

**С.П. Горбачёв\***, **К.И. Коледова**

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», пос. Развилка, Ленинский район Московской области, РФ, 142717

\*e-mail: s\_gorbachev@vniigaz.gazprom.ru

**С.Д. Красноносова**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Лефортовская наб., 1, г. Москва, РФ, 105005

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАПРАВКИ РЕЗЕРВУАРА КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

*На основе первого закона термодинамики для открытых систем разработаны модели заправки криогенного резервуара с открытым газосбросом при подаче жидкости сверху (на уровень жидкости) и снизу (под уровень жидкости), а также модель бездренажной заправки резервуара (с закрытым газосбросом). Использование этих моделей позволяет оценить значения основных параметров заправки: длительность, изменение давления в резервуаре, потери жидкости при заправке. Показано, что при нижней заправке тёплого сосуда длительность процесса меньше, чем при верхней заправке. Определены условия сокращения длительности бездренажной заправки криогенного резервуара.*

**Ключевые слова:** Термодинамика открытых систем. Криогенная жидкость. Сжиженный природный газ (СПГ). Криогенный резервуар. Заправка криогенного резервуара. Длительность заправки. Потери криогенной жидкости.

**S.P. Gorbachev, K.I. Koledova, S.D. Krasnonosova**

## THERMODYNAMIC MODELS OF A FILLING TANK BY THE CRYOGENIC LIQUID

*For opened systems models of filling a cryogenic tank with open vent at supply liquid down-right on the fluid level and from below the fluid level, also a model of filling a tank with closed vent were developed on the bases of the first law of thermodynamics. Using these models allows estimating values of key parameters of the filling: duration of the filling, changing pressure in the tank, liquid losses at the filling. It is shown that duration of the process is less at the bottom filling of warm tank than at the top filling. The conditions for reducing the duration of filling with closed vent the cryogenic tank are defined.*

**Keywords:** Thermodynamics of open systems. Cryogenic liquid. Liquefied natural gas (LNG). Cryogenic tank. Filling a cryogenic tank. Duration of refuelling. Losses of cryogenic liquid.

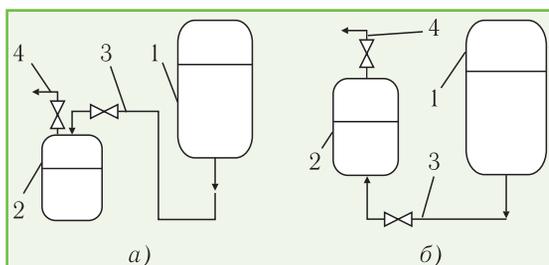
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Заправка (заполнение) резервуара криогенной жидкостью — наиболее распространённый процесс в криогенной технике. Его особенность заключается в том, что при заправке, наряду с заполнением, производится охлаждение стенок сосуда. Это приводит к частичному испарению жидкости и увеличению расхода газа на выходе из сосуда. Основная задача при проведении заправки — полное охлаждение стенок сосуда, чтобы исключить потери жидкости при дальнейшем её хранении у потребителя. Определение времени охлаждения стенок сосуда и потерь жидкости проводится, как правило, путём решения задачи нестационарной теплопроводности для стенок сосуда и тепловой изоляции с учётом теплообмена между жидкостью и стенками сосуда в процессе заполнения.

В связи с использованием сжиженного природного газа (СПГ) в качестве моторного топлива к заправке криогенных бортовых топливных систем предъявляются новые требования: сокращение времени заправки, ограничение или полное исключение выбросов газа в окружающую среду, заправка криогенного бака топливной системы при повышенном давлении, заправка как «тёплого» бака (температура близка к температуре окружающей среды), так и «холодного», частично заполненного жидкостью и др. Для решения этих задач потребовалось, в частности, разработать новые физико-математические модели процесса заправки. Цель данной работы — рассмотреть процесс заправки криогенного резервуара с использованием аппарата термодинамики открытых систем.

Схема заправки криогенного резервуара от питающего резервуара представлена на рис. 1. Подача

жидкости в резервуар может проводиться как сверху (рис. 1,а), так и снизу (рис. 1,б). Заправляться могут как «тёплые» резервуары, у которых температура стенок близка к температуре окружающей среды, так и «холодные» резервуары, которые частично заполнены криогенной жидкостью. В последнем случае температура стенок холодных резервуаров равна температуре жидкости. В процессе заправки в питающем резервуаре и на выходе из газосброса резервуара поддерживаются постоянные давления.



**Рис. 1.** Схема заправки криогенного резервуара при подаче жидкого криопродукта сверху (а) и снизу (б): 1 — питающий резервуар; 2 — криогенный резервуар; 3 — запорные коммуникации; 4 — дренажные коммуникации

## 2. УРАВНЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОТКРЫТЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Под открытой термодинамической системой понимается система с гомогенной средой, которая обменивается с внешней средой теплотой, работой и массой. Изменения состояния параметров открытой системы происходят квазистатически. Поэтому параметры внешней среды отличаются от параметров системы на конечную величину. Для этих условий, с учётом положений первого начала термодинамики для открытой системы [1], можно получить уравнение:

$$dU = dQ - PdV + \sum_{i=1}^n h_i dM_i, \quad (1)$$

где  $U$  — внутренняя энергия системы;  $V$  — объём;  $P$  — давление рабочего тела;  $dQ$  — элементарное количество теплоты, поступающее в систему;  $dM_i$  — элементарное количество массы  $i$ -го потока, поступающего из внешней среды;  $h_i$  — удельная энтальпия  $i$ -го заторможенного потока массы;  $n$  — количество потоков масс вещества.

