

¹С.П. Горбачев, доктор техн. наук; ²И.С. Медведков, канд. техн. наук; ³К.И. Кириенко, канд. техн. наук

^{1,2,3}ООО «Газпром ВНИИГАЗ», а/я 130, Москва, РФ, 115583

e-mail: ¹s_gorbachev@vniigaz.gazprom.ru; ²i_medvedkov@vniigaz.gazprom.ru;

³k_kirienko@vniigaz.gazprom.ru

ORCID: ¹http://orcid.org/0000-0002-0201-3046; ²http://orcid.org/0000-0002-8904-0425

³http://orcid.org/0000-0001-7230-8141

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОХОРНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ В КРИОГЕННЫХ СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ

Процессы в криогенных резервуарах при хранении криопродуктов связаны с изменением параметров вследствие теплопритока из окружающей среды. Наличие теплопритока приводит к испарению и потере криопродукта, если хранение осуществляется с открытым дренажом, или к увеличению внутренней энергии и, следовательно, давления и температуры при хранении в закрытом резервуаре. При расчётах таких процессов возникает необходимость в использовании данных об изохорной теплоёмкости криопродукта. Данная работа посвящена определению изохорной теплоёмкости двухфазной системы путём применения уравнения состояния типа Ван-дер-Ваальса.

Ключевые слова: Жидкий криопродукт. Двухфазное состояние. Изохорная теплоёмкость. Двухфазная смесь. Бездренажное хранение. Сброс давления. Реконденсация паров. Сжиженный природный газ (СПГ).

1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы хранения криогенной жидкости в сосуде при теплопритоке извне сопровождаются нагреванием и расширением жидкой фазы, нагреванием и сжатием паровой фазы, парообразованием в жидкости и конденсацией пара.

Подход к изучению процессов хранения криопродуктов в криогенных резервуарах подробно изложен в работах [1, 2] с выводом дифференциальных зависимостей для систем с переменной массой на базе основных законов термодинамики. Если объём системы не меняется (рассматривается сосуд с постоянным объёмом) тогда ее состояние описывается уравнением:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = Q + \sum_i G_i h_i, \quad (1)$$

где U — полная внутренняя энергия системы, Дж; Q — теплоприток от стенок сосуда, Вт; G_i — расход i -го потока, кг/с; h_i — удельная энтальпия i -го потока, сбрасываемого из криогенного сосуда или направляемого в него, Дж/кг.

Согласно [2], выражение (1) может быть приведено к виду:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{Q + \sum_i G_i (h_i - u)}{M_\Sigma}, \quad (2)$$

где u — удельная внутренняя энергия системы,

Дж/кг; M_Σ — масса системы (суммарная масса жидкости и пара), кг.

В работах [3, 4] приводятся результаты расчетов и экспериментальные данные изменения давления при бездренажном хранении (продукт из сосуда не выводится) жидкого кислорода, водорода, гелия, аргона [4], метана [4] в зависимости от теплопритока к единице объема продукта для различных значений начального объемного паросодержания. В случае равновесного процесса расчёты проводились с определением внутренней энергии продукта по табличным значениям. К сожалению, такой подход очень трудоемкий, а также не позволяет рассматривать процессы в сосуде при переменной массе и учитывать влияние теплоёмкости стенки сосуда. На наш взгляд для расчёта таких процессов целесообразно пользоваться понятием изохорной теплоёмкости двухфазной системы c_v .

Учитывая, что

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v, \quad (3)$$

выражение (2) может быть преобразовано к виду:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{Q + \frac{r}{v'' - v'} (v'' G'' + v' G')}{M_\Sigma c_v}, \quad (4)$$

где G_i — расходы паровой или жидкостной фаз того же криопродукта, что хранится в криогенном сосуде; c_v — удельная изохорная теплоёмкость двухфазной