

АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАЛОТОННАЖНОЙ УСТАНОВКИ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С РОТОРНЫМ ВОЛНОВЫМ КРИОГЕНЕРАТОРОМ

А.М. Архаров¹, В.Ю. Семенов², С.Б. Малахов²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: crio@power.bmstu.ru

²ПК НПФ “ЭКИП”, пос. Развилка, Ленинский р-н, Московская обл., Российская Федерация
e-mail: vsimen@yahoo.com; malahov.s@bk.ru

На основе характерного для условий газораспределительных станций цикла среднего давления предложена схема ожижителя природного газа с источником холода нового типа — роторным волновым криогенератором. С использованием метода энтропийно-статистического анализа показано, что при достигнутом и экспериментально подтвержденном значении адиабатного коэффициента полезного действия роторного волнового криогенного генератора 55 % степень термодинамического совершенства предложенной установки составляет 17,1 %.

Ключевые слова: ожижитель природного газа, роторный волновой криогенератор, адиабатный КПД, термодинамическое совершенство.

THERMODYNAMIC EFFECTIVENESS ANALYSIS OF LOW-TONNAGE PLANT FOR NATURAL-GAS LIQUEFACTION WITH ROTOR WAVE CRYOGENIC GENERATOR

I.A. Arkharov¹, V.Yu. Semenov², S.B. Malakhov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: crio@power.bmstu.ru

²Research and Production Cooperative Firm “EKIP”, Moscow region, Russian Federation
e-mail: vsimen@yahoo.com; malahov.s@bk.ru

On the basis of a cycle of average pressure, characteristic for conditions of gas-distributing stations, the scheme of natural gas liquefier with source of new type cold — the rotor wave cryogenerator is offered. With the help of a method entropy — the statistical analysis it is shown that at the reached and experimentally confirmed value of adiabatic efficiency of the rotor wave cryogenic generator of 55 % degree of thermodynamic perfection of the offered installation makes 17,1 %.

Keywords: natural gas liquefier, rotor wave cryogenerator, adiabatic efficiency, thermodynamic perfection.

Проблема производства установок сжижения природного газа (СПГ) становится все более актуальной в нашей стране. В связи с необходимостью организации децентрализованного газоснабжения, сглаживания пиков газопотребления и замещения традиционного топлива для транспорта оказываются востребованными так называемые малотоннажные производства СПГ, которые подразумевают установки производительностью до 10 т/ч. Созданы и успешно функционируют в течение нескольких лет высокоэффективные ожижители

природного газа производительностью 1 т/ч (в г. Петергоф и Кингисепп Ленинградской обл.), работающие на основе цикла высокого давления Линде – Хэмпсона с предварительным охлаждением, а также установка производительностью 1 т/ч (пос. Развилка, Ленинский р-н Московской обл.), работающая по несколько усовершенствованному дроссель-эжекторному циклу. Анализ эффективности этих установок, проведенный с помощью развиваемого в МГТУ им. Н.Э. Баумана энтропийно-статистического метода [1–7], показывает, что коэффициент термодинамического совершенства этих циклов составляет 0,287 и 0,296 соответственно [4].

В настоящее время самым крупным отечественным заводом по производству СПГ пока остается ожижитель производительностью 3 т/ч на гидрораспределительной станции ГРС-4 в Екатеринбурге. Данная технология сжижения основана на цикле среднего давления Клода, т.е. использует высокоэффективный (адиабатный КПД процесса расширения достигает 75 %), но сложный и дорогой турбодетандерно-компрессорный агрегат (ТДКА) [4]. Анализ термодинамической эффективности данной технологии показывает, что коэффициент термодинамического совершенства не превышает 17 %, а затраты энергии на компенсацию производства энтропии в ТДКА составляют свыше 25 % суммарно. Надо отметить, что и другое решение проблемы создания высокоэффективных малотоннажных производств СПГ, а именно, с помощью внешнего азотного цикла, подразумевает использование ТДКА в качестве генератора холода.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан принципиально новый тип генератора холода – волновой роторный криогенератор (РВКГ). Особенности работы РВКГ заключаются в том, что так же как и в ТДКА, компримирование осуществляется за счет энергии расширяющегося газа, но в отличие от последнего степень повышения давления примерно равна степени сжатия, а расход компримируемого потока составляет 20...25 % расхода детандерного. Исходя из этого, предложена следующая схема установки сжижения газа (рис. 1).