Процесс заправки сосуда криогенной жидкостью будем рассматривать при следующих допущениях: в сосуд входит однофазный поток жидкости или газа; в системе не совершается внешняя работа и отсутствуют потери на трение; теплоёмкость и плотность жидкости не зависят от температуры. Принимая во внимание [2,3], уравнение первого начала термодинамики для открытой системы с однофазной средой применительно к нестационарным процессам в сосуде

представим в виде:

$$Mc_v \frac{dT}{d\tau} = \dot{Q} - \eta \frac{c_v T}{v} \dot{V} + \sum_{i=1}^n (\eta c_v T - \Delta h_i) G_i, \quad (2)$$

где  $M$  — масса системы;  $T$  — температура;  $\tau$  — время;  $c_v$  — удельная изохорная теплоёмкость потока вещества;  $v$  — удельный объём вещества;  $\dot{Q} = dQ_{\text{вн}}/d\tau$  — скорость изменения теплопритока от внешних источников;  $\dot{V} = dV/d\tau$  — скорость изменения объёма системы;  $h_i = (h - h_i)$  — разность между удельной энтальпией вещества и удельной энтальпией  $i$ -го заторможенного потока массы;  $G_i$  — приток в систему  $i$ -го потока в единицу времени.

В уравнении (2) используется безразмерный комплекс теплофизических свойств вещества

$$\eta = \frac{v}{c_v} \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v. \quad (3)$$

Для идеального газа  $\eta = k - 1$ , где  $k = c_p/c_v$ .

В случае, если среда представляет собой двухфазную систему, уравнение (2) с помощью формулы Клапейрона-Клаузиуса можно записать как

$$Mc_x \frac{dT}{d\tau} = \dot{Q} - \left( \frac{h'' - h'}{v'' - v'} \right) \dot{V} + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{v''(h_i - h') + v'(h'' - h_i)}{v'' - v'} \right] G_i, \quad (4)$$

где  $v'$  и  $v''$ ;  $h'$  и  $h''$  — удельные объёмы и энтальпии жидкой и паровой фаз вещества, находящихся в термодинамическом равновесии;  $c_x$  — теплоёмкость двухфазной среды на линии постоянной сухости  $x$  [4].

Использование предложенной модели процесса заправки позволяет определить его длительность, изменение давления в резервуаре в процессе заправки, потерю жидкости на охлаждение стенок сосуда.

## 3. ЗАПРАВКА ТЁПЛОГО РЕЗЕРВУАРА КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ СВЕРХУ

Процесс заправки тёплого криогенного сосуда «сверху» можно условно разделить на два этапа: захлаживание стенок сосуда и накопление в нём жидкости. На первом этапе СПГ поступает сверху в сосуд, имеющий некоторую начальную температуру. Жидкость испаряется и охлаждает газ в сосуде, который, в свою очередь, в процессе естественной конвекции охлаждает стенки сосуда. Пары жидкости выходят через дренажные коммуникации и дренажный трубопровод. Расход на входе и выходе из сосуда на первом этапе постоянен. Когда газ в сосуде охладится до температуры насыщения, начинается второй этап процесса, во время которого, наряду с охлаждением стенок, начинается накопление жидкости, которая тоже продолжает охлаждать стенки за счёт плёночного кипения. После полного охлаждения стенок до равновесной температуры начинается собственно процесс

заполнения резервуара. На втором этапе заправки расход жидкости — переменный. Процесс заполнения заканчивается, когда уровень жидкости достигнет заданного значения.

### 3.1. Первый этап (захолаживание стенок)

Рассмотрим процесс заправки при следующих допущениях:

- температура стенок внутреннего сосуда одинакова по толщине и по поверхности и изменяется только во времени (нульмерная модель);
- в сосуд входит однофазный поток жидкости;
- жидкость, поступающая во внутренний сосуд, при контакте с газом испаряется и охлаждает газ, который, в свою очередь, нагревается за счёт теплообмена со стенками;
- когда температура газа снижается до равновесного с жидкостью состояния (температура насыщения), то расход входящей жидкости превышает скорость её испарения, и в сосуде начинается накопление жидкости; при этом процесс охлаждения стенок сосуда продолжается;
- теплообмен между стенками и жидкостью обеспечивается процессом плёночного кипения с учётом термического сопротивления паровой пленки (двухступенчатая модель).

Во время первого этапа (охлаждение стенок) изменением внутренней энергии газа в сосуде можно пренебречь. Тогда давление в сосуде в процессе заправки остаётся постоянным, и расход газа на выходе из сосуда равен расходу газа на входе.

При этих допущениях математическая модель процесса охлаждения стенок согласно уравнению (2) сводится к следующему:

$$M_w c_w \frac{d\theta}{d\tau} = -\alpha F_w (\theta - T_2); \quad (5)$$

$$G_2 [c_p (T_2 - T_s) + r] = \alpha F_w (\theta - T_2); \quad (6)$$

$$P_1 - P_v = \xi_1 G_1^2; \quad (7)$$

$$P_v - P_2 = \xi_2 G_2^2; \quad (8)$$

$$G_1 = G_2, \quad (9)$$

где  $M_w$  — масса стенок внутреннего сосуда криогенного бака;  $F_w$  — его поверхность;  $c_w$  — теплоёмкость стенок бака;  $G_1$  — расход жидкости на входе;  $G_2$  — расход пара через линию дренажа;  $c_p$  — теплоёмкость газа;  $r$  — теплота парообразования;  $\theta$  — текущее значение температуры стенки;  $T_s$  — температура насыщенной жидкости;  $T_2$  — температура газа на выходе из сосуда;  $P_1$  — давление в расходной ёмкости;  $P_2$  — давление на выходе из дренажной системы;  $P_v$  — давление в сосуде;  $\xi_1, \xi_2$  — коэффициенты гидравлических сопротивлений заправочных и дренажных коммуникаций, соответственно.

