

Научная статья
УДК 629.7.038

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ КРИОГЕННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БПЛА С ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ ОТ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Ольга Витальевна Трешкина¹, Хамза Адена², Владислав Иванович Шихалев³ ✉,
Дмитрий Александрович Угланов⁴

^{1, 2, 3, 4} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(Самарский университет),

Самара, Россия

¹ tereshchenko.ov@ssau.ru

² hamzaadenane93@gmail.com

³ shikhalev.vi@ssau.ru ✉

⁴ dmitry.uglanov@mail.ru

Аннотация. Проведено расчетное исследование параметров гибридной криогенной силовой установки для беспилотного летательного аппарата (БПЛА), работающей по открытому циклу Ренкина. Рабочим телом в криогенной энергетической установке является жидкий азот. Были рассчитаны основные параметры гибридной криогенной силовой установки, проведено сравнение полученных данных с параметрами электрического двигателя для БПЛА.

Ключевые слова: гибридная криогенная силовая установка, криогенное рабочее тело, жидкостный подогрев, беспилотный летательный аппарат, углеродный след

Финансирование: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект № 0777-2020-0019) с использованием оборудования центра коллективного пользования «Межкафедральный учебно-производственный научный центр САМ-технологий».

Для цитирования: Трешкина О.В., Адена Х., Шихалев В.И., Угланов Д.А. Расчетное исследование гибридной криогенной силовой установки для БПЛА с подводом теплоты от двигателя внутреннего сгорания // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 155–162.

Original article

COMPUTATIONAL STUDY OF A HYBRID CRYOGENIC POWER PLANT FOR THE UAV WITH HEAT SUPPLY FROM THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Ol'ga V. Tremkina¹, Hamza Adenane², Vladislav I. Shikhalev³ ✉, Dmitriy A. Uglanov⁴

^{1, 2, 3, 4} Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (Samara University),
Samara, Russia

¹ tereshchenko.ov@ssau.ru

² hamzaadenane93@gmail.com

³ shikhalev.vi@ssau.ru ✉

⁴ dmitry.uglanov@mail.ru

Abstract

The presented article describes a computational study of a modernized hybrid cryogenic power plant. Liquid nitrogen was selected as the working fluid of the cryogenic installation. The schematic diagram of a hybrid cryogenic power plant consists of an internal combustion engine (ICE) and a cryogenic plant (CP); the heat source is liquid antifreeze, which collects the heat from the internal combustion engine and delivers it to the liquid nitrogen.

The installation principle of operation consists in the following. The cryogenic working fluid (liquid nitrogen) from the tank enters the heater through the cryogenic pump, where nitrogen obtains thermal energy from antifreeze. The antifreeze, in its turn, is the coolant for the ICE. From the heat exchanger gaseous nitrogen enters the piston expander, where the polytropic process emanates. The resulting work is transferred to the screw actuator.

The cryogenic power plant operates according to the open Rankine cycle. The open circuit of the power plant, which employs the low-potential heat of liquefied nitrogen, is quite simple and economical. Both nitrogen and air, liquefied natural gas, etc. can be employed as a working fluid.

The Rankine cycle was constructed in T-S coordinates (temperature-entropy coordinates) of nitrogen with the Coolpack application software package [15]. Thermodynamic parameters of the basic points were computed employing an algorithm for conducting a computational study of the hybrid cryogenic power plant parameters [14, 18].

The working body is being heated in the heat exchanger-evaporator to the temperature of the upper heat source [19]. Technical specification indicates that the flight altitude of the unmanned aerial vehicle (UAV) is 2000 m, and the temperature of the hot coolant is 363 K [14]. Computational study of the UAV aerodynamic characteristics revealed that required power would be 15 kW at the cruising flight.