Дроссельный поток проходит очистку от диоксида углерода, охлаждается последовательно в теплообменных аппаратах и частично сжижается после расширения в дроссель-эжекторе ЭЖ. Другая часть газа расширяется в детандере до давления 0,71 МПа. Газовая фаза после отделения в сосуде-сепараторе потоком низкого давления (0,71 МПа) после дроссельного теплообменника направляется в теплообменник, где обратным потоком охлаждает поток газа, направляемый на дросселирование [3]. Отличительной особенностью предлагаемой схемы является увеличение потока, направляемого на ожижение, без дополнительных затрат работы “удаленного” компрессора КМ путем отбора части обратного потока низкого давления после верхнего теплообменника, сжатия его до давления прямого в компрессионной части РВКГ и

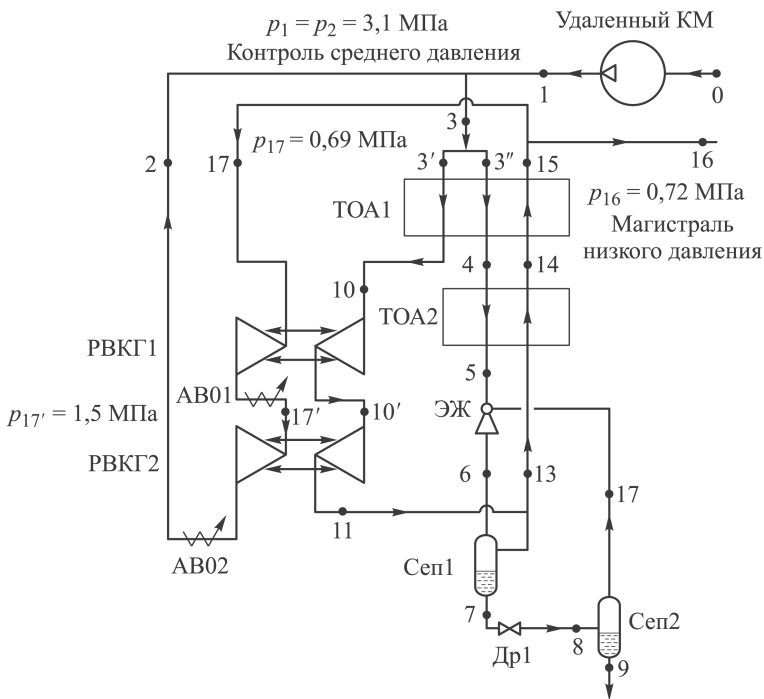


Рис. 1. Схема установки с двухступенчатым РВКГ:

КМ — “удаленный” компрессор магистрального газопровода; РВКГ1, РВКГ2 — первая и вторая ступени РВКГ; ТОА1, ТОА2 — основной и дроссельный теплообменники; АВ01, АВ02 — аппараты воздушного охлаждения; Сеп1 — сепаратор, Сеп2 — хранилище СПГ; Др1 — дроссель ожижителя, Эж — дроссель-эжектор

смешения с дроссельным на входе в верхний аппарат. Теплота сжатия при этом сбрасывается в окружающую среду с помощью аппаратов воздушного охлаждения.

Последующий термодинамический анализ цикла установки ожижения природного газа на базе РВКГ (рис. 2) основан на экспериментально полученном значении адиабатного КПД, максимальное значение которого при степени расширения, равной двум, достигала 55 % [4].