Решение системы уравнений (5)-(9) позволяет определить температуру газа и стенки, расход газа

при заданных значениях давления в питающем резервуаре и в линии дренажа, давление в сосуде. Интегрируя полученные зависимости, можно найти длительность первого этапа из условия  $T_2 = T_s$ .

При постоянном расходе газа на входе температуру газа на выходе и длительность первого этапа можно описать зависимостями, полученными в работе [5]:

$$T_2 = \frac{\theta_0 - T_s - \frac{r}{c_p}}{1 + \frac{G_1 c_p}{\alpha F_w}} \exp \left[ \frac{-G_1 c_p}{M_w c_w \left( 1 + \frac{G_1 c_p}{\alpha F_w} \right)} \tau \right] + T_s - \frac{r}{c_p}; \quad (10)$$

$$\tau_{F1} = \frac{M_w c_w}{G_1 c_p} \left( 1 + \frac{G_1 c_p}{\alpha F_w} \right) \ln \left[ \frac{\theta_0 - T_s + \frac{r}{c_p}}{\frac{r}{c_p} \left( 1 + \frac{G_1 c_p}{\alpha F_w} \right)} \right], \quad (11)$$

где  $\theta_0$  — начальное значение температуры стенки;  $\tau_{F1}$  — длительность первого этапа заправки бака.

### 3.2. Второй этап (накопление жидкости)

Как указывалось выше, во время второго этапа заправки происходит накопление жидкости в сосуде, теплообмен между жидкостью и стенками сосуда, теплообмен между поступающей жидкостью и паром и между паром и стенками сосуда. В работе [6] показано, что применение двухступенчатой модели теплообмена при плёночном кипении жидкости позволяет использовать для обоих случаев одну и ту же зависимость для определения коэффициента теплоотдачи.

Такой подход упрощает указанную ниже математическую модель и позволяет не учитывать форму сосуда (горизонтальный или вертикальный) при расчёте процесса заправки:

$$M_w c_w \frac{d\theta}{d\tau} = -\alpha F_w (\theta - T_s); \quad (12)$$

$$\frac{dM_L}{d\tau} = G_1 - G_2; \quad (13)$$

$$G_1 = \sqrt{\frac{(P_1 - P_2) - \xi_2 G_2^2}{\xi_1}}; \quad (14)$$

$$G_2 = \frac{-\alpha F_w (\theta - T_s)}{r}; \quad (15)$$

$$P_v = P_2 + \xi_2 G_2^2, \quad (16)$$

где  $M_L$  — текущее значение количества жидкости в сосуде.

Решая совместно систему уравнений (12)-(16) с начальными условиями, определенными из решения на первом периоде процесса, можно определить коли-

чество жидкости в сосуде, расходы жидкости на входе и выходе из сосуда, давление в сосуде, изменение температуры стенки в течение второго этапа, а также длительность второго этапа заправки.

Потери жидкости в процессе заправки «сверху» определяются из теплового баланса первого и второго этапов:

$$\Delta M_1 = \frac{M_w c_w (\theta_0 - T_s)}{r + c_p (\theta_0 - T_s)} \quad (17)$$

Количество вытесненного газа, имеющего начальную температуру, равную равновесному её значению,

$$\Delta M_2 = V_{VES} \rho', \quad (18)$$

где  $V_{VES}$  — внутренний объём заполняемого резервуара.

Суммарные потери жидкости

$$\Delta M = \Delta M_1 + \Delta M_2. \quad (19)$$

Для исследования процесса заправки был выбран объект со следующими параметрами: горизонтальный криогенный бак с диаметром внутреннего сосуда 0,447 м, длиной 1,147 м (объём 180 л) и с толщиной стенки 0,003 м из стали 12Х18Н9Т. Гидравлическая проводимость заправочной коммуникации —  $2,7 \cdot 10^6$  Па·с<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup>, дренажной коммуникации —  $1,7 \cdot 10^8$  Па·с<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup>. Давление в питающем резервуаре —  $2,5 \cdot 10^5$  Па. Давление на выходе из дренажной коммуникации —  $10^5$  Па. Начальная температура стенок сосуда — 300 К. Коэффициенты теплоотдачи от газа к жидкости и от стенки к газу описывались двухступенчатой моделью в соответствии с [6].

На рис. 2 представлены изменения расхода жидкости на входе в сосуд и давления в сосуде при заправке сверху. Видно, что на первом этапе заправки давление в сосуде и расход жидкости на входе в сосуд остаются постоянными. После начала накопления жидкости в сосуде уменьшается расход газа через линию дренажа, снижается перепад давлений между сосудом и окружающей средой и, соответственно, уменьшается давление в сосуде и возрастает расход жидкости на входе в сосуд. Длительность заправки бака (при степени заполнения 0,85) составляет 370 с.

