

УДК 621.64

**Сравнительный анализ схем выдачи охлажденного СПГ под давлением***Д-р техн. наук* **Иванов В.И.** vl\_iv.9391@mail.ru**Раджабов Р.Н.** ramazanradzhabov@bk.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*Перед транспортированием сжиженного природного газа (СПГ) по трубопроводу его охлаждают. Для этого часто используют метод вакуумирования парового пространства над жидкостью. В работе сравниваются энергетические затраты на выдачу охлажденного СПГ под избыточным давлением путём выдавливания его паром и с использованием жидкостного насоса. Также проведены энергетические затраты при предварительном охлаждении СПГ жидким азотом. Показано, что из трёх рассмотренных схем наименьший расход энергии показывает вариант охлаждения путём вакуумирования с последующим нагнетанием жидкостным насосом.*

**Ключевые слова:** охлаждение СПГ, энергетические затраты, жидкостной насос, вакуумирование, испарение.

DOI:10.17586/2310-1148-2017-10-4-13-21

**The comparing analysis of schemes demonstrating an issuance of cooled LNG under pressure***D.Sc.* **Ivanov V.I.** vl\_iv.9391@mail.ru**Radjabov R.N.** ramazanradzhabov@bk.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*Before the transportation of liquefied natural gas through a pipeline it is cooled. For this purpose a method of evacuating the vapour space above the liquid is frequently using. This work compares the energy costs of issuance of the cooled LNG pressurized by squeezing his own steam and with the use of the liquid pump. Also energy costs for LNG precooling with liquid nitrogen are showed. It is shown that the lowest power consumption of these three schemes shows an embodiment of cooling by evacuation with subsequent liquid injection pump.*

**Keywords:** cooling LNG, energy cost, liquid pump, evacuating, evaporation.

Охлаждение СПГ ниже температуры кипения при атмосферном давлении, т.е. ниже  $T_0 = 111,7K$ , необходимо для его транспортировки, хранения и безопасного использования [1]. Хранение СПГ в состоянии насыщения без охлаждения приводит к его значительным потерям при хранении, кавитации в насосах при перекачке, возникновения двухфазного потока в протяженных трубопроводах и гидравлическим ударам [2].

Широкое использование охлажденного СПГ привело к созданию целого ряда систем его захолаживания. При этом особую значимость приобретают энергетические показатели этих систем.

В промышленных масштабах охлаждение СПГ осуществляют различными способами: либо за счёт внешнего источника холода, например, жидкого азота или рефрижераторной установки, либо за счёт испарения части СПГ при барботировании через него малорастворимого газа (гелия). Однако наиболее простым в реализации и достаточно эффективным является охлаждение путём вакуумирования парового пространства резервуара с СПГ [9]. Охлаждение можно осуществлять как непосредственно в самом резервуаре, так и в теплообменном аппарате в процессе выдачи жидкости потребителю. В целях повышения экономичности иногда применяют ступенчатое охлаждение в нескольких аппаратах [3].

Снижение давления пара над зеркалом жидкости вызывает её вскипание. Теплота, затрачиваемая на кипение, отводится от оставшейся жидкости и её температура снижается [10, 11].

Для выдачи охлажденного СПГ потребителю под требуемым давлением применяют либо способ выдавливания собственным паром, либо используют жидкостные насосы [4, 8].