The results of the computational study demonstrated the necessity of both temperature and pressure increasing at the piston expander inlet for the hybrid cryogenic power plant efficiency enhancing. Temperature increasing up to 363 K may be achieved through employing the heat removed from the ICE, employing liquid cooling system. It will allow reducing the cryogenic working body consumption to 0.053 kg/s while ensuring the power output of the UAV power plant at the level of 15 kW.

Keywords: hybrid cryogenic power plant, cryogenic working fluid, liquid heating, unmanned aerial vehicle, carbon trace

Funding: the work was financed by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 0777-2020-0019) employing the equipment of the “Interdepartmental Educational and Production Scientific Center of CAM-technologies” Center for collective use.

For citation: Tremkina O.V., Adenane H., Shikhalev V.I., Uglanov D.A. Computational Study of a Hybrid Cryogenic Power Plant for the UAV with Heat Supply from the Internal Combustion Engine. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 3, pp. 155-162.

Введение

Объектом расчетного исследования является модернизированная гибридная криогенной силовая установка, которая была представлена в ранее опубликованной статье [1].

Уменьшение загрязнения воздуха и углеродного следа летательных аппаратов является основной задачей при разработке альтернативных транспортных технологий, основанных не на сжигании углеводородного топлива, а на экологически чистых технологиях. В связи с обострением энергетического кризиса должен измениться и облик авиации [2]. За последние двадцать лет развитие отечественных беспилотных летательных аппаратов существенно активизировалось [3].

На современные БПЛА могут устанавливаться различные типы двигателей, например электрические двигатели, двигатели внутреннего сгорания (ДВС), газотурбинные двигатели и др. Тип двига-

теля выбирается на основе конкретных критериев, таких как масса БПЛА, высота и скорость полета.

Двухтактные двигатели внутреннего сгорания для летательных аппаратов (ЛА) (микроДВС для ЛА, прежде всего БПЛА) являются одними из самых малоразмерных представителей данного типа двигателей. Они характеризуются малыми габаритами, малой массой и простотой конструкции. Все это обусловлено сферой использования данного типа двигателей [4]. Как известно, в авиации борются за каждый грамм массы и надежность используемых агрегатов.

К сожалению, в современной России практически отсутствует производство отечественных поршневых и электрических двигателей, наиболее востребованных в классе средних и легких БПЛА. Также стоит отметить, что острой проблемой отечественного авиационного двигателестроения является импортозамещение [5].

В настоящее время существует технология ожижения компонента воздуха, которая позволяет получить жидкий азот, с затратами энергии 0,5–1,0 кВт · ч/кг [6]. Ожиженный криопродукт обладает большим запасом энергии в виде низкопотенциальной теплоты. Использование низкопотенциальной энергии криопродукта может осуществляться несколькими способами, одним из которых является применение энергетических установок, работающих по циклам Ренкина или Брайтона [7, 8].

Теплоэнергетические установки, которые работают на жидком азоте, имеют более высокие энергетические параметры при меньшей стоимости производства по сравнению с электрическими двигателями, а расходы на их эксплуатацию сопоставимы с таковыми для традиционных автомобилей с двигателем внутреннего сгорания при учете экологического аспекта [9].

Криогенная силовая установка внедрена компанией Dearman на автомобильном транспорте. Двигатель «Dearman» представляет собой поршневой двигатель, который обеспечивает регазификацию жидкого азота (LN2) или жидкого воздуха с последующим расширением для получения механической энергии для привода электрогенератора [10, 11].

В статье предлагается модель гибридной криогенной силовой установки для БПЛА, схема которого изображена на рис. 1 [1], а летно-технические характеристики приведены в табл. 1. Особенностью данной модели является использование теплоты выхлопных газов, благодаря которому жидкий азот