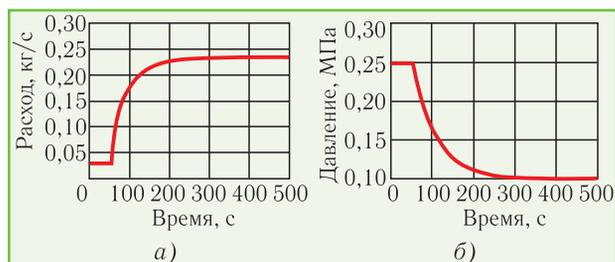


Рис. 2. Изменения расхода на входе в сосуд (а) и давления в сосуде (б) при заправке сверху

#### 4. ЗАПРАВКА ТЕПЛОГО РЕЗЕРВУАРА КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ СНИЗУ

Исключить или существенно ограничить длительность охлаждения стенок сосуда при заправке можно, если заправку проводить «снизу». В этом случае жидкость, которая поступает в однофазном состоянии (температура жидкости для этого должна быть ниже равновесного значения по всему заправочному трубопроводу), накапливается в нижней части сосуда и частично испаряется при контакте с тёплыми стенками, причём интенсивность теплообмена ограничена условиями теплоотдачи при плёночном кипении жидкости. Если заправку проводить достаточно быстро, то испарится только малая часть жидкости, и длительность заправки будет близка к длительности заполнения сосуда. После окончания заправки и перехода к процессу хранения будет происходить дальнейшее охлаждение стенок, что приведёт к увеличению расхода жидкости через линию дренажа (если дренажный клапан открыт) или к росту давления в резервуаре при её закрытии. В последнем случае давление в резервуаре в конце заправки не должно превысить рабочее давление резервуара.

С учётом изложенного, при нижней заправке расход газа через линию дренажа равен сумме вытесняемого газа плюс количество испарившейся жидкости.

Физико-математическая модель нижней заправки вертикального резервуара может быть создана на основе следующих допущений:

- в процессе заправки в сосуде имеются две области с чёткой границей между ними, т.е. в нижней части сосуда находится жидкость, в верхней — пар;
- в сосуд входит однофазный поток жидкости;
- скорость всплытия пузырей пара намного выше скорости движения зеркала жидкости, поэтому весь образующийся пар выходит в свободное пространство через зеркало жидкости с нулевым паросодержанием;
- в области контакта жидкости со стенкой интенсивность теплообмена пропорциональна среднегеометрической разности температур между стенкой и жидкостью в зоне зеркала жидкости и в нижнем сечении сосуда;
- в области жидкости аксиальную теплопроводность вдоль стенки можно не учитывать, т.е. температура стенки в каждом сечении при контакте с жидкостью определяется из условий локального теплообмена.

При этих условиях в области контакта жидкости со стенками сосуда тепловой поток от стенок сосуда к жидкости

$$Q = \alpha \pi D L_1 \Delta T_1; \quad (20)$$

$$\Delta T_1 = \frac{(\theta_2 - T_s) - (\theta_1 - T_s)}{\ln \frac{(\theta_2 - T_s)}{(\theta_1 - T_s)}}, \quad (21)$$

где  $\theta_1$  — температура стенки в нижнем сечении сосуда;  $\theta_2$  — температура стенки в зоне зеркала жидкости

ти;  $T_s$  — температура насыщенной жидкости;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от стенки сосуда к жидкости;  $D$  — диаметр сосуда;  $L_1$  — уровень жидкости в момент времени  $\tau$ .

Температура стенки в нижнем сечении при отсутствии аксиальной теплопроводности может быть определена из теплового баланса при охлаждении стенки, который представляется в виде:

$$c_w \rho_w \pi D \delta_w \frac{d\theta_1}{d\tau} = -\alpha \pi D (\theta_1 - T_s). \quad (22)$$

Из уравнения (22) после интегрирования температура стенки в нижнем сечении

$$\theta_1 = T_s + (\theta_0 - T_s) \exp\left(-\frac{\alpha}{\rho_w \delta c_w} \tau\right). \quad (23)$$

Расход пара, который проходит через зеркало жидкости, равен скорости испарения жидкости в зоне контакта жидкости со стенками. С учётом изменения уровня жидкости, имеем:

$$G_2 = \frac{\alpha \pi D L_1 \Delta T_1}{r}, \quad (24)$$

$$L_1 = \frac{4 M_L}{\pi D^2 \rho}, \quad (25)$$

где  $\theta_0$  — начальная температура стенки;  $r$  — теплота парообразования жидкости;  $\rho$  — плотность жидкости;  $L_1$  — уровень жидкости в сосуде в процессе заполнения;  $G_2$  — расход газа на выходе;  $M_L$  — количество жидкости в сосуде в момент времени  $\tau$ .

Скорость заполнения сосуда

$$\frac{dM_L}{d\tau} = G_1 - G_2, \quad (26)$$

где  $G_1$  — расход жидкости на входе в сосуд.

В области пара температура стенки одинакова по высоте и равна  $\theta_2$ ; температура газа на входе в паровую область —  $T_s$ ; температура газа на выходе из паровой области —  $T_2$ . Теплообмен между газом и стенкой осуществляется естественной конвекцией в газовой среде. Величина теплового потока от стенки к газу пропорциональна среднелогарифмическому температурному напору. К сожалению, в такой постановке решение задачи о переходном процессе вызывает определённые сложности. Поэтому рассмотрим два подхода к использованию холода паров:

— теплообмен между стенками сосуда и газом отсутствует;

— теплообмен между стенками сосуда и газом идеальный, т.е. температура газа на выходе из сосуда равна температуре стенки.