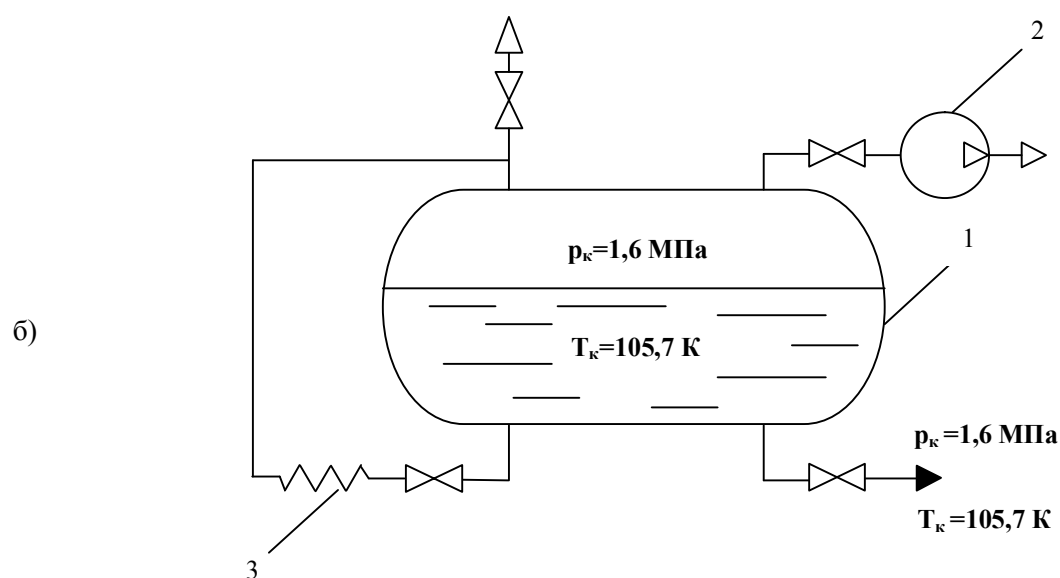
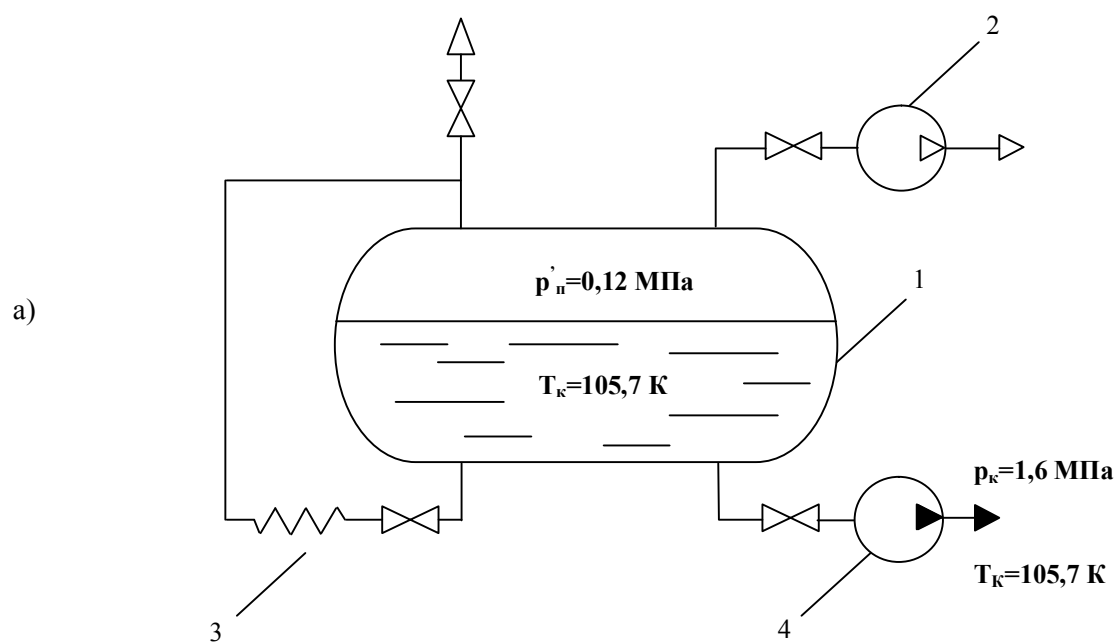
Для определения достоинств и недостатков систем охлаждения и выдачи СПГ под давлением рассмотрим три различные схемы. В двух схемах охлаждение осуществляется путём вакуумирования парового пространства над жидкостью, а в третьей схеме используется сторонний более низкотемпературный криоагент – жидкий азот [12, 13, 14, 15].

