

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ МОБИЛЬНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СЖАТИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

И. Д. Обухов

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В данной статье представлены методика и результаты оптимизации системы рекуперации тепловых потерь (СРТП) мобильной компрессорной установки (МКУ), предназначенной для сжатия природного газа с применением компьютерной модели в программной среде MatLab с термодинамическим пакетом CoolProp. В процессе проведения исследования построена компьютерная модель СРТП, определен критерий эффективности рекуперации, произведена постановка оптимизационной задачи и выполнено ее решение. В качестве управляющих параметров оптимизации приняты давление кипения и массовый расход рабочего тела в цикле Ренкина. При оптимальных значениях данных параметров достигается наименьшее значение относительного массового расхода топлива МКУ, то есть достигается максимальная эффективность рекуперации.

Ключевые слова: рекуперация, цикл Ренкина, мобильная компрессорная установка, оптимизация, природный газ.

Введение

Промышленное бросовое тепло — это энергия, которая не находит практического применения в технологическом процессе, отводится в окружающую среду и теряется [1]. Применение системы рекуперации тепловых потерь, реализующей цикл Ренкина, позволяет повысить энергоэффективность технологических процессов, в которых есть потоки бросового тепла.

В мобильной компрессорной установке значительная часть энергии, вырабатываемой в двигателе внутреннего сгорания, который является приводом МКУ, отводится от установки в окружающую среду охлаждающей жидкостью и вместе с выхлопными газами (около 60–70%) [2], а та часть, которая подводится к компрессору в виде механической энергии, практически полностью отводится в системе охлаждения компрессора или вместе со сжатым газом. Рекуперация данных потоков бросового тела снижает потребление топлива приводом МКУ, тем самым делая процесс сжатия газа в МКУ более экономичным и экологичным (снижение выбросов CO_2).

Ранее были проведены исследования, направленные на параметрический анализ СРТП для МКУ, а также исследования в области повышения эффективности рекуперативного теплообменного аппарата системы СРТП [3–9].

Целью данного исследования является оптимизация СРТП, применимой к МКУ, предназначенной для сжатия природного газа с использованием компьютерной модели в программной среде MatLab с термодинамическим пакетом CoolProp.

Объект исследования

Объектом данного исследования является мобильная компрессорная установка, состоящая из

одноступенчатого компрессора и двигателя внутреннего сгорания, с системой рекуперации тепловых потерь, реализующей цикл Ренкина. Схемное решение СРТП, рассмотренное в данном исследовании, представлено на рис. 1.

Рабочее тело из насоса (Н) с давлением кипения поступает в первый рекуперативный теплообменный аппарат (ТА_1), в котором ему передается теплота сжатого газа (Q_1), поступающего из компрессора. Затем рабочее тело поступает во второй рекуперативный теплообменный аппарат (ТА_2), в котором ему передается теплота (Q_2) потока продуктов сгорания топлива (ПСТ). Далее рабочее тело поступает в расширительную машину (Р) и расширяется до давления конденсации, производя мощность. После расширительной машины рабочее тело поступает в теплообменный аппарат конденсатор ($\text{ТА}_{\text{конд}}$), где конденсируется и далее в состоянии жидкости поступает в насос, где давление рабочего тела повышается до давления кипения. Мощности двигателя и расширительной машины суммируются, и суммарная мощность подводится к компрессору.

Компрессор сжимает природный газ, массовый расход которого равен 1 кг/с, начальное давление равно 100 000 Па, начальная температура 20 °С. Показатель адиабаты равен 1,25, удельная изобарная теплоемкость газа принята равной 2 400 Дж/(кг·К). КПД компрессора принят равным 85%.

КПД двигателя, в качестве допущения, принят постоянным и равным 40%, температура продуктов сгорания топлива на входе в рекуперативный теплообменный аппарат равна 600 °С, удельная изобарная теплоемкость продуктов сгорания топлива принята равной 1100 Дж/(кг·К).