Исходные данные для расчета установок СПГ на ГРС следующие: $T_{0.C} = 300 \text{ K}$ — средняя температура окружающей среды; $p_1 = 3,1 \text{ МПа}$ — давление сжатия компрессора магистрального газопровода; $p_0 = 0,72 \text{ МПа}$ — давление всасывания компрессора магистрального газопровода; $p_9 = 0,35 \text{ МПа}$ — давление при отгрузке СПГ; $\Delta T_1 = 5 \text{ K}$ — неполнота рекуперации на уровне $T_1 = 300 \text{ K}$; $\eta_{\text{вз.КМ}} = 0,6$ — КПД компрессора магистрального газопровода КМ; $q_{0.C} = 2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг сж.СН}_4}$ — удельная величина теплопритоков из окружающей среды. Для установок использовался природный газ следующего состава: метан СН_4 — 0,976; этан $\text{С}_2\text{Н}_6$ — 0,0069; пропан $\text{С}_3\text{Н}_8$ — 0,0032; *i*-бутан $\text{С}_4\text{Н}_{10}$ — 0,0004; *n*-бутан $\text{С}_4\text{Н}_{10}$ — 0,0005; *n*-пентан

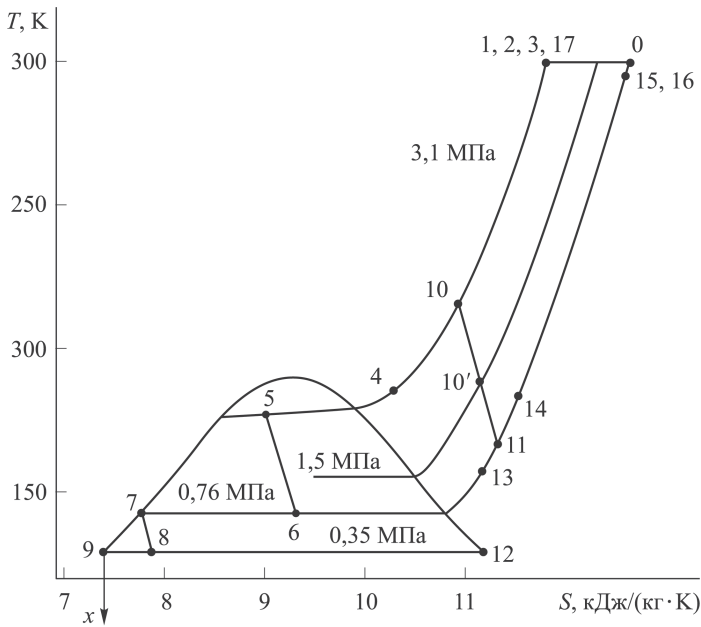


Рис. 2. Схематическое изображение цикла установки сжижения природного газа с РВКГ в координатах $T-S$

C_5H_{12} — 0,0001; n -гексан C_6H_{14} — 0,0003; азот N_2 — 0,0118; кислород O_2 — 0,0002; диоксид углерода CO_2 — 0,0006.

Характеристики в расчетных точках (таблица) нижеприведенных циклов определены с помощью программного комплекса Aspen HYSYS v.7.2. В качестве уравнения состояния использовалась зависимость Ли-Кеслера.

Энтропийно-статистический анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии в основных узлах и процессах ожижительной установки с РВКГ.

1. Минимально необходимые удельные затраты энергии для компенсации производства энтропии в теплообменнике ТОА1:

$$\Delta S_{\text{ТОА1}} = (s_{15} - s_{14})\bar{G}_{14} + (s_{3'} - s_{10})\bar{G}_{10} + (s_3 - s_4)\bar{G}_4 = 0,075 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta l_{\text{ТОА1}} = T_{\text{O.C}} \Delta S_{\text{ТОА1}} = 22,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

2. Минимально необходимые удельные затраты энергии для компенсации производства энтропии в теплообменнике ТОА2:

$$\Delta S_{\text{ТОА2}} = (s_{14} - s_{13})\bar{G}_{13} - (s_4 - s_5)\bar{G}_5 = 0,013 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta l_{\text{ТОА2}} = T_{\text{O.C}} \Delta S_{\text{ТОА2}} = 3,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

