

**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