Температура конденсации в цикле Ренкина принята равной 30 °С. КПД расширительной машины принят постоянным и равным 80%, КПД насоса принят равным 95%. Коэффициент теплопередачи на

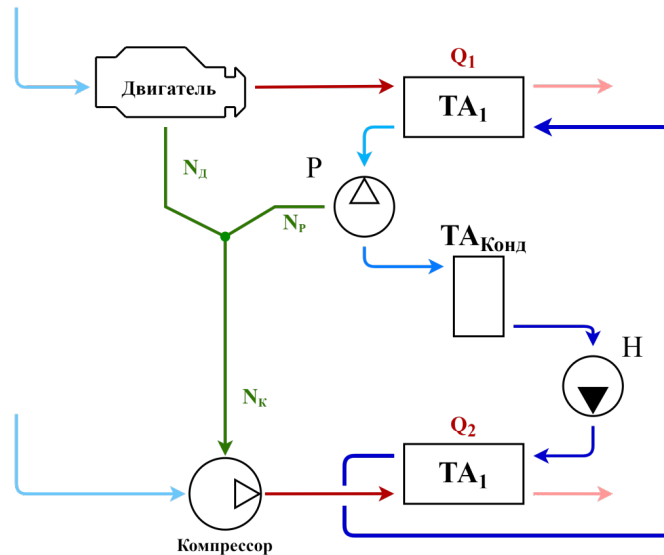


Рис. 1. Схема мобильной компрессорной установки с системой рекуперации тепловых потерь
Fig. 1. Mobile compressor unit with a waste heat recovery system

участках теплообменных аппаратов принят равным 200 Вт/(м²·К). В качестве рабочего тела системы рекуперации взята вода.

Методика исследования

Соотношение массовых расходов топливовоздушной смеси (ТВС) для варианта исполнения МКУ с системой рекуперации M_1 и для варианта без рекуперации M_0 , или относительный массовый расход ТВС, выглядит следующим образом:

$$\frac{M_1}{M_0} = 1 - \frac{N_p}{N_k} \quad (1)$$

Данное отношение принято в качестве показателя эффективности рекуперации, и его минимальное значение определяет максимальную эффективность рекуперации.

Мощность компрессора определяется формулой:

$$N_k = \frac{k \cdot \frac{M_g}{\rho_1} \cdot p_1}{k - 1} \left(\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_k} \quad (2)$$

где p_1 — начальное давление газа; M_g — массовый расход газа; k — показатель адиабаты; ρ_1 — начальная плотность газа; π_k — степень повышения давления; η_k — КПД компрессора.

Мощность насоса определяется формулой:

$$N_H = \frac{m_{pm} (p_{кин} - p_{конд})}{\rho_{конд} \cdot \eta_H} \quad (3)$$

где m_{pm} — удельный массовый расход рабочего тела в цикле Ренкина; $p_{кин}$ — давление кипения рабочего тела; $p_{конд}$ — давление конденсации рабочего тела; $\rho_{конд}$ — плотность рабочего тела в жидком виде при давлении конденсации; η_H — КПД насоса.

Мощность двигателя Ренкина можно определить с помощью следующей формулы:

$$N_p = m_{pm} \eta_p (h_{pm1} - h_{pm2}) - N_H \quad (4)$$

где h_{pm1} — удельная массовая энтальпия пара на входе в расширительную машину; h_{pm2} — удельная массовая энтальпия пара на выходе из расширительной машины; η_p — КПД расширительной машины.