Исходные условия для всех схем одинаковы:

- масса жидкого метана в сосуде  $G_n = 10000 \text{ кг}$  ;
- давление в сосуде  $p_n = 0,1 \text{ МПа}$  ;
- температура жидкости  $T_n = 111,5 \text{ К}$

Конечные условия:

- остаток жидкой фазы в сосуде после завершения выдачи продукта  $G_k = 500 \text{ кг}$  ;
- продукт выдаётся под давлением  $p_k = 1,6 \text{ МПа}$  ;
- температура выдаваемого продукта  $T_k = 105,7 \text{ К}$



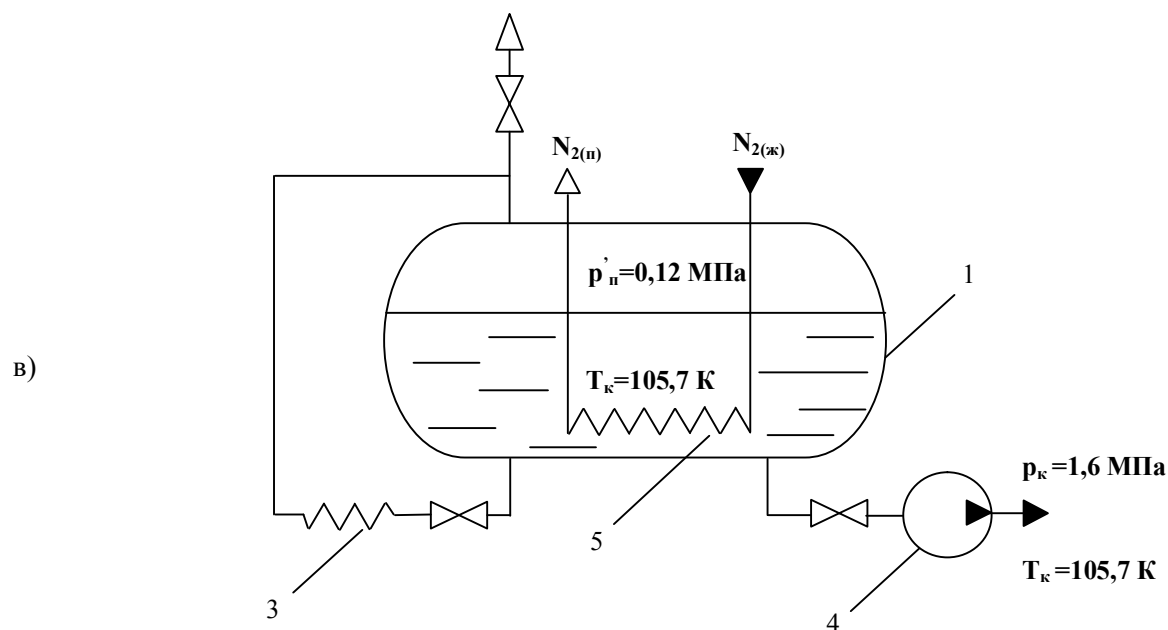


Рис. 1. Схемы систем выдачи охлаждённого СПГ под давлением:

1 – внутренний сосуд резервуара; 2 – вакуумный насос;  
3 – испаритель подъёма давления; 4 – жидкостной насос; 5 – змеевик теплообменника

По схеме (рис. 1, а) выполняются следующие операции:

– жидкий метан охлаждается до температуры  $T_k = 105,7\text{ K}$  путём вакуумирования парового пространства насосом 2; давление пара в конце охлаждения достигает  $p_n = 0,06\text{ МПа}$  [5];

– после отключения вакуумного насоса 2, подают жидкость в испаритель 3 и устанавливают давление  $p_k = 1,6\text{ МПа}$ ;

– жидкость выдавливается из сосуда под давлением  $p_k = 1,6\text{ МПа}$  и температуре  $T_k = 105,7\text{ K}$ .