**Параметры характерных точек цикла установки ожижения природного газа
на базе РВКГ для условий ГРС**

Точки	Температура $T, \text{ К}$	Давление p , МПа	Энтальпия $i, \text{ кДж/кг}$	Энтропия s , кДж/(кг·К)	Расход $G, \text{ кг/ч}$	Относительный расход \bar{G}
0	300	0,72	-4526	12,54	28 750	1,0
1	300	3,1	-4549	11,74	28 750	1,0
2	300	3,1	-4548	11,76	5395	0,188
3	300	3,1	-4549	11,74	34 140	1,19
3'	300	3,1	-4549	11,74	26 970	0,938
3''	300	3,1	-4549	11,74	7170	0,249
4	188,1	3,1	-4851	10,46	7170	0,249
5	178,5	3,1	-5049	9,364	7170	0,249
6	142,7	0,72	-5045	9,735	7457	0,259
7	142,7	0,72	-5324	7,694	2828	0,0983
8	129,8	0,35	-5324	7,718	2828	0,0983
9	129,8	0,35	-5367	7,318	2541	0,0853
10	216,5	3,1	-4758	10,93	26970	0,938
10'	188,9	1,5	-4792	11,07	26970	0,938
11	167	0,72	-4823	11,23	26970	0,938
12	129,8	0,35	-4939	11,26	286,7	0,01
13	163,5	0,72	-4828	11,21	31 600	1,099
14	183	0,72	-4783	11,47	31 600	1,099
15	295	0,72	-4537	12,52	31 600	1,099
16	295	0,72	-4537	12,52	26 230	0,912
17	300	0,72	-4526	12,56	5395	0,188
17'	300	1,45	-4533	12,16	5395	0,188

3. Необходимые удельные затраты энергии для компенсации необратимости рабочих процессов в компрессоре КМ:

$$l_{\text{изКМ}} = (T_{\text{О.С}}(s_0 - s_{18}) - (i_0 - i_{18}))\bar{G}_0 = 217 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

— изотермическая работа компрессора; по статистическим данным для компрессора данного типа $\eta_{\text{изКМ}} = 0,6$, $l_{\text{дкм}} = \frac{l_{\text{из}}}{\eta_{\text{из}}} = 361,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$,

$$\Delta l_{\text{КМ}} = l_{\text{д1}} - l_{\text{из1}} = 144,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

4. Анализ процессов в РВКГ (рис. 3).

5. Минимально необходимые удельные затраты энергии для компенсации производства энтропии в детандерной части РВКГ:

$$\Delta S_{\text{дрвгк}} = (s_{11} - s_{10})\bar{G}_{10} = 0,281 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta l_{\text{дрвгк}} = T_{\text{О.С}}\Delta S_{\text{дрвгк}} = 84,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