Температура на участках теплообменных аппаратов определяется с помощью уравнений изменения температуры теплоносителя по длине поверхности применительно к противоточной схеме движения [10]:

$$\frac{t_{rm2} - t_{pm2}}{t_{rm1} - t_{pm2}} = e^{-\frac{k_{ma} F_i}{m_{rm} c_{prr}} \left(1 - \frac{m_{pm} c_{prr}}{m_{rm} c_{prr}} \right)} \quad (5)$$

$$\frac{t_{rm2} - t_{кин}}{t_{rm1} - t_{кин}} = e^{-\frac{k_{ma} F_i}{m_{rm} c_{prr}}} \quad (6)$$

где t_{rm1} — температура горячего теплоносителя на входе в участок; t_{rm2} — температура горячего теплоносителя на выходе из участка; t_{pm1} — температура рабочего тела на входе в участок; t_{pm2} — температура рабочего тела на выходе из участка; $t_{кин}$ — температура кипения рабочего тела; k_{ma} — коэффициент теплопередачи; m_{rm} — массовый расход горячего теплоносителя; c_{prr} — удельная изобарная теплоемкость рабочего тела; c_{pm} — удельная изобарная теплоемкость горячего теплоносителя; F_i — площадь теплообмена участка.

При этом формула (5) применима для участка без фазового перехода рабочего тела, а формула (6) применима для участка с фазовым переходом.

Удельная энтальпия рабочего тела на входе и выходе расширительной машины (РМ) является функцией от давления кипения, давления конденсации и температуры на входе (для энтальпии на выходе РМ

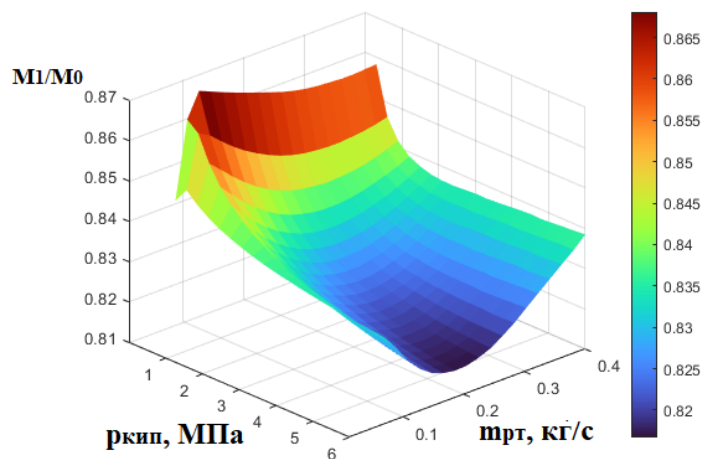


Рис. 2. График поверхности функции $M_1/M_0 = f(p_{кин}, m_{рм})$ для $\pi_k = 6, F_1 = 12 \text{ м}^2, F_2 = 12 \text{ м}^2$
 Fig. 2. Surface of the function $M_1/M_0 = f(p_{кин}, m_{рм})$ for $\pi_k = 6, F_1 = 12 \text{ м}^2, F_2 = 12 \text{ м}^2$

Таблица 1. Результаты решения задачи оптимизации
 Table 1. Results of solving the optimization problem

Решатель	Метод	Оптимальное давление кипения, МПа	Оптимальный массовый расход, кг/с	Значение относительного массового расхода M_1/M_0	Время вычисления, с
fmincon	внутренней точки	5,4	0,2	0,817	≈205
fminmax	достижения цели	6	0,201	0,817	≈165
ga	генетический алгоритм	5,8	0,185	0,817	≈1795
simulannealbnd	симуляции отжига	6	0,189	0,817	≈1425
patternsearch	поиска паттернов	6	0,183	0,817	≈57

зависимость от температуры на входе в РМ определяется изоэнтропным расширением):

$$h_{рм1} = f(p_{кин}, t_{рм1}), \quad (7)$$

$$h_{рм2} = f(p_{кин}, t_{рм1}). \quad (8)$$

Значения удельной энтальпии в данных точках определяется с применением термодинамического пакета CoolProp.