Расход энергии при реализации процесса по данной схеме находится по следующим зависимостям [6, 7]:

1) Начальный объём СПГ

$$V_n = \frac{G_n}{\rho_n} = \frac{10000}{422,24} = 23,683\text{ м}^3,$$

где  $\rho_n = 422,24 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность жидкого метана при  $T = 111,5\text{ K}$

2) Объём внутреннего сосуда резервуара

$$V_c = \frac{V'_n}{\beta} = \frac{23,683}{0,9} = 26,314\text{ м}^3$$

где  $\beta = 0,9$  – коэффициент заполнения сосуда

3) Начальный объём паровой фазы

4) Объём паровой фазы в конце выдачи продукта

$$V_k = V_c - \frac{G'_k}{\rho_k} = 26,314 - \frac{500}{430,37} = 25,152\text{ м}^3,$$

где  $\rho_k$  – плотность жидкого метана при  $T = 111,5\text{ K}$

5) Средняя теплота парообразования в интервале температур  $T_n$  и  $T_k$

$$r = \frac{r_n - r_k}{2} = \frac{510,5 + 520,4}{2} = 515,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

6) Средняя теплоёмкость жидкого метана в интервале температур  $T_n$  и  $T_k$

$$c = \frac{h'_n - h'_k}{T_n - T_k} = \frac{285,6 - 266}{111,5 - 105,7} = 3,38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

где  $h'_n$  и  $h'_k$  энтальпии жидкого метана соответственно при  $T_n$  и  $T_k$

7) Расход жидкого метана на охлаждение путём вакуумирования

$$\frac{G_n}{G_n} = \frac{1}{\exp\left[\frac{c}{r}(T_n - T_k)\right]} = \frac{1}{\exp\left[\frac{3,38}{515,45}(111,5 - 105,7)\right]} = 0,963.$$

$$\Delta G_1 = G_n - 0,963G_n = 10000 - 0,963 \cdot 10000 = 370 \text{ кг},$$

где  $G_n$  – масса жидкого метана после охлаждения

8) Объём паровой фазы в конце процесса охлаждения путём вакуумирования

$$V'_n = V_c - \frac{G_n - \Delta G_1}{\rho_k} = 26,314 - \frac{10000 - 370}{430,37} = 3,94 \text{ м}^3$$

9) Расход жидкого метана, подаваемого в испаритель 3, для поддержания давления в сосуде  $p_k = 1,6 \text{ МПа}$  в течение всего периода выдачи продукта

$$\Delta G_2 = V'_k \cdot \rho_k'' - V'_n \cdot \rho_n'' = 25,152 \cdot 25,65 - 3,94 \cdot 1,13 = 640,7 \text{ кг},$$

где  $\rho_k'' = 25,65 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность пара в конце процесса выдачи продукта;  $\rho_n'' = 1,13 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность пара в конце процесса охлаждения путём вакуумирования

10) Расход энергии на охлаждение

$$L_{охл} = \Delta G_1 \cdot l = 370 \cdot 1,0 = 370 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Расход энергии на выдавливание жидкости

$$L_{выд} = \Delta G_2 \cdot l = 640,7 \cdot 1,0 = 640,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где  $l = 1,0 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}$  – удельный расход энергии на ожижение метана [1]

11) Среднее давление в сосуде в течение вакуумирования

$$p_{cp} = \frac{p_n + p_n}{2} = \frac{0,1 + 0,06}{2} = 0,08 \text{ МПа},$$

где  $p_n = 0,06 \text{ МПа}$  – давление в конце процесса вакуумирования

12) Примем температуру газа перед насосом  $T'_n = 270K$

13) Объём газа, подлежащий откачке

$$V_{cp} = \frac{\Delta G_1 \cdot p_6}{\rho_6 \cdot p_{cp}} = \frac{370 \cdot 0,1}{0,716 \cdot 0,08} = 646 \text{ м}^3$$