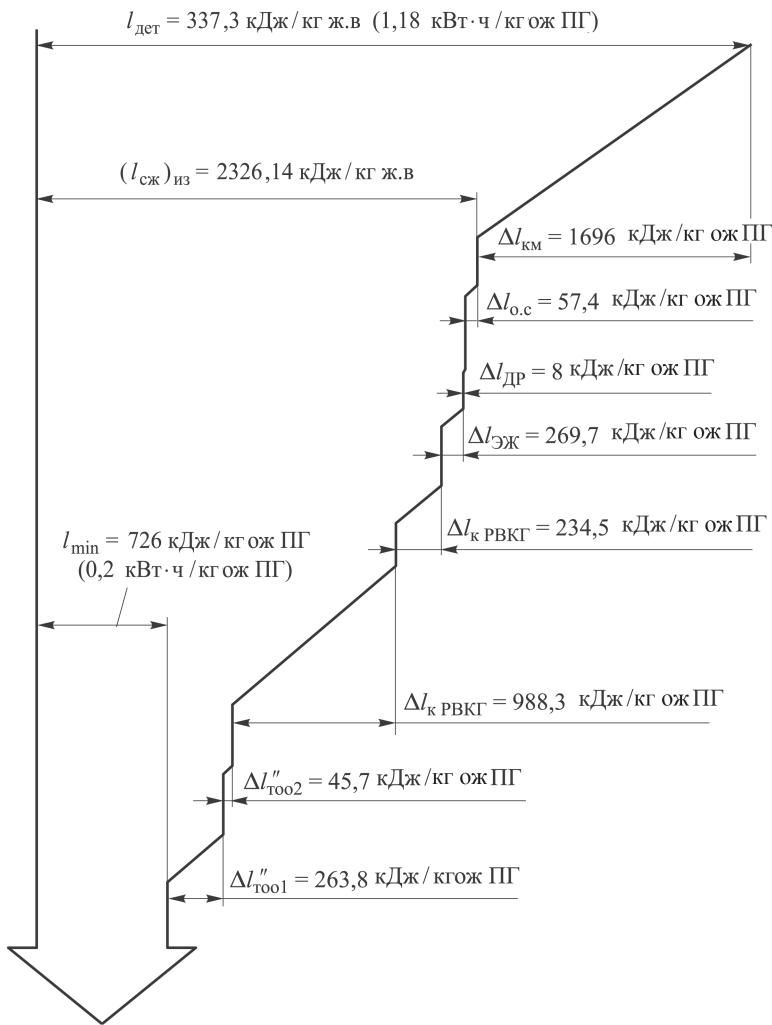


Рис. 3. Схема распределения затрат энергии в установке СПГ на ГРС, использующей цикл с РВКГ

$$l_{\text{дрВКГ}} = (i_{10} - i_{11})\bar{G}_{10} = 60,97 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - \text{работа расширения в детандерной части РВКГ};$$

$$l_{\text{дрВКГ}} = (T_{\text{О.С}}(s_{17} - s_2) - (i_{17} - i_2))\bar{G}_{17} = 41 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - \text{изотермическая работа сжатия в компрессорной ступени РВКГ};$$

$$\Delta l_{\text{кРВКГ}} = l_{\text{дрВКГ}} - l_{\text{изРВКГ}} = 20 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - \text{необходимые удельные затраты энергии для компенсации необратимости рабочих процессов в компрессоре РВКГ}.$$

6. Минимально необходимые удельные затраты энергии для компенсации производства энтропии в дросселе Др1:

$$\Delta S_{\text{Др1}} = (s_8 - s_7)\bar{G}_8 = 0,0024 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad \Delta l_{\text{Др1}} = T_{\text{О.С}}\Delta S_{\text{Др1}} = 0,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

7. Минимально необходимые удельные затраты энергии для компенсации производства энтропии в эжекторе ЭЖ:

$$\Delta S_{\text{эж}} = S_6 \bar{G}_6 - S_5 \bar{G}_5 - S_{12} \bar{G}_{12} = 0,077 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta l_{\text{эж}} = T_{\text{О.С}} \Delta S_{\text{эж}} = 23,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

8. Изотермический эффект дросселирования, обусловленный работой “отдаленного” компрессора:

$$q_{\text{КМ}} = \bar{G}_0 (i_0 - i_1) = 23 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

9. Изотермический эффект дросселирования, обусловленный работой компрессорной части РВКГ:

$$q_{\text{РВКГ}} = \bar{G}_{17} (i_{17} - i_2) = 3,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

10. Холодопроизводительность детандерной части РВКГ:

$$q_{\text{дРВКГ}} = (i_{10} - i_{11}) \bar{G}_{10} = 60,97 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

11. Теоретическая (полная) удельная холодопроизводительность цикла:

$$q_{\Sigma} = q_{\text{КМ}} + q_{\text{РВКГ}} + q_{\text{дРВКГ}} = 87,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

12. Затраты работы на компенсацию теплопритоков из окружающей среды:

$$\varphi = \frac{l_{\text{из}}}{q_{\Sigma}} = 2,47; \quad \Delta l_{\text{О.С}} = q_{\text{О.С}} \varphi = 4,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

13. Минимальная работа ожижения:

$$l_{\text{мин}} = T_{\text{О.С}} (s_0 - s_9) - (i_0 - i_9) = 726 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad l_{\text{мин X}} = l_{\text{мин}} \bar{G}_9 = 61,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