Таким образом, исходя из (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), функция относительного массового расхода:

$$\frac{M_1}{M_0} = f(p_{кин}, m_{рм}, F_1, F_2), \quad (9)$$

где F_1 — площадь теплообмена первого теплообменного аппарата; F_2 — площадь теплообмена второго теплообменного аппарата.

В данном исследовании значения F_1 и F_2 являются задаваемыми значениями, таким образом (9), преобразуется:

$$\frac{M_1}{M_0} = f(p_{кин}, m_{рм}). \quad (10)$$

Данная функция является целевой функцией задачи оптимизации.

Задача оптимизации формулируется следующим образом: найти минимум функции зависимости относительного массового расхода ТВС от массового расхода рабочего тела и от его давления кипения.

Критерием оптимальности в данной задаче является наименьшее значение относительного массового расхода ТВС. Управляющими параметрами в данной задаче являются температура кипения $p_{кин}$ и массовый расход рабочего тела $m_{рм}$. Значение давления кипения на нижней границе области поиска оптимального значения целевой функции равно значению давления конденсации, значение на верхней границе определяется условными конструктивными параметрами расширительной машины.

Математическая постановка задачи оптимизации выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} M_1/M_0 = f(p_{кин}, m_{рм}) \rightarrow \min; \\ p_{конд} < p_{кин} < 6 \text{ МПа}; \\ 0,01 \text{ кг/с} < m_{рм} < 0,4 \text{ кг/с}. \end{cases} \quad (11)$$

Вычисления произведены встроенными решателями MatLab R2020b: fmincon [11], fminmax [12], ga

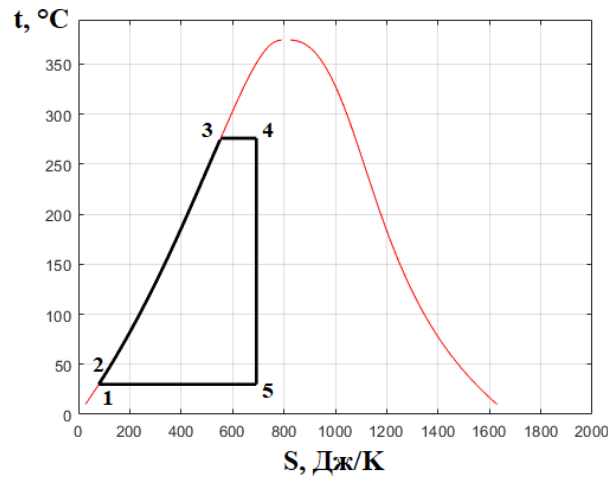


Рис. 3. Цикл Ренкина на tS -диаграмме для полученных значений параметров
 Fig. 3. Rankine cycle on the tS -diagram for the obtained parameter values

Таблица 2. Параметры рабочего тела в точках цикла
 Table 2. Working fluid parameters at cycle points

Точка	Температура, °C	Давление, кПа
1	30	4,21
2	30,133	6000
3	275,73	6000
4	275,73	6000
5	30	4,21

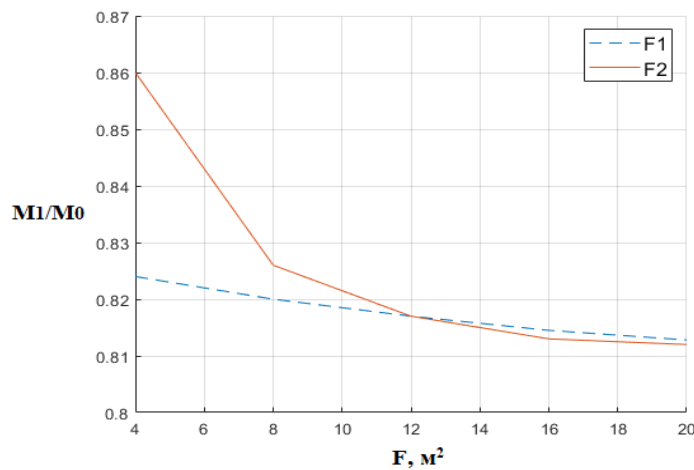


Рис. 4. График зависимости значения M_1/M_0 от величины F_1 и F_2
 Fig. 4. Plot of dependence of the value of M_1/M_0 on the value of F_1 and F_2

[13], `simulannealbnd` [14], `patternsearch` [15], в которых были заданы стандартные настройки.