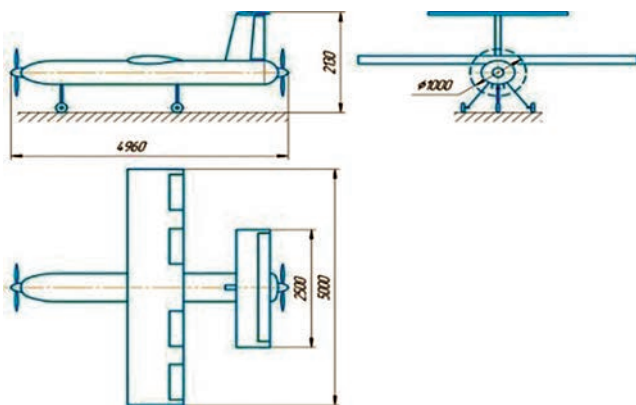


Рис. 1. Схема общего вида проектируемого БПЛА, выполненного по типу «тянущий–толкающий». Геометрические параметры беспилотного летательного аппарата определены на базе статистики сверхлегких самолетов и в зависимости от требований к БПЛА, установленных в техническом задании [1]

регазифицируется, а далее расширяется [10]. Предлагаемая модель силовой установки имеет ряд преимуществ: использование ее позволит уменьшить выбросы вредных веществ в окружающую среду, углеродный след, снизить потребление углеводородного топлива и повысить экологические характеристики беспилотного летательного аппарата [1].

В состав гибридной криогенной силовой установки входят двигатель внутреннего сгорания (передний двигатель) и криогенная энергетическая установка (кормовой двигатель). В качестве рабочего тела используется жидкий азот [1].

Требования к гибридной криогенной силовой установке определяются техническим заданием (табл. 2) [12].

Схема гибридной криогенной силовой установки беспилотного летательного аппарата, работающей на жидком азоте с жидкостным подогревом от антифриза, который, в свою очередь, является охлаждающей жидкостью для ДВС, представлена на рис. 2.

Принцип работы гибридной криогенной силовой установки с жидкостным подогревом аналогичен принципу работы гибридной криогенной силовой установки с воздушным подогревом [2]. Криогенное рабочее тело (жидкий азот) из баллона 1 [13], с помощью криогенного насоса 2, поступает в теплообменник-испаритель 3, где азот получает тепловую энергию от антифриза; антифриз, в свою очередь, является охлаждающей жидко-

Таблица 1
Летно-технические характеристики проектируемого БПЛА

Параметр	Единица измерения	Значение
Длина разбега $l_{разб}$	м	150
Высота полета на крейсерском режиме $H_{кр}$	м	2000
Крейсерская скорость $V_{кр}$	км/ч	170
Масса целевой нагрузки $m_{нагр}$	кг	15
Взлетная масса $M_{взл}$	кг	200
Максимальная дальность полета с расчетной нагрузкой l	км	800

Таблица 2
Основные требования к гибридной криогенной силовой установке

Параметр	Единица измерения	Значение
Потребная мощность двигателя	кВт	5
Располагаемая мощность	кВт	15
Масса емкости для хранения криотоплива с жидким азотом	кг	50

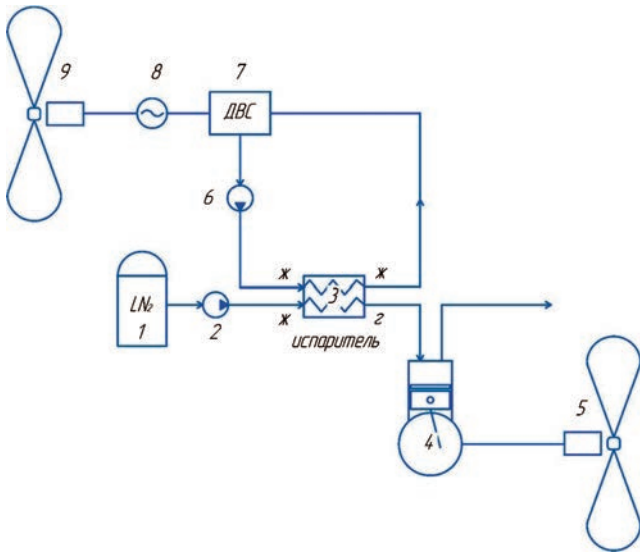


Рис. 2. Схема гибридной криогенной силовой установки БПЛА с жидкостным подогревом:
 1 – баллон с криогенным рабочим телом;
 2 – криогенный насос;
 3 – теплообменник-испаритель;
 4 – поршневой детандер;
 5 – тянущий винт; 6 – насос;
 7 – двигатель внутреннего сгорания;
 8 – электрогенератор; 9 – толкающий винт