В первом случае скорость заполнения и расход газа на выходе описываются следующими выражениями:

$$\frac{dM_L}{d\tau} = G_1 - \frac{4\alpha M_L}{\rho' D r} \Delta T_1; \quad (27)$$

$$\Delta T_1 = \frac{(\theta_0 - T_s) - (\theta_1 - T_s)}{\ln \frac{\theta_0 - T_s}{\theta_1 - T_s}}; \quad (28)$$

$$\theta_1 = T_s + (\theta_0 - T_s) \exp\left(-\frac{\alpha}{\rho_w \delta c_w} \tau\right); \quad (29)$$

$$P_1 - P_v = \xi_1 G_1^2; \quad (30)$$

$$P_v - P_2 = \xi_2 G_2^2; \quad (31)$$

$$\xi_1 = \left( \sum \frac{\lambda L_L}{2 \rho_x f_L^2 d_L} + \sum \frac{\zeta_L}{2 \rho_x f_L^2} \right); \quad (32)$$

$$\xi_2 = \left( \sum \frac{\lambda L_G}{2 \rho_G f_G^2 d_G} + \sum \frac{\zeta_G}{2 \rho_G f_G^2} \right) \theta_2, \quad (33)$$

где  $P_1$  — давление в расходной ёмкости;  $P_v$  — давление в сосуде;  $P_2$  — давление за линией дренажа;  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  — гидравлические проводимости жидкостной и дренажной линий, соответственно;  $\lambda$  — коэффициент трения;  $L_L$ ,  $L_G$ ,  $d_L$ ,  $d_G$ ,  $f_L$ ,  $f_G$  — длина, диаметр, площадь поперечного сечения жидкостной и дренажной линий, соответственно;  $\zeta_L$ ,  $\zeta_G$  — местные сопротивления жидкостной и дренажной линий, соответственно;  $\rho_x$  — плотность потока в жидкостной линии (однофазный или двухфазный поток);  $\rho_G$  — плотность газа в дренажной линии с учётом изменения давления по длине.

Из (22), (23), (30)-(33) имеем:

$$G_1 = \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{\xi_1} - \frac{\xi_2}{\xi_1} \left( \frac{4\alpha M_L \Delta T_1}{\rho' D r} \right)^2}. \quad (34)$$

Решая совместно уравнения (27)-(29) и (32), определяем количество жидкости в сосуде, температуру в нижнем сечении, расходы на входе и выходе из сосуда.

Во втором случае (идеальный теплообмен) система уравнений имеет вид:

$$\frac{dM_L}{d\tau} = G_1 - \frac{4\alpha M_L}{\rho' D r} \Delta T_1; \quad (35)$$

$$\Delta T_1 = \frac{(\theta_2 - T_s) - (\theta_1 - T_s)}{\ln \frac{(\theta_2 - T_s)}{(\theta_1 - T_s)}}; \quad (36)$$

$$\theta_1 = T_s + (\theta_0 - T_s) \exp\left(-\frac{\alpha}{\rho_w \delta c_w} \tau\right); \quad (37)$$

$$\frac{d\theta_2}{d\tau} = -\frac{4\alpha M_L c_p (\theta_2 - T_s)}{\pi D^2 \delta c_w \rho_w \rho' r \left( L - \frac{4M_L}{\pi D^2 \rho'} \right)}; \quad (38)$$

$$G_2 = \frac{4\alpha M_L \Delta T_1}{\rho' D r}; \quad (39)$$

$$G_1 = \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{\xi_1} - \frac{\xi_2}{\xi_1} \left( \frac{4\alpha M_L \Delta T_1}{\rho' D r} \right)^2}. \quad (40)$$

Величина  $\alpha$  описывается зависимостью из [6].

При решении уравнения (38) использовались начальные условия: при  $\tau=0$  имеем  $M_L=0$ ,  $\theta_1=\theta_0$ ,  $\theta_2=\theta_0$ . В результате при условии, что  $M_L$  является параметром

$$\theta_2 = T_s + \exp \left[ -\frac{4\alpha M_L c_p (\theta_0 - T_s) \tau}{\pi D^2 \delta c_w \rho_w \rho' r \left( L - \frac{4M_L}{\pi D^2 \rho'} \right)} \right]. \quad (41)$$

Из совместного решения уравнений (35)-(37), (39) и (40) находятся количество жидкости в сосуде, расход газа на входе, температуры стенки в верхнем и нижнем сечениях и давление в сосуде.

Моделирование процесса заправки «снизу» проводилось при аналогичных условиях, что и заправка «сверху». Использовалось допущение о том, что теплообмен между стенками сосуда и газом отсутствует.

Следует отметить, что изменения расхода жидкости на входе в сосуд и давления в сосуде при нижней заправке (рис. 3) имеют более сложный характер, чем при верхней заправке (рис. 2). По мере заполнения снизу увеличивается площадь контакта между жидкостью и стенкой и, соответственно, возрастает расход пара через линию дренажа. При этом растёт давление в сосуде, а значит, снижается расход жидкости из питающего резервуара.

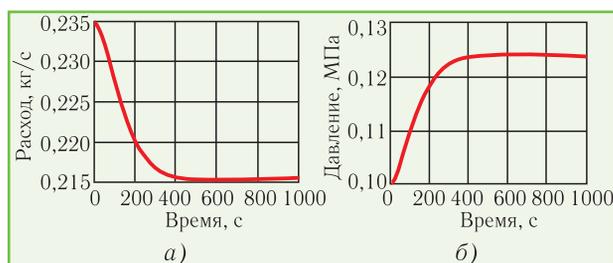


Рис. 3. Изменения расхода на входе в сосуд (а) и давления в сосуде (б) при заправке снизу ( $T_{ст} = 300$  К, давление заправки 0,25 МПа)

Из рис. 4 можно установить, что длительность верхней заправки в зависимости от давления в заправочном резервуаре изменяется от 400 с (давление заправки 0,25 МПа) до 170 с (давление заправки 0,65 МПа) по сравнению с нижней заправкой (320 и 150 с, соответственно).