Результаты исследования и их анализ

Графическое представление целевой функции для значения π_k , равного 6, и значений F_1 и F_2 , равных 12 m^2 , показано на рис. 2.

На основе анализа данного графика можно сделать вывод о том, что существуют такие значения

давления кипения и массового расхода рабочего тела, при которых достигается наименьшее значение M_1/M_0 , то есть наибольшая эффективность рекуперации для данного схемного решения установки рекуперации.

Результаты определения оптимальных значений параметров цикла Ренкина и значения M_1/M_0 путем решения оптимизационной задачи с применением различных решателей для $\pi_k = 6$, $F_1 = 12 \text{ m}^2$, $F_2 = 12 \text{ m}^2$ представлены в табл. 1.

Для решения данной задачи наиболее выгодным решателем из выбранных по соотношению скорости решения и точности результата решения является *patternsearch*, реализующий метод поиска паттернов. Цикл Ренкина, реализуемый установкой рекуперации, при параметрах, полученных решателем *patternsearch*, представлен на рис. 3. Параметры рабочего тела в точках цикла представлены в табл. 2.

Зависимости минимального значения функции $M_1/M_0 = f(p_{кин}, m_{pm})$ при $\pi_k = 6$ от величины F_1 при фиксированном значении $F_2 = 12 \text{ м}^2$ и от величины F_2 при фиксированном значении $F_1 = 12 \text{ м}^2$ представлены на рис. 4.

Видно, что с увеличением площади теплообмена значение M_1/M_0 уменьшается. При этом увеличение значения F_2 более значимо уменьшает величину M_1/M_0 .

Заключение

В данном исследовании продемонстрировано, что существуют оптимальные параметры цикла Ренкина, реализуемого СРТП для МКУ, а именно массовый расход рабочего тела и его давление кипения, при которых достигается минимум значения относительного массового расхода топлива для данной архитектуры СРТП и параметрах компрессора. При этом оптимальное давление кипения равно максимально возможному (значение на верхней границе поиска оптимизационной задачи).

При применении данной методики для представленного схемного решения системы рекуперации и данных параметрах мобильной компрессорной установки решение задачи оптимизации показывает, что увеличение площади теплообмена второго теплообменного аппарата более значимо уменьшает величину относительного массового расхода M_1/M_0 , чем увеличение площади теплообмена первого теплообменного аппарата.

Также при данной схеме системы рекуперации, параметрах сжимаемого газа, ПСТ и рабочего тела, значения степени повышения давления $\pi_k = 6$ и значениях площади теплообмена $F_1 = 12 \text{ м}^2$, $F_2 = 12 \text{ м}^2$ ожидаемое снижение потребления топливовоздушной смеси на реальных объектах не более 18,3 %.

Список источников

1. Jouhara H., Khordehghah N., Almahmoud S. [et al.]. Waste heat recovery technologies and applications // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018. Vol. 6. P. 268 – 289. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.04.017.
2. Sprouse C., Depcik C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 51 (s1-2). P. 711 – 722. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.10.017.
3. Юша В. Л., Чернов Г. И. Анализ термодинамической эффективности применения цикла Ренкина в системе рекуперации тепловых потерь компрессорной установки с приводным двигателем внутреннего сгорания // *Омский научный вестник*. 2013. № 2. С. 255 – 260.
4. Юша В. Л., Чернов Г. И. Термодинамический анализ эффективности мобильных компрессорных установок с рекупера-

цией тепловых потерь: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 102 с. ISBN 978-5-8149-1918-2.