стью для ДВС; затем газообразный азот поступает в поршневой детандер 4 [1]. В поршневом детандере (расширительной машине) происходит политропное расширение [14], в результате чего полученная работа идет на привод винта 5.

Расчетное исследование параметров гибридной криогенной силовой установки БПЛА с жидкостным подогревом

Криогенная энергетическая установка работает по открытому циклу Ренкина (рис. 3) [15].

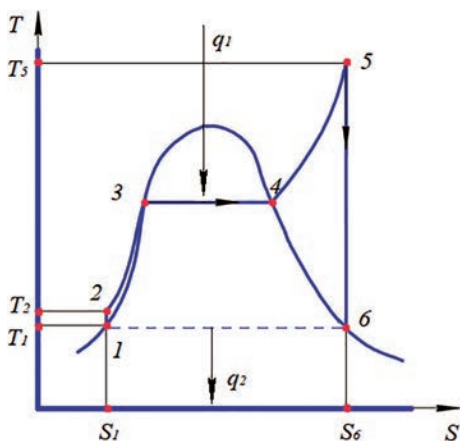


Рис. 3. Процессы цикла Ренкина на T–S-диаграмме

С помощью пакета прикладных программ Coolpack [16] был построен цикл Ренкина в T–S-координатах (температурно–энтропийных координатах) азота, а с помощью справочных данных [17, 18] были вычислены термодинамические параметры основных точек 1–6 с использованием алгоритма расчетного исследования параметров гибридной криогенной силовой установки [15, 19].

Количество подведенного тепла вычисляется по формуле

$$q_1 = i_5 - i_6, \tag{1}$$

где i_5, i_6 – энтальпия в точках 5 и 6, соответствующих точкам цикла, пркдставленного на рис. 3.

Удельная работа цикла определяется по формуле

$$l_{ц} = \frac{k}{k-1} RT_5 \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \right]. \tag{2}$$

где R – универсальная газовая постоянная; p_1 – давление в баллоне с криогенный рабочим телом; k – показатель адиабаты; T_5 – температура в точке 5, соответствующая температуре верхнего источника теплоты; p_2 – давление после насоса.

Количество отведенного тепла вычисляется по формуле

$$q_2 = l_{ц} - q_1. \tag{3}$$

Расход криогенного рабочего тела определяется по формуле

$$G = \frac{N}{l_{ц}}, \tag{4}$$

где N – мощность силовой установки.

В теплообменнике-испарителе рабочее тело нагревается до температуры верхнего источника теплоты [20]. Известно из технического задания, что высота полета беспилотного летательного аппарата составляет 2000 м, температура горячего теплоносителя 363 К [1].

В табл. 3 и 4 представлены основные термодинамические параметры и результаты расчетного исследования гибридной криогенной силовой установки БПЛА с жидкостным подогревом.

На основании полученных результатов были построены зависимости расхода рабочего тела от давления и температуры на входе в поршневой детандер, представленные на рис. 4 и 5. При повышении давления на входе в расширительную машину (поршневой детандер) и увеличении температуры рабочего тела увеличивается полезная работа турбины. С ростом давления в насосе уменьшается расход рабочего тела (рис. 4). С ростом температу-

Таблица 3

Основные термодинамические параметры гибридной криогенной силовой установки с жидкостным подогревом, работающей по открытому циклу Ренкина