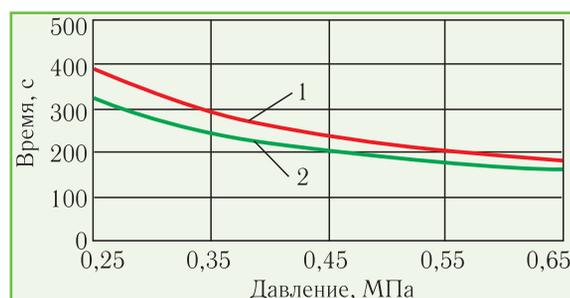


Рис. 4. Длительность заправки теплого бака сверху (1) и снизу (2) в зависимости от давления в заправочном резервуаре

Что касается потерь жидкости на охлаждение (рис. 5), то эта величина для данного интервала давлений при верхней заправке меняется слабо и составляет около 5 кг. При нижней заправке снижаются потери жидкости (примерно от 3 до 2,5 кг). Исходя из этого, видно, что при заданном перепаде давлений нижняя заправка менее продолжительная, чем заправка сверху. Однако нужно учитывать, что при заправке снизу возможны большие термические напряжения в стенках сосуда, и после её окончания может повышаться давление в сосуде при хранении криопродукта с закрытой линией дренажа.

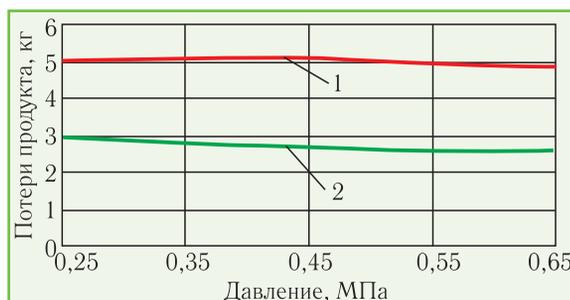
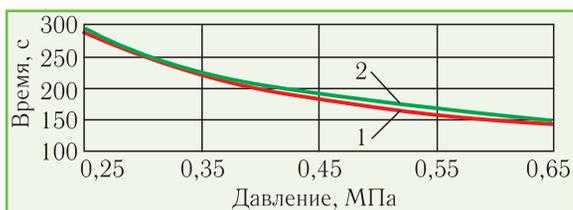


Рис. 5. Потери жидкости на охлаждение стенок при тёплой заправке сверху (1) и снизу (2)

### 5. ЗАПРАВКА ХОЛОДНОГО РЕЗЕРВУАРА КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

При холодной заправке сосуд уже охлаждён, поэтому отсутствует испарение жидкости от теплоты стенок сосуда. Моделирование процесса заправки проводилось с использованием того же бака. Начальная температура стенок сосуда при холодной заправке принималась равной 130 К.

Длительность верхней и нижней заливок холодного бака практически одинаковы. На рис. 6 приведена зависимость длительности заправки холодного криогенного бака от давления на входе. Видно, что при холодной заправке первый этап отсутствует, длительность заправки уменьшается от 300 с (давление заправки 0,25 МПа) до 150 с (давление заправки 0,6 МПа). Если ориентироваться на продолжительность холодной заправки в 5 мин (300 с), то давление заправки должно быть не менее 0,25 МПа. При таком же давлении длительность тёплой заправки «сверху» составит 400 с, а «снизу» — 320 с.

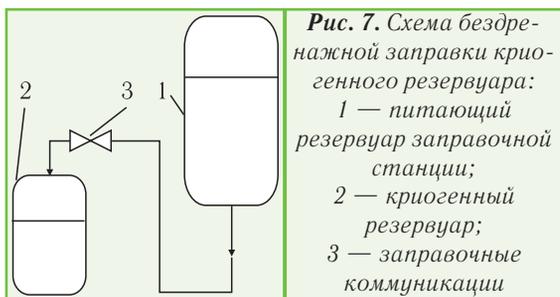


**Рис. 6.** Длительность холодной заправки сверху (1) и снизу (2) при  $T_{cm}=130\text{ K}$ ,  $T_{газа}=111\text{ K}$

Потери жидкости на охлаждение при холодной заправке не зависят от давления заправки и составляют около 1 кг.

### 6. БЕЗДРЕНАЖНАЯ ЗАПРАВКА ХОЛОДНОГО РЕЗЕРВУАРА КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Процесс бездренажной заправки резервуара можно представить в виде, приведённом на рис. 7. В паровое пространство сосуда, частично заполненного криогенной жидкостью при некотором давлении, подаётся порция той же жидкости при другой температуре и большем давлении. При этом дренажные коммуникации сосуда закрыты.



**Рис. 7.** Схема бездренажной заправки криогенного резервуара: 1 — питающий резервуар заправочной станции; 2 — криогенный резервуар; 3 — заправочные коммуникации

В процессе заправки в сосуде, с одной стороны, повышается давление и температура пара из-за уменьшения объёма парового пространства, с другой стороны, из-за теплообмена между паром и жидкостью происходит охлаждение пара и его конденсация, что приводит к снижению давления в сосуде.

Для разработки модели этого способа заправки к предыдущим следует добавить следующие допущения:

- количество жидкости в резервуаре в начале заправки существенно меньше массы жидкости в полном сосуде;

- система пар-жидкость в резервуаре перед заправкой находится в равновесном состоянии.