14. Суммарная действительная работа:

$$l_{\text{д}\Sigma} = \Delta l_{\text{ТО1}} + \Delta l_{\text{ТО2}} + \Delta l_{\text{Др1}} + \Delta l_{\text{кРВКГ}} + \\ + \Delta l_{\text{дРВКГ}} + \Delta l_{\text{О.С}} + \Delta l_{\text{эж}} + l_{\text{мин X}} \\ + \Delta l_{\text{КМ}} = 366 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Расхождение результатов при вычислении величины действительной работы:

$$\delta = 366 - 361,7 = 4,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad \text{т.е. } 1,2\%.$$

15. Степень термодинамического совершенства:

$$\eta = \frac{l_{\text{мин X}}}{l_{\text{д}\Sigma}} = 0,171.$$

На основе затрат на изготовление опытного образца РВКГ была проведена примерная оценка стоимости промышленного агрегата для установки СПГ производительностью 3 т/ч. Как и ожидалось, затраты на изготовление РВКГ оказались в 4–5 раз ниже цен на традиционные турбодетандер-компрессоры, широко используемые в криогенной технике. Общая ожидаемая экономия может составлять до 25 % общей стоимости установки.

Выводы. Предложены перспективная схема установки СПГ с детандер-компрессором нового типа — РВКГ, в котором отсутствуют потери при передаче энергии от детандерной части к компрессорной. Достигнутое в настоящее время значение адиабатного КПД этого устройства (0,55) позволяет проектировать установки со степенью термодинамического совершенства 17,1 %. Данная величина показывает, что термодинамическая эффективность предлагаемой технологии близка к эффективности традиционной технологии при ожидаемом снижении затрат на изготовление до 25 %.

Энтропийно-статистический анализ показал, что наибольший вклад в неравновесность процесса сжижения вносят процессы в следующих узлах установки: в “удаленном” компрессоре магистрального трубопровода (КМ) — до 40 % и в РВКГ — 28,8 %. Данное обстоятельство заметно снижает эффективность установки в целом. Дальнейшее усовершенствование возможно путем улучшения характеристик РВКГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архаров А.М., Сычев В.В. Основы энтропийно-статистического анализа реальных энергетических потерь в низкотемпературных и высокотемпературных машинах и установках // Холодильная техника. 2005. № 12. С. 5–12.
2. Архаров А.М., Сычев В.В. И еще раз об энтропии и задаче определения реальных (действительных) величин энергетических потерь вследствие необратимости // Холодильная техника. 2007. № 4. С. 4–9.
3. Архаров А.М., Сычев В.В., Архаров И.А. Сопоставление результатов термодинамического анализа энергетических потерь в высокотемпературных и низкотемпературных системах, машинах и установках // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. Спец. вып. “Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения”. С. 14–34.
4. Патент РФ № 2272971. Установка частичного сжижения природного газа. Русинов Д.А. и др.
5. Архаров А.М. О едином термодинамическом пространстве, теплоте, холоде, эксергии и энтропии как о базовых понятиях инженерной криологии // Холодильная техника. 2009. № 6. С. 23–32.
6. К анализу существующих установок ожижения природного газа малой производительности / А.М. Архаров, И.А. Архаров, Ю.А. Шевич и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 7. С. 24–35.
7. Архаров А.М., Семенов В.Ю., Малахов С.Б. Анализ процессов в роторном волновом криогенераторе // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. № 7. С. 15–20.