Давление в точке 1, Па	Давление в точках 2, 3, 4, 5, атм	Температура в точке 1, К	Температура в точках 3, 4, К	Температура в точке 5, К	Энтальпия в точке 5, кДж/кг	Энтальпия в точке 1, кДж/кг
97190	2,96	77	88	363	581	-122,746
97190	4,93	77	94	363	581	-122,746
97190	6,91	77	99	363	580	-122,746
97190	9,87	77	105	363	580	-122,746
97190	14,8	77	110	363	579	-122,746
97190	19,74	77	116	363	579	-122,746
97190	24,67	77	120	363	578	-122,746
97190	29,61	77	124	363	577	-122,746
97190	49,35	77	126	363	575	-122,746
97190	74,02	77	126	363	572	-122,746
97190	98,69	77	126	363	570	-122,746
97190	197,38	77	147	363	562	-122,746
97190	296,08	77	147	363	558	-122,746
97190	493,46	77	147	363	560	-122,746
97190	592,15	77	147	363	564	-122,746

Таблица 4

Результаты расчетного исследования гибридной криогенной силовой установки БПЛА с жидкостным подогревом, работающей по открытому циклу Ренкина

Количество подведенного тепла q_1 , кДж/кг	Количество отведенного тепла q_2 , кДж/кг	Удельная работа цикла l_c , кДж/кг	Мощность силовой установки N , кВт	Расход рабочего тела G , кг/с	Масса рабочего тела на 30 мин, кг	Масса рабочего тела на 10 мин, кг
703,746	584,75	118,995	15	0,126	226,900	75,633
703,746	549,80	153,945	15	0,097	175,387	58,462
702,746	528,43	174,314	15	0,086	154,893	51,631
702,746	508,89	193,857	15	0,077	139,278	46,426
701,746	487,98	213,768	15	0,070	126,305	42,102
701,746	475,19	226,552	15	0,066	119,178	39,726
700,746	464,98	235,763	15	0,064	114,522	38,175
699,746	456,88	242,863	15	0,062	111,174	37,058
697,746	436,87	260,880	15	0,057	103,496	34,499
694,746	421,33	273,411	15	0,055	32,917	32,917
692,746	411,29	281,456	15	0,053	31,977	31,977
684,746	386,44	298,311	15	0,050	90,510	30,170
680,746	374,03	306,720	15	0,049	88,028	29,343
682,746	366,74	316,009	15	0,047	85,441	28,480
686,746	367,74	319,007	15	0,047	84,638	28,213

ры рабочего тела на входе в детандер, аналогично, уменьшается расход рабочего тела (рис. 5). Масса криогенного рабочего тела зависит от времени работы криогенной энергетической установки.

Сравнительный анализ гибридной криогенной силовой установки и электрического двигателя для БПЛА

Для сравнения гибридной криогенной силовой установки и электрического двигателя для БПЛА были подобраны мощность электродвигателя и объем аккумуляторной батареи, соответствующие параметрам, установленным в техническом задании [1].

Параметры электродвигателя зарубежного производства REX 30 непрерывной мощностью

15 кВт соответствуют параметрам, установленным в техническом задании [1]. Емкость подобранных аккумуляторных батарей позволяет электрическому двигателю работать в соответствии со временем работы гибридной криогенной силовой установки. Масса аккумуляторных батарей составляет 21 кг. Масса криогенного рабочего тела, необходимого для работы гибридной криогенной силовой установки, составляет 50 кг, что более чем в два раза превышает массу аккумуляторных батарей электродвигателя.

С экологической точки зрения производство аккумуляторных батарей для электрических двигателей негативно сказывается на окружающей среде: производство аккумуляторных батарей требует затрат огромного количества электрической энергии. Также усиливается загрязнение окружающей среды при добыче щелочных металлов. Утилизация аккумуляторов – серьезная проблема, которая становится все более актуальной с каждым днем. По данным информационного портала «E-CARS. TECH», в России утилизируют около 5% от общего количества использованных аккумуляторных батарей, остальные же наносят огромный вред окружающей среде [21].