Из уравнения (4) первого закона термодинамики для открытых двухфазных систем в случае реализации процесса бездренажной заправки с учётом принятых допущений получаем:

$$\sum M_i c_i dT_s = \frac{v''(h_1 - h') + v'(h'' - h_1)}{v'' - v'} dM_s, \quad (42)$$

где  $M_i$  — масса элемента системы;  $c_i$  — удельная теплоёмкость элемента системы;  $M_s$  — текущее значение массы жидкости в сосуде;  $T_s$  — равновесная температура жидкости;  $v'$ ,  $v''$  — удельные объёмы жид-

кости и пара на линии насыщения, соответственно;  $h'$ ,  $h''$  — энтальпии жидкости и пара на линии насыщения, соответственно;  $h_1$  — энтальпия жидкости на входе в сосуд.

В нашем случае

$$\sum M_i c_i = M_s c_s + M_g c_v + M_w c_w, \quad (43)$$

где  $M_g$ ,  $M_w$  — масса газа в сосуде и масса стенок сосуда, соответственно;  $c_v$  — изохорная теплоёмкость пара;  $c_w$  — теплоёмкость материала стенок сосуда.

Разности энтальпий в уравнении (42)

$$h_1 - h' = c_s(T_1 - T_s); \quad h'' - h_1 = r + c_s(T_s - T_1);$$

где  $c_s$  — удельная теплоёмкость жидкости;  $T_1$  — температура жидкости на входе в сосуд;  $r$  — теплота парообразования.

Уравнение (42) необходимо дополнить уравнением состояния  $f(v'', P_s) = 0$  и зависимостью теплоты парообразования от температуры.

Связь расхода с перепадом давлений между резервуарами устанавливается с помощью соотношения:

$$P_1 - P_s(\tau) = \xi G(\tau)^2, \quad (44)$$

где  $\xi = \left( \sum \frac{\lambda L}{2\rho f^2 d} + \sum \frac{\zeta}{2\rho f^2} \right)$  — суммарное гидравлическое сопротивление заправочной коммуникации;  $f$  — площадь поперечного сечения трубопровода;  $\lambda$  — коэффициент трения;  $L$  — длина трубопровода;  $d$  — диаметр трубопровода;  $\zeta$  — местное сопротивление.

Учитывая, что  $M_s = G\tau$ ,  $dM_s = Gd\tau$ , равенство (42) можно представить в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{dT_s}{d\tau} = \frac{\rho' c_s (T_1 - T_s) + \rho'' [r + c_s (T_s - T_1)] G}{G\tau c_s + \rho'' V_{VES} \left( 1 - \frac{G\tau}{V_{VES} \rho'} \right) c_v + M_w c_w},$$

где  $G = \sqrt{\frac{P_1 - P_{s0} \left( \frac{T_s}{T_{s0}} \right)^m}{\xi}}$  — расход жидкости на входе в

резервуар;  $m = \rho''_0 \bar{r} / P_{s0}$ .

Это уравнение решалось стандартными методами относительно  $T_s(\tau)$ . Затем, полагая, что среда в сосуде равновесная, определялись значение  $P_s(\tau)$  и расход жидкости на входе в резервуар  $G(\tau)$ . После интегрирования  $G(\tau)$  по времени рассчитывались масса заправленной жидкости и длительность заправки.

На рис. 8 представлены результаты расчёта относительной величины давления после заправки сосуда жидким метаном ( $P_{s2}/P_{s0}$ ) в зависимости от температуры жидкости на входе в сосуд ( $P_{s2}$  — равновесное

давление в резервуаре в конце заправки). Начальное давление в резервуаре  $P_{s0}=0,35$  МПа (равновесная температура 128,5 К), начальная степень заполнения 0,05, конечная степень заполнения 0,9. Как следует из рисунка, при бездренажной заправке конечное давление в сосуде как увеличивается ( $P_{s2}/P_{s0}>1$ ), так и снижается ( $P_{s2}/P_{s0}<1$ ) по отношению к начальному давлению в зависимости от температуры жидкости на входе. В первом случае рост давления в резервуаре из-за уменьшения объёма пара при заправке превышает снижение давления из-за конденсации пара. Во втором случае наблюдается обратное.



**Рис. 8.** Относительное давление в сосуде в конце бездренажной заправки в зависимости от температуры жидкости на входе при  $P_{s0}=0,35$  МПа,  $T_{s0}=128,5$  К

Граничное значение температуры жидкости  $T_{1b}$ , при котором давление в резервуаре в процессе заправки остаётся постоянным, можно определить из зависимости (42) при условии  $dT_s=0$ . С учётом этого

$$T_{1b}=T_{s0}-\frac{v'r}{(v''-v')c_s}. \quad (45)$$

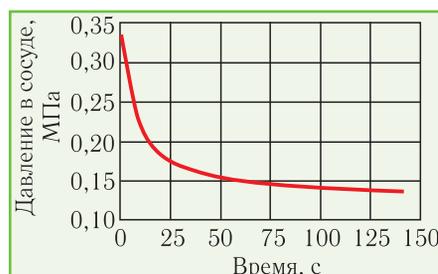
Если температура жидкости на входе в сосуд  $T_1 < T_{1b}$ , то в процессе заправки давление в сосуде снижается; если  $T_1 > T_{1b}$ , то давление возрастает. В нашем примере граничное значение температуры жидкости, согласно (45), равно 126,6 К, что на 1,9 К ниже равновесной температуры жидкости.