где  $\rho_6 = 0,716 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность газа при  $p_n = 0,1 \text{ МПа}$  и температуре  $T'_n = 270K$

14) Для вакуумирования примем насос 2НВР-10Д, быстрота действия которого  $S_n = 10 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$  и потребляемая мощность привода  $N_n = 2,2 \text{ кВт}$

15) Продолжительность вакуумирования

$$\tau = \frac{V_{cp}}{S_n} \ln \frac{p_6}{p_{cp}} = \frac{646}{10 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{0,1}{0,08} = 14415 \text{ с}$$

16) Расход энергии на работу вакуумного насоса

$$L_{вн} = \frac{N_n \cdot \tau}{3600} = \frac{2,2 \cdot 14415}{3600} = 8,80 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

17) Общий расход энергии по схеме 1а

$$L = L_{охл} + L_{выд} + L_{вн} = 370 + 640,7 + 8,8 = 1019,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

По схеме (рис. 1, б.) последовательность процессов следующая:

- жидкость охлаждается путём вакуумирования; давление в сосуде снижается от  $p_n = 0,1 \text{ МПа}$  до  $p_n = 0,06 \text{ МПа}$ ;
- температура жидкости снижается от  $T_n = 111,5K$  до  $T_k = 105,7K$  после чего вакуумный насос отключается;
- жидкость подают в испаритель, резко повышая давление в сосуде до  $p'_n = 0,12 \text{ МПа}$ , при этом жидкость становится недонагретой (её температура остаётся равной  $T_k = 105,7K$ );
- жидкостной насос выдаёт недонагретую жидкость под давлением  $p_k = 1,6 \text{ МПа}$

Расход энергии при работе по схеме рис. 1б:

1) Расход энергии на охлаждение жидкости по схеме 1б такой же как по схеме 1а, т.е.

$$L_{охл} = \Delta G_1 \cdot l = 370 \cdot 1,0 = 370 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

2) Расход газифицированного жидкого метана на создание подпора  $p'_n = 0,12 \text{ МПа}$ , необходимого для безкавитационной работы жидкостного насоса

$$\Delta G_2 = V'_k \cdot \rho_k'' - V'_n \cdot \rho_n'' = 25,152 \cdot 3,94 - 2,631 \cdot 1,13 = 49,9 \text{ кг},$$

где  $\rho_k''$  – плотность сухого насыщенного пара при давлении  $p_k = 0,12 \text{ МПа}$

3) Расход энергии на создание подпора жидкой фазы перед жидкостным насосом

$$L_{нодн} = \Delta G_2 \cdot l = 49,9 \cdot 1,0 = 49,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

4) Расход энергии на работу вакуумного насоса будет таким же как в схеме 1а, т.е.

$$L_{\text{вн}} = \frac{N_n \cdot \tau}{3600} = \frac{2,2 \cdot 14415}{3600} = 8,80 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

5) При подаче жидкостного насоса  $Q = 10 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$  продолжительность опорожнения сосуда составит

$$\tau_1 = \frac{G'_n - G'_k}{3600 \cdot \rho'_{\text{жс}} \cdot Q} = \frac{10000 - 500}{3600 \cdot 460,37 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 0,613 \text{ ч},$$

где  $\rho'_{\text{жс}} = 430,37 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность выдаваемой жидкости

6) Напор, создаваемый жидкостным насосом

$$H = \frac{p_k}{\rho'_{\text{жс}} \cdot g} = \frac{1600000}{460,37 \cdot 9,8} = 379,4 \text{ м}$$