REFERENCES

- [1] Arkharov A.M., Sychev V.V. The basis of entropy and statistical analysis of real losses of power on low and high temperature machines and plant. *Kholodil'naya Tekhnika* [Refrigeration equipment], 2005, no. 12, pp. 14–23 (in Russ.).
- [2] Arkharov A.M., Sychev V.V. And again on the entropy and the problem of determining the actual (real) values of the energy loss due to irreversible. *Kholodil'naya Tekhnika* [Refrigeration equipment], 2007, no. 4, pp. 8–13 (in Russ.).
- [3] Arkharov A.M., Sychev V.V., Arkharov I.A. Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr., Spetsyp. “*Kholodil'naya i kriogennaya tekhnika, sistemy konditsionirovaniya i zhizneobespecheniya*” [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng., Spec. Iss. “Refrigeration and Cryogenic Engineering, Air Conditioning Systems and Life Support”], 2008 (in Russ.).
- [4] Krakovskiy B.D., Martynov V.A., Popov O.M., Rusinov D.A., Udut V.N. Ustanovka chastichnogo szhizheniya prirodnogo gaza Plant for partial liquefaction of natural gas. Patent RF, no. 2272971, 2006.
- [5] Arkharov A.M. About a common temperature space, heat, cold, energy and entropy as basic concepts of engineer's cryology. *Kholodil'naya Tekhnika* [Refrigeration equipment], 2009, no. 6, pp. 34–39 (in Russ.).
- [6] Arkharov A.M., Arkharov I.A., Shevich Yu.A., Semenov V.Yu., Lavrov N.A., Krasnonosova S.D., Kolobova A.N. To the analysis of available low capacity units for fluidization of natural gas. *Khim. i neftegaz. Mashinostr.* [Chem. and Petr. Engine.], 2010, no. 7, pp. 24–35 (in Russ.).
- [7] Arkharov A.M., Semenov V.Yu., Malakhov S.B. Savitsky A.I. Analysis of working processes in rotor wave cryogenerator. *Khim. i neftegaz. Mashinostr.* [Chem. and Petr. Engine.], 2012, no. 7, pp. 15–20 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 15.07.2014

Архаров Алексей Михайлович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат Государственных премий СССР и РФ, заслуженный деятель науки и техники России, академик РАЕН, лауреат премии и почетный член Международного института холода (Париж, Франция), академик Европейской академии естественных наук (Ганновер, Германия), председатель Московского регионального отделения Международной академии холода. Автор 25 книг, более 450 научных работ в области криогеники.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Arkharov I.A. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Refrigerating and Cryogenic Technology, Systems of Air Conditioning and Life Support” department of the Bauman Moscow State Technical University. Laureate of State Prizes of the USSR and the RF, Honored Worker of Science and Technology, academician of the Russian Academy of Natural Sciences. Prize-winner and Honorary Member of the International Institute of Refrigeration (Paris), academician of the European Academy of Natural Sciences (Hannover), President of Moscow Regional Department of the International Academy of Refrigeration. Author of 25 books and more than 450 publications in the field of cryogenics.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Семенов Виктор Юрьевич — канд. техн. наук, зам. генерального директора ПК НПФ “ЭКИП” по холодильной и криогенной технике. Автор более 30 научных работ в области криогенной техники.

ПК НПФ “ЭКИП”, Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский район, пос. Развилка, владение 8, офис 44.

Semenov V.Yu. — Cand. Sci. (Eng.), deputy general director of the Nauchno-proizvodstvennoy kooperativnoy firmy (PK NPF) “EKIP” [Research and Production Cooperative Firm (RPCF) “EKIP”] for the refrigeration and cryogenic technology. Author of more than 30 publications in the field of cryogenic engineering.

PK NPF “EKIP”, Leninskiy rayon, pos. Razvilka, ownership 8, office 44, Moscow region, 142717 Russian Federation.

Малахов Сергей Борисович — начальник конструкторского отдела ПК НПФ “ЭКИП”, аспирант кафедры “Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ПК НПФ “ЭКИП”, Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский район, пос. Развилка, владение 8, офис 44.

Malakhov S.B. — post-graduate of “Refrigeration and Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of the design department of the Nauchno-proizvodstvennoy kooperativnoy firmy (PK NPF) “EKIP” [Research and Production Cooperative Firm (RPCF) “EKIP”] for the refrigeration and cryogenic technology. Specialist in the field of cryogenic engineering.

PK NPF “EKIP”, Leninskiy rayon, pos. Razvilka, ownership 8, office 44, Moscow region, 142717 Russian Federation.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.