5. Yusha V. L., Chernov G. I., Kalashnikov A. M. Analysis of the thermal efficiency of solid and vacuum thermal insulation in an exchanger of the heat losses recovery system in mobile compressor units // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2141, Issue 1. 030069. DOI: 10.1063/1.5122119.

6. Yusha V. L., Chernov G. I., Kiseleva O. O. The analysis of the recuperative Rankine cycle boiling pressure impact on the efficiency of the mobile compressor unit with the heat losses recovery system // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2007, Issue 1. 030033. DOI: 10.1063/1.5051894.

7. Юша В. Л., Чернов Г. И., Калашников А. М. Сравнительный анализ эффективности различных типов теплоизоляции в теплообменнике-утилизаторе системы рекуперации тепловых потерь мобильных компрессорных установок // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2018. Т. 2, № 2. С. 33 – 41. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-33-41.

8. Калашников А. М., Капелюховская А. А., Чернов Г. И. Оценка эффективности теплообменников с зональной вакуумной изоляцией для системы рекуперации тепловых потерь компрессорных агрегатов // *Современные наукоемкие технологии*. 2020. № 4-2. С. 216 – 222. DOI: 10.17513/snt.37999.

9. Калашников А. М., Капелюховская А. А., Обухов И. Д. Анализ применения системы рекуперации тепловых потерь с помощью органического цикла Ренкина для привода технологического оборудования // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2021. Т. 5, № 1. С. 18 – 27. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-18-27.

10. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Москва: Энергия, 1975. 488 с.

11. "fmincon" // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html> (дата обращения: 19.02.2021).

12. "fminimax" // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fminimax.html> (дата обращения: 19.02.2021).

13. "ga" // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html> (дата обращения: 19.02.2021).

14. "simulannealbnd" // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/simulannealbnd.html> (дата обращения: 19.02.2021).

15. "patternsearch" // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/patternsearch.html> (дата обращения: 19.02.2021).

ОБУХОВ Иван Дмитриевич, магистрант гр. ТМОм-201 факультета элитного образования и магистратуры.

SPIN-код: 1302-8208

AuthorID (РИНЦ): 1118828

ORCID: 0000-0003-0253-3997

Адрес для переписки: crispyzy@gmail.com

Для цитирования

Обухов И. Д. Оптимизация системы рекуперации тепловых потерь мобильной компрессорной установки для сжатия природного газа // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2021. Т. 5, № 4. С. 48 – 54. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-48-54.

Статья поступила в редакцию 17.06.2021 г.

© И. Д. Обухов

OPTIMIZATION OF WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM FOR MOBILE COMPRESSOR UNIT FOR COMPRESSING NATURAL GAS

I. D. Obukhov

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

This paper presents the methodology and results of optimization of the waste heat recovery system (WHRS) of a mobile compressor unit (MCU) designed to compress natural gas using a computer model in the MatLab with the CoolProp thermodynamic package. In the course of the study, a computer model of the WHRS is built, a criterion for the efficiency of recuperation is determined, an optimization problem is formulated and its solution is carried out. The boiling pressure and mass flow rate of the working fluid in the Rankine cycle are taken as the optimization parameters. With the optimal values of these parameters, the smallest value of the relative mass fuel consumption of the MCU is achieved, that is, the maximum recuperation efficiency is achieved.

Keywords: recuperation, Rankine cycle, mobile compressor unit, optimization, natural gas.