7) Расход энергии на работу жидкостного насоса

$$L_{\text{жс.н.}} = \frac{Q \cdot \rho'_{\text{жс}} \cdot g \cdot H \cdot \tau_1}{\eta_{\text{жс.н.}}} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 430,37 \cdot 9,8 \cdot 379,4 \cdot 0,613}{0,5 \cdot 1000} = 19,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где  $\eta_{\text{жс.н.}} = 0,5$  – КПД жидкостного насоса

8) Общий расход энергии по схеме 1,б

$$L = L_{\text{охл}} + L_{\text{подн}} + L_{\text{вн}} + L_{\text{жс.н.}} = 370 + 49,9 + 8,8 + 19,6 = 448,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

По схеме (рис. 1в.) последовательность процессов следующая:

– жидкость метана охлаждается до температуры  $T_k = 105,7 \text{ К}$ , при подаче в змеевик 5 жидкого азота, при этом давление в сосуде снижается до  $p_n = 0,06 \text{ МПа}$ ;

– жидкость подают в испаритель 3, повышая давление в сосуде до  $p'_n = 0,12 \text{ МПа}$ , при этом жидкость становится недонагретой (её температура остаётся равной  $T_k = 105,7 \text{ К}$ );

– жидкостной насос 4 выдаёт недонагретую жидкость под давлением  $p_k = 1,6 \text{ МПа}$  потребителю

Расход энергии по данной схеме складывается из:

– расхода энергии на получение требуемого количества жидкого азота, идущего на охлаждение СПГ;  
– расхода энергии на охлаждение доли СПГ, которая газифицируется в испарителе 3 для создания давления в сосуде  $p'_n = 0,12 \text{ МПа}$ ;

– расхода энергии на работу жидкостного насоса 4

1) Расход жидкого азота на охлаждение СПГ

2)

$$G_a = \frac{k \cdot c \cdot G_n (T_n - T_k)}{r_a} = \frac{1,5 \cdot 3,38 \cdot 10000 \cdot (111,5 - 105,7)}{197,6} = 1488 \text{ кг},$$

где  $k = 1,5$  – коэффициент учитывающий потери жидкого азота при транспортировании и переливе;

$$c = 3,38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{ – теплоёмкость СПГ;}$$

$$r_a = 197,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ – теплота испарения жидкого азота}$$

2) Расход энергии на получение жидкого азота  $G_a$

$$L_{охл} = G_a \cdot l_a = 1488 \cdot 1,5 = 2231 \text{кВт} \cdot \text{ч},$$

где  $l_a = 1,5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}$  – удельный расход энергии на ожижение азота

3) Расход СПГ на создание давление в сосуде аналогичен варианту по схеме “б”, т. е.  $\Delta G_2 = 49,9 \text{кг}$ .

4) Расход энергии на ожижение доли СПГ, которая газифицируется в испарителе 3 для создания условий безкавитационной работы жидкостного насоса

$$L_{нодп} = \Delta G_2 \cdot l = 49,9 \cdot 1,0 = 49,9 \text{кВт} \cdot \text{ч}$$

5) Расход энергии на работу жидкостного насоса 4

$$L_{ж.н.} = \frac{Q \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot H \cdot \tau_1}{\eta_{ж.н.}} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 430,37 \cdot 9,8 \cdot 379,4 \cdot 0,613}{0,5 \cdot 1000} = 19,6 \text{кВт} \cdot \text{ч},$$

где  $\eta_{ж.н.} = 0,5$  – КПД жидкостного насоса

6) Общий расход энергии по схеме 1в

$$L = L_{охл} + L_{нодп} + L_{ж.н.} = 2231 + 49,9 + 19,6 = 2300,5 \text{кВт} \cdot \text{ч}$$

В табл. 1 сопоставлены характеристики трёх рассмотренных выше схем выдачи охлаждённого СПГ под давлением