Получение жидкого азота возможно с использованием возобновляемых источников энергии. Существующие энергетические установки позволяют получить с помощью фотоэлектрических и ветряных модулей электрическую энергию для охлаждения азота.

Таким образом, несмотря на выигрыш в массогабаритных параметрах, экологические характеристики электродвигателей значительно уступают экологическим характеристикам гибридных крио-

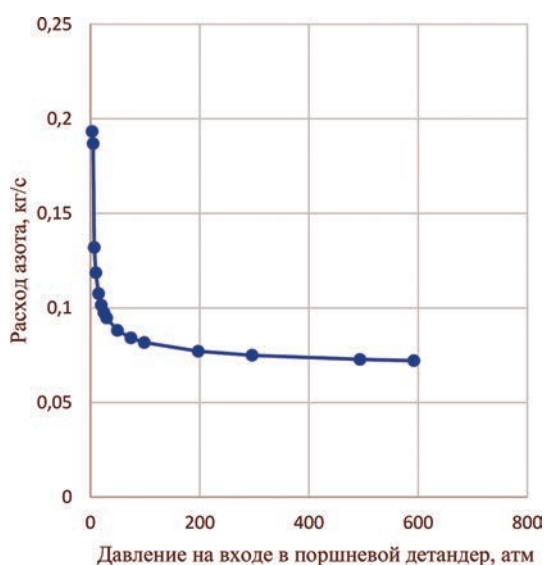


Рис. 4. Зависимость расхода рабочего тела от давления на входе в поршневой детандер

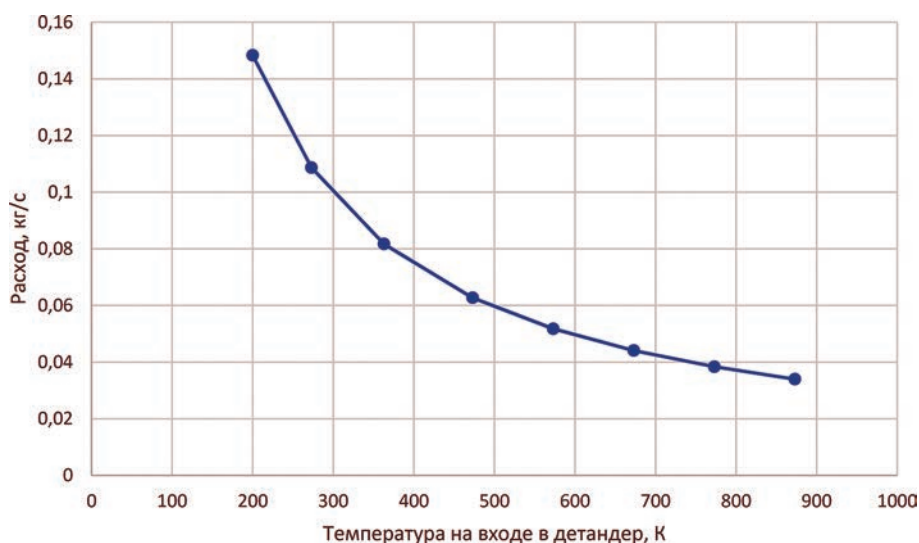


Рис. 5. Зависимость расхода рабочего тела от температуры на входе в поршневой детандер

генных силовых установок. Следует также отметить отсутствие теплового следа при отводе теплоты выхлопных газов гибридной криогенной силовой установки.

Выводы

Результаты расчетного исследования параметров гибридной криогенной силовой установки беспилотного летательного аппарата показали, что повышение давления и температуры на входе в поршневой детандер увеличивает его эффективность. За счет использования теплоты от системы жидкостного охлаждения двигателя внутреннего сгорания можно получить увеличение температуры до 363 К и снижение расхода криогенной рабочей жидкости до 0,053 кг/с, при обеспечении производимой мощности силовой установки беспилотного летательного аппарата на уровне 15 кВт.