References

1. Jouhara H., Khordehghah N., Almahmoud S. [et al.]. Waste heat recovery technologies and applications // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018. Vol. 6. P. 268 – 289. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.04.017. (In Engl.).
2. Sprouse C., Depcik C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 51 (s1-2). P. 711 – 722. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.10.017. (In Engl.).
3. Yusha V. L., Chernov G. I. Analiz termodinamicheskoy effektivnosti primeneniya tsikla Renkina v sisteme rekuperatsii teplovykh poter' kompressornoy ustanovki s privodnym dvigatelem vnutrennego sgoraniya [The analysis of the thermodynamic efficiency of the rankine cycle in recuperation system of heat losses in compressor unit driven by the internal combustion engine] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2013. No. 2. P. 255 – 260. (In Russ.).
4. Yusha V. L., Chernov G. I. Termodinamicheskii analiz effektivnosti mobil'nykh kompressornykh ustanovok s rekuperatsiyey teplovykh poter' [Thermodynamic analysis of the efficiency of mobile compressor units with heat loss recovery]. Omsk, 2014. 102 p. ISBN 978-5-8149-1918-2. (In Russ.).
5. Yusha V. L., Chernov G. I., Kalashnikov A. M. Analysis of the thermal efficiency of solid and vacuum thermal insulation in an exchanger of the heat losses recovery system in mobile compressor units // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2141, Issue 1. 030069. DOI: 10.1063/1.5122119. (In Engl.).
6. Yusha V. L., Chernov G. I., Kiseleva O. O. The analysis of the recuperative Rankine cycle boiling pressure impact on the efficiency of the mobile compressor unit with the heat losses recovery system // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2007, Issue 1. 030033. DOI: 10.1063/1.5051894. (In Engl.).
7. Yusha V. L., Chernov G. I., Kalashnikov A. M. Sravnitel'nyy analiz effektivnosti razlichnykh tipov teploizolyatsii v teploobmennike-utilizatore sistemy rekuperatsii teplovykh poter' mobil'nykh kompressornykh ustanovok [Comparative analysis of efficiency of different types of thermal insulation in heat exchanger-utilizer of heat loss recovery system of mobile compressor units] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 2. P. 33 – 41. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-33-41. (In Russ.).
8. Kalashnikov A. M., Kapelyukhovskaya A. A., Chernov G. I. Otsenka effektivnosti teploobmennikov s zonal'noy vakuumnoy izolyatsiyey dlya sistemy rekuperatsii teplovykh poter' kompressornykh agregatov [Evaluation of efficiency heat exchangers with zone vacuum insulation for recovery system of heat loss compressor units] // *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. Modern High Technologies*. 2020. No. 4-2. P. 216 – 222. DOI: 10.17513/snt.37999. (In Russ.).
9. Kalashnikov A. M., Kapelyukhovskaya A. A., Obukhov I. D. Analiz primeneniya sistemy rekuperatsii teplovykh poter' s pomoshch'yu organicheskogo tsikla renkina dlya privoda tekhnologicheskogo oborudovaniya [Analysis of application of heat loss recovery system using organic Rankine Cycle for drive of process equipment] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 18 – 27. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-18-27. (In Russ.).
10. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha [Heat transfer]*. Moscow, 1975. 488 p. (In Russ.).
11. "fmincon" // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html> (accessed: 19.02.2021). (In Russ.).
12. "fminimax" // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fminimax.html> (accessed: 19.02.2021). (In Russ.).
13. "ga" // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html> (accessed: 19.02.2021). (In Russ.).
14. "simulannealbnd" // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/simulannealbnd.html> (accessed: 19.02.2021). (In Russ.).
15. "patternsearch" // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/patternsearch.html> (accessed: 19.02.2021). (In Russ.).

OBUKHOV Ivan Dmitrievich, Undergraduate gr. TMOm-201 of Elite Education and Master's Degree Program Faculty.
SPIN-code: 1302-8208
AuthorID (RSCI): 1118828
ORCID: 0000-0003-0253-3997
Correspondence address: crispyzy@gmail.com

For citations

Obukhov I. D. Optimization of waste heat recovery system for mobile compressor unit for compressing natural gas // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power

Engineering. 2021. Vol. 5, no. 4. P. 48–54. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-48-54.

Received June 17, 2021.

© **I. D. Obukhov**