Таблица 1

**Характеристики схем выдачи охлаждённого СПГ под давлением**

Схемы	Исходная масса СПГ, кг	Температура, К		Давление, МПа		Потери СПГ, кг	Расход жидкого азота, кг	Расход энергии, кВт·ч
		Нач.	Конеч.	Нач.	Конеч.			
а	10 000	111,5	105,7	0,1	1,6	1011	0	1019
б	10 000	111,5	105,7	0,1	1,6	420	0	448
в	10 000	111,5	105,7	0,1	1,6	50	1488	2300

### Выводы

1. Схема (рис. 1, а) наиболее проста в реализации. Из дополнительного оборудования требуется лишь вакуумный насос. Однако этой схеме присущи серьёзные недостатки – это потеря ~ 10% продукта и значительный расход энергии.

2. Схема (рис. 1, в) термодинамически менее совершенна, поскольку требует значительного расхода более низкотемпературного, чем СПГ, криоагента, т.е. жидкого азота. Кроме того, требуется встраивать в сосуд с СПГ дополнительный змеевик и иметь оборудование для подачи азота в указанный змеевик.

3. Наиболее приемлемой для принятых параметров системы является схема (рис. 1, б). Она обеспечивает умеренные потери СПГ и наименьший расход энергии на выдачу охлажденного СПГ под давлением.

## Литература

1. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра. // Под ред. А. М. Архарова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009г. – 256 с.
2. Mokhatab S. et. al., Handbook of Liquefied Natural Gas, Gulf Professional Publishing, Burlington, Massachusetts, 2014.
3. Акулов Л.А., Борзенко Е.И., Зайцев А.В. Теплофизические свойства и фазовое равновесие криопродуктов. СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. – 567 с.
4. Архаров А.М., Тычкова С.О. К задаче об изменении температуры криогенных жидкостей при откачке их паров и хранении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение» 2010. № 3. С. 41–45.
5. Neill D.T., Hashemi H.T., Slipceвич C.M. Boil-off rates and wall temperatures in aboveground LNG storage tanks. – Chem. Eng. Progress Symposium Series, 1968, vol. 64, №87, P. 111–119.
6. Иванов В.И., Еремеев В.А. Система выдачи охлажденных криопродуктов под давлением // Сборник тезисов V всероссийского конгресса молодых ученых – 2016.
7. Макарей Н.М., Иванов В.И. Исследование процесса охлаждения криогенных жидкостей путем вакуумирования // Научная школа "Техника и физика низких температур". Проблемы криогенной техники и технологий - 2014. - С. 67-70
8. Петров Е.Т., Опалихин А.Ф. Особенности численного исследования теплофизических параметров парогазовых потоков в камерах холодильников с регулируемой газовой средой // Вестник Международной академии холода. 2017. № 3. С.47–52.
9. Грачёв А. Б., Ворошилов Б. С., Бродянский В. М. Охлаждение криогенных жидкостей вакуумированием парового пространства // Инженерно-физический журнал. 1975. Т. 29, № 6. С. 1007–1012.
10. Домашенко А.М. Экспериментальное исследование неравновесности испарения при охлаждении жидких кислорода и азота вакуумированием парового пространства [Текст] / А.М. Домашенко, В.П. Качура, Н.В. Филин. Труды НПО «Криогенмаш». Процессы и технологии в криогенном машиностроении. – Балашиха.: 1975.
11. Жданов Б. С. Переохлаждение, хранение и термостатирование криогенных жидкостей [Текст]: Учеб. пособие по курсу "Криогенные заправочные системы" / Под ред. Г. Н. Бобровникова ; М-во высш. и сред. спец. образования СССР. Моск. высш. техн. училище им. Н. Э. Баумана. - Москва : [б. и.], 1972, обл. 1973. - 75 с. : ил.; 20 см.
12. H.G. Winningham, "Pumping A Liquefied Natural Gas (LNG), Pre-heating, Dividing the LNG into Two Streams with One Being Called the Cold LNG Reflux Stream and the Other Being Called the Residual LNG Stream; Heating and Vaporizing the Residual LNG Stream to Produce Feed Gas Stream; Using A Cryogenic Fractionation, Feeding", U.S. Patent 7,165,423, July 23, 2007.
13. Ralph G. Scurlock, Stratification, rollover and handling of LNG, LPG and other cryogenic liquid mixtures. 2016.