При оценке влияния экологических характеристик силовых установок на окружающую среду сравнительный анализ гибридной криогенной силовой установки и электрического двигателя для БПЛА показал значительное превосходство криогенных технологий, с учетом отсутствия теплового следа.

Список источников

1. Угланов Д.А., Трёмкина О.В., Аденан Х. Разработка и создание беспилотных летательных аппаратов с криогенной силовой установкой // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 6. С. 255–260. DOI: 10.34759/tp-2022-14-6-255-260
2. Каримов А.Х. Цели и задачи, решаемые беспилотными комплексами нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26767>
3. Просвирина Н.В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. 2021. №10. URL: <https://qje.su/ekonomicheskaya-teoriya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-10-2021-41/>
4. Шаталов Н.В. Особенности классификации БПЛА самолетного типа // Перспективы развития информационных технологий. 2016. № 29. С. 34–39.
5. Зиненков Ю.В., Луковников А.В. Концепция многодисциплинарного формирования предварительного технического облика силовых установок беспилотных летательных аппаратов военного назначения // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 94–110. DOI: 10.34759/vst-2022-3-94-110
6. Lim Y., Al-Atabi M., Williams R.A. Liquid air as an Energy Storage: a review // Journal of Engineering Science and Technology. 2016. Vol. 11. No. 4, pp. 496-515.

7. Терещенко О.В. Исследование возможности утилизации низкопотенциального тепла при помощи установок, работающих по циклу Ренкина // Лукачевские чтения – 2017: Сборник Студенческой научно-технической конференции. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. С. 7–12.
8. Заика А.В., Терещенко О.В. Исследование возможности утилизации низкопотенциального тепла при помощи установок, работающих по циклу Брайтона // Лукачевские чтения – 2017: Сборник трудов Студенческой научно-технической конференции. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. С. 57–62.
9. Шиманов А.А., Угланов Д.А., Шиманова А.Б. и др. Выбор и расчет оптимального автономного криогенного двигателя для привода автомобильной рефрижераторной установки // Вестник Международной академии холода. 2018. № 3(68). С. 37–44.
10. Owen N. The Dearman engine – liquid air for transport cooling. - Engage, 2016.
11. Knowlen C., Williams J.E., Mattick A.T. et al. Quasi-Isothermal Expansion Engines for Liquid Nitrogen Automotive Propulsion // SAE Future Transportation Technology Conference and Exposition. 1997. DOI: 10.4271/972649
12. Трёмкина О.В., Аденан Х., Пулатов Т.Н. и др. Расчетное исследование аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата с криогенной силовой установкой // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Сборник докладов Международной научно-технической конференции (23–25 июня 2021; Самара). Самара: Изд-во Самарского университета, 2021. Т. 2. С. 207–208.
13. Довгялло А.И., Угланов Д.А., Цапкова А.Б. и др. Использование баллона с криогенной заправкой в различных областях техники // Вестник Международной академии холода. 2014. № 3(52). С. 30–34.
14. Архаров А.М., Беляков В.П., Микунин Е.И. и др. Криогенные системы: основы проектирования аппаратов и установок: Учебник. – М.: Машиностроение, 1987. – 534 с.
15. Трёмкина О.В., Угланов Д.А., Урлапкин В.В. и др. Выбор оптимальной схемы и расчетное исследование параметров криогенной силовой установки беспилотного летательного аппарата // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20. № 4. С. 59–68. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-59-68
16. Программное обеспечение CoolPack v1.50. – IPU & Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, 2012. URL: <https://www.ipu.dk/products/coolpack/>
17. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1972. – 721 с.

