4 – экраны; 5 – теплоизоляция; 6 – термос; 7 – тарелка прижимная; 8 – фильтр; 9 – вставка амортизационная; 10 – трубка заборная; 11 – змеевик; 12 – стакан; 13 – стакан; 14 – заправочный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

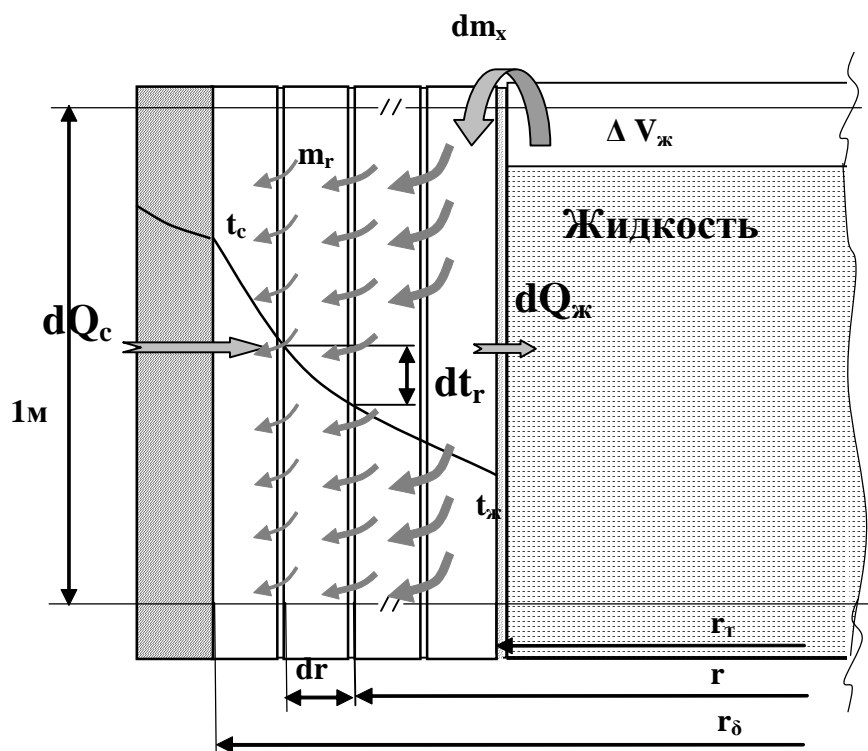


Рис. 2. Схема для постановки задачи и разработки алгоритма расчета процессов в баллоне

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 $dm_{x,r}$.

Получение функции температурного поля по радиусу $t = t(r)$ в условиях постоянства $m_{x,r}$ 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 $dm_{x,r}$ определится

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

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

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 $dV = 2prdr$ 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:

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

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

$I_{из}$ - 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.

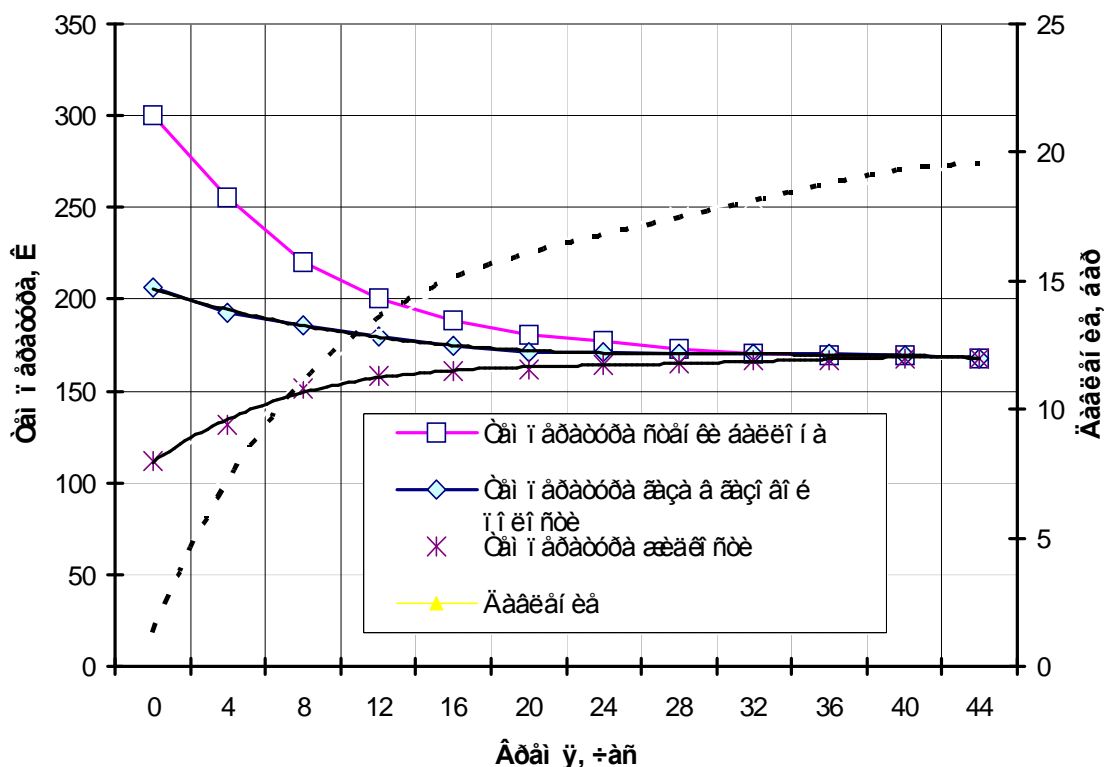


Рис. 3. Изменение параметров в баллоне при бездренажном хранении СПГ (баллон автомобильный, объем 40 л, эксплуатационное давление 20 МПа, наружный диаметр 0,212 м, толщина стенки 6 мм, масса заправки 4,04 кг природного газа, температура заправки 112 К, давление заправки 0,1 МПа. Время прогрева до равновесного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

**NUMERICAL MODELING OF PHYSICAL PROCESSES IN FUEL TANK
REFUELED BY CRYOGEN CONVENTIONAL GAS
WITH UNDRAINAGED STORAGE**

© 2007 T. V. Ashihmina

Samara State Aerospace University

This paper deals with the method of numerical modeling of physical processes in fuel tank, which can be refueled by cryogen conventional gas or compressed conventional gas. Calculation data confirm real prospects of creating of universal tanks pilot models and their tests and exploitation.