## References

1. Barmin I.V., Kunis I.D. Szhizhennyi prirodnyi gaz vchera, segodnya, zavtra. // Pod red. A. M. Arkharova. – M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2009g. – 256 s.
2. Mokhatab S. et. al., Handbook of Liquefied Natural Gas, Gulf Professional Publishing, Burlington, Massachusetts, 2014.
3. Akulov L.A., Borzenko E.I., Zaitsev A.V. Teplofizicheskie svoistva i fazovoe ravnovesie krioproductov. SPb.: SPbGUNIPT, 2009. – 567 s.
4. Arkharov A.M., Tychkova S.O. K zadache ob izmenenii temperatury kriogennykh zhidkosti pri otkachke ikh parov i khraneni // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya «Mashinostroenie» 2010. № 3. S. 41–45.
5. Neill D.T., Hashemi H.T., Slipceвич C.M. Boil-off rates and wall temperatures in aboveground LNG storage tanks. – Chem. Eng. Progress Symposium Series, 1968, vol. 64, №87, P. 111–119.
6. Ivanov V.I., Eremeev V.A. Sistema vydachi okhlazhdennykh krioproductov pod davleniem // Sbornik tezisov V vserossiskogo kongressa molodykh uchenykh – 2016.
7. Makarei N.M., Ivanov V.I. Issledovanie protsessa okhlazhdeniya kriogennykh zhidkosti putem vakuumirovaniya // Nauchnaya shkola "Tekhnika i fizika nizkikh temperatur". Problemy kriogennoi tekhniki i tekhnologii - 2014. - S. 67-70
8. Petrov E.T., Opalikhin A.F. Thermophysical parameters of steam gas flow in refrigerating chambers with controlled atmosphere. Numerical analysis. // Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda. 2017. No 3. p.47–52.



9. Grachev A. B., Voroshilov B. S., Brodyanskii V. M. Okhlazhdenie kriogennykh zhidkостей vakuumirovaniem parovogo prostranstva // Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. 1975. T. 29, № 6. S. 1007–1012.
10. Domashenko A.M. Eksperimental'noe issledovanie neravnovesnosti ispareniya pri okhlazhdenii zhidkikh kisloroda i azota vakuumirovaniem parovogo prostranstva [Tekst] / A.M. Domashenko, V.P. Kachura, N.V. Filin. Trudy NPO «Kriogenmash». Protsessy i tekhnologii v kriogenom mashinostroenii. – Balashikha.: 1975.
11. Zhdanov B. S. Pereokhlazhdenie, khranenie i termostatirovanie kriogennykh zhidkостей [Tekst]: Ucheb. posobie po kursu "Kriogennye zapravochnye sistemy" / Pod red. G. N. Bobrovnikova ; M-vo vyssh. i sred. spets. obrazovaniya SSSR. Mosk. vyssh. tekhn. uchilishche im. N. E. Baumana. - Moskva : [b. i.], 1972, obl. 1973. - 75 s. : il.; 20 sm.
12. H.G. Winningham, "Pumping A Liquefied Natural Gas (LNG), Pre-heating, Dividing the LNG into Two Streams with One Being Called the Cold LNG Reflux Stream and the Other Being Called the Residual LNG Stream; Heating and Vaporizing the Residual LNG Stream to Produce Feed Gas Stream; Using A Cryogenic Fractionation, Feeding", U.S. Patent 7,165,423, July 23, 2007.
13. Ralph G. Scurlock, Stratification, rollover and handling of LNG, LPG and other cryogenic liquid mixtures. 2016.

*Статья поступила в редакцию 02.11.2017 г.*