18. Leachman J.W., Jacobsen R.T., Lemmon E.W., Penoncello S.G. Thermodynamic properties of Cryogenic Fluids // International cryogenic monograph series. 1997, 213 p. DOI: 10.1007/978-3-319-57835-4
19. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 409 с.
20. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел В.С. Теплопередача: Учебник. – Изд. 3-е., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
21. Утилизация батарей электромобилей: проблемы и перспективы в мире. 2021. URL: <https://e-cars.tech/zakony-pro-elektromobili/utilizatsiya-batarey-elektromobiley-problemy-i-perspektivy-v-mire/>

References

1. Uglanov D.A., Tremkina O.V., Adenan Kh. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 255-260.
2. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26767>
3. Prosvirina N.V. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*, 2021, no. 10. URL: <https://qje.su/ekonomicheskaya-teoriya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-10-2021-41/>
4. Shatalov N.V. *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologii*, 2016, no. 29, pp. 34-39.
5. Zinenkov Yu.V., Lukovnikov A.V. The concept of pluridisciplinary forming of precursory technical appearance of military purpose unmanned aerial vehicles. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 94-110. DOI: 10.34759/vst-2022-3-94-110
6. Lim Y., Al-Atabi M., Williams R.A. Liquid air as an Energy Storage: a review. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 496-515
7. Tereshchenko O.V. *Materialy Studencheskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Lukachevskie chteniya – 2017"*, Samara, Samarskii universitet, 2017, pp. 7-12.
8. Zaika A.V., Tereshchenko O.V. *Materialy Studencheskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Lukachevskie chteniya – 2017"*, Samara, Samarskii universitet, 2017, pp. 57-62.
9. Shimanov A.A., Uglanov D.A., Shimanova A.B. et al. *Vestnik mezhdunarodnoi akademii kholoda*, 2018, no. 3(68), pp. 37-44.
10. Owen N. *The Dearman engine – liquid air for transport cooling*. Engage, 2016.
11. Knowlen C., Williams J.E., Mattick A.T. et al. Quasi-Isothermal Expansion Engines for Liquid Nitrogen Automotive Propulsion. *SAE Future Transportation Technology Conference and Exposition*. 1997. DOI: 10.4271/972649
12. Tremkina O.V., Adenan Kh., Pulatov T.N. et al. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya" (23–25 June 2021; Samara)*. Samara, Samarskii universitet, 2021, vol. 2, pp. 207-208.
13. Dovgyallo A.I., Uglanov D.A., Tsapkova A.B. et al. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*, 2014, no. 3(52), pp. 30-34.
14. Arkharov A.M., Belyakov V.P., Mikulin E.I. et al. *Kriogennye sistemy: osnovy proektirovaniya apparatov i ustanovok* (Cryogenic systems: fundamentals of designing apparatuses and installations), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 534 p.
15. Tremkina O.V., Uglanov D.A., Uralpkin V.V. et al. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2021, vol. 20, no. 4, pp. 59-68. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-59-68
16. *Software CoolPack v1.50. – IPU & Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark*, 2012. URL: <https://www.ipu.dk/products/coolpack/>
17. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gasov i zhidkostei* (Handbook of Thermophysical properties of gases and liquids), 2nd ed. Moscow, Nauka, 1972, 720 p.
18. Leachman J.W., Jacobsen R.T., Lemmon E.W., Penoncello S.G. Thermodynamic properties of Cryogenic Fluids. *International cryogenic monograph series*, 1997, 213 p. DOI: 10.1007/978-3-319-57835-4
19. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheindlin A.E. *Tekhnicheskaya termodinamika* (Technical thermodynamics), Moscow, Energoatomizdat, 1983, 409 p.
20. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel V.S. *Teploperedacha* (Heat transfer), 3rd ed., Moscow, Energiya, 1975, 488 p.
21. *Utilizatsiya batarei elektromobiley: problemy i perspektivy v mire*, 2021. URL: <https://e-cars.tech/zakony-pro-elektromobili/utilizatsiya-batarey-elektromobiley-problemy-i-perspektivy-v-mire/>

Статья поступила в редакцию 21.12.2022; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 28.08.2023.

The article was submitted on 21.12.2022; approved after reviewing on 28.08.2023; accepted for publication on 28.08.2023.