Следует отметить, что бездренажная заправка сосуда возможна и в случае, когда температура жидкости на входе выше начальной температуры жидкости в сосуде. При этом, однако, давление заправки должно существенно превышать начальное давление.

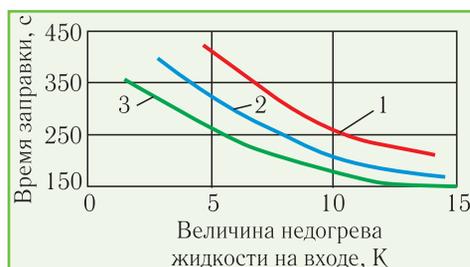
На рис. 9 представлено изменение давления в сосуде в процессе заправки при условиях предыдущего примера и температуре жидкости на входе, равной  $T=111$  К, и давлении в питающем резервуаре 0,5 МПа.

На рис. 10 представлена зависимость длительности заправки от давления и недогрева жидкости (разность температуры входящей жидкости и температуры насыщения при данном давлении) в заправочном резервуаре (начальное давление в сосуде 0,2 МПа). Видно, что необходимое время заправки можно обеспечить или за счёт повышения давления в заправочном резервуаре, или за счёт недогрева жидкост-

ти, причём разумная величина лежит в пределах 5...10 К. При меньших значениях недогрева увеличивается время заправки, при больших значениях — недогрев на длительности заправки сказывается слабее. Тем не менее, длительность заправки сосуда за 5 мин можно обеспечить при давлении в заправочном резервуаре 0,5 МПа и недогреве 4 К; при давлении 0,4 МПа и недогреве 6 К; при давлении 0,3 МПа и недогреве 8,5 К.



**Рис. 9.** Изменение давления в сосуде по мере заполнения в процессе бездренажной заправки



**Рис. 10.** Длительность заправки сосуда сжиженным природным газом в зависимости от величины недогрева жидкости на входе при давлении в сосуде 0,2 МПа и при давлениях в заправочном резервуаре, МПа: 1 — 0,3; 2 — 0,4; 3 — 0,5

Таким образом, исходя только из термодинамических представлений, можно оценить длительность бездренажной заправки сосуда криогенной жидкостью при заданном значении давления и недогрева на входе. При расчёте реального процесса заправки необходимо учитывать теплообмен между жидкостью и паром при конденсации пара в сосуде, отличие температуры пара от температуры стенки сосуда, паросохранение поступающей жидкости.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При верхней заправке тёплого резервуара криогенной жидкостью происходит практически полное охлаждение стенок сосуда до температуры жидкости, при этом потери жидкости на охлаждение стенок составляют 10-15 %.

При нижней заправке тёплого резервуара криогенной жидкостью длительность процесса уменьшается на 20-30 % по сравнению с верхней заправкой и примерно вдвое снижаются потери жидкости на охлаждение стенок в процессе заправки. Это объясняется неполным охлаждением стенок резервуара в процессе нижней заправки.

На длительность тёплой заправки, особенно при подаче жидкости сверху, сильно влияет гидравлическое сопротивление дренажных коммуникаций резервуара.

При заправке холодного резервуара длительность процесса слабо зависит от способа заправки (верхняя или нижняя заправки) и определяющим является гидравлическое сопротивление подающих жидкий криопродукт коммуникаций.

Длительность и конечное давление в сосуде при бездренажной заправке определяются, в основном, давлением и температурой жидкости в питающем резервуаре.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мартыновский В.С., Шнайд И.М. Термодинамические уравнения для открытых систем// Известия вузов.

Энергетика. — 1972. — № 3. — С. 68-72.

2. Филимонов В.Е. Анализ термодинамических процессов при переменной массе рабочего тела// Сб. «Криогенная техника» (НПО «Криогенмаш», Балашиха). — 1977. — С. 21-32.

3. Филимонов В.Е. Термодинамический анализ двухфазных систем переменной массы// Сб. «Криогенная техника» (НПО «Криогенмаш», Балашиха). — 1977. — С. 33-45.

4. Новиков И.И. Термодинамика. — М.: Машиностроение, 1984. — 592 с.

5. Горбачёв С.П., Жердев А.А., Славин М.В. Определение времени захолаживания криогенного бака// Известия вузов. Машиностроение. — 2006. — № 5. — С. 43-54.

6. Пронько В.Г. Двухступенчатая модель теплопередачи применительно к охлаждению криогенного оборудования в условиях плёночного кипения// Сб. «Криогенная техника. Процессы в установках и системах» (НПО «Криогенмаш», Балашиха). — 1975. — С. 28-42.

#### ВЫСТАВКА



#### В РАМКАХ ВЫСТАВКИ



#### ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

- ТРАНСПОРТИРОВКА И ХРАНЕНИЕ ГАЗА. СИСТЕМЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ
- ГАЗИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ЖКХ И БЫТА. КОТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
- ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГАЗЫ. КРИОГЕННАЯ ТЕХНИКА
- КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И АВТОМАТИКА
- ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ
- ГАЗ НА ТРАНСПОРТЕ
- ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЯ ГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА



# GAS RUSSIA

4-6 ОКТЯБРЯ 2011 • Г. КРАСНОДАР  
ВЦ «КРАСНОДАРЭКСПО»

## МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

«ТРАНСПОРТИРОВКА, ХРАНЕНИЕ ГАЗА, СИСТЕМЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ»



ОРГАНИЗАТОР

Тел.: +7 (495) 935 7350

Факс: +7 (495) 935 7351

E-mail: ides@ite-expo.ru

[WWW.IDES-EXPO.RU](http://www.IDES-EXPO.RU)