

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ И РАСЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИОГЕННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

© 2021

- О. В. Тремкина** аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [t.olga.vit@bk.ru](mailto:t.olga.vit@bk.ru)
- Д. А. Угланов** кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [dmitry.uglanov@mail.ru](mailto:dmitry.uglanov@mail.ru)
- В. В. Урлапкин** аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [viktor.urlapkin@gmail.com](mailto:viktor.urlapkin@gmail.com)
- С. С. Корнеев** аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [skorneev1993@mail.ru](mailto:skorneev1993@mail.ru)
- Ю. В. Комисар** аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [komisar.yuv@ssau.ru](mailto:komisar.yuv@ssau.ru)

Проведено расчётное исследование параметров силовой установки беспилотного летательного аппарата, работающей на криогенном рабочем теле. В качестве криогенного рабочего тела выбран жидкий азот. Представлены две возможные схемы криогенной силовой установки беспилотного летательного аппарата. Первая – схема криогенной силовой установки беспилотного летательного аппарата с воздушным подогревом, в которой в качестве источника теплоты выступает воздух при температуре окружающей среды на высоте 2000 м. Вторая – схема с подогревом рабочего тела за счёт солнечной энергии, в которой в качестве источника теплоты выступает солнечная энергия. Проведено расчётное исследование криогенной силовой установки, работающей по открытому циклу Ренкина, а также расчётные исследования возможных схем криогенной силовой установки, в результате которых сделан сравнительный анализ полученных данных и выбрана подходящая схема криогенной силовой установки для беспилотного летательного аппарата с необходимыми параметрами.

*Криогенная силовая установка; жидкий азот; беспилотный летательный аппарат*

---

**Цитирование:** Тремкина О.В., Угланов Д.А., Урлапкин В.В., Корнеев С.С., Комисар Ю.В. Выбор оптимальной схемы и расчётное 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

### Введение

Развитие современного мира идёт в настоящее время с постоянным повышением добычи, переработки и потребления углеводородных топлив и веществ. Но углеводородные топлива и вещества являются невозобновляемым ископаемым, запасов которого, по результатам экспертных оценок, хватит примерно на 50-100 лет [1]. К тому же выбросы продуктов сгорания углеводородных топлив (оксиды азота, углерода, серы) загрязняют атмосферу, нарушая естественный ход её процессов. Одним из возможных путей решения является разработка альтернативных транспортных технологий, кото-

рые не зависят от сжигания ископаемого топлива. Использование криогенных рабочих веществ стало одним из потенциальных решений экологической проблемы.

В настоящее время широкое применение находят беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в различных областях жизнедеятельности человека, а именно при выполнении разведывательных задач, патрулирования и охраны, слежении за отдельными районами, контроле качества дорожных покрытий и экологической безопасности.

Вместе с тем существует проблема повышения экологических характеристик БПЛА. Решение данной проблемы может быть достигнуто путём использования силовой установки, работающей на криогенном рабочем теле. Важно отметить, что при этом тепловой след от БПЛА будет отсутствовать, так как отсутствует процесс горения в криогенной силовой установке.

### Выбор схемы криогенной силовой установки

На рис. 1 представлена схема криогенной силовой установки беспилотного летательного аппарата, работающей на жидком азоте. В качестве источника теплоты выступает воздух при температуре окружающей среды на высоте 2000 м.

На рис. 2 представлена схема криогенной силовой установки БПЛА, где в качестве источника теплоты используется солнечная энергия.

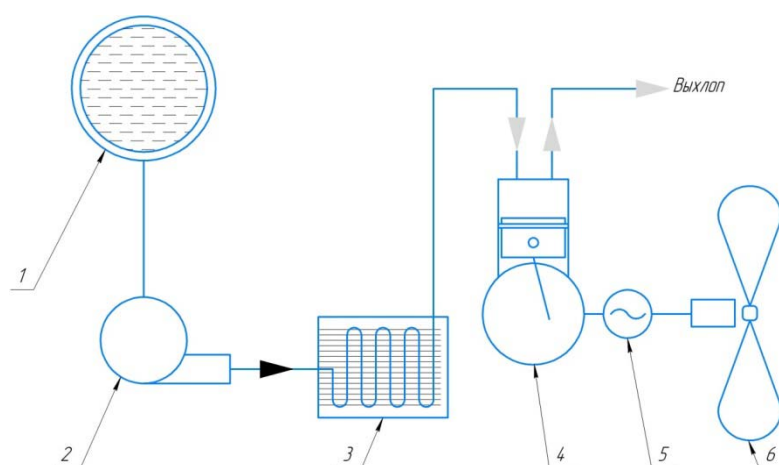


Рис. 1. Схема криогенной силовой установки БПЛА с воздушным подогревом:  
1 – ёмкость с криогенным рабочим телом; 2 – криогенный насос; 3 – теплообменник-испаритель;  
4 – поршневой детандер; 5 – электрогенератор; 6 – винт БПЛА

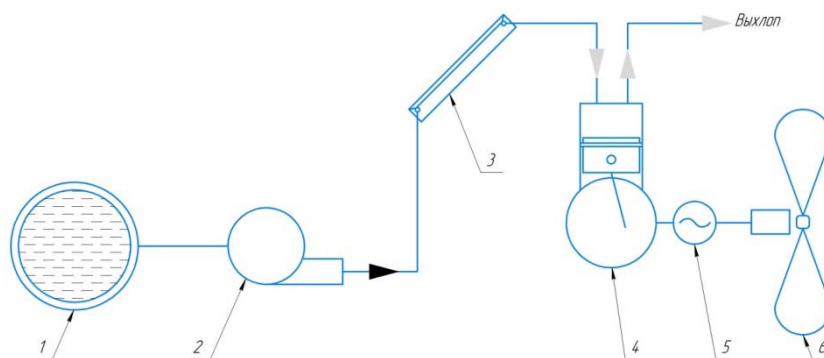


Рис. 2. Схема криогенной силовой установки БПЛА с подогревом рабочего тела за счёт солнечной энергии:  
1 – ёмкость с криогенным рабочим телом; 2 – криогенный насос; 3 – система для подвода солнечной энергии;  
4 – поршневой детандер; 5 – электрогенератор; 6 – винт БПЛА

Принцип работы представленной силовой установки заключается в следующем: криогенное рабочее тело (жидкий азот) из ёмкости 1 при помощи криогенного насоса 2 нагревается и газифицируется с помощью подведения тепловой энергии в системе 3. Газообразный азот поступает в поршневой детандер 4, где за счёт теплопритоков через стенки цилиндра и поршня происходит политропный процесс расширения. Полученная работа идёт на привод электрогенератора 5, приводящего в движение винт 6 беспилотного летательного аппарата.

### Расчётное исследование параметров криогенной силовой установки БПЛА с воздушным подогревом

Предлагаемая криогенная силовая установка работает по открытому циклу Ренкина (рис. 3). Открытая схема энергетической установки, использующей низкопотенциальную теплоту криопродукта, является достаточно простой и экономичной [2; 3]. В качестве рабочего тела можно использовать как азот, так и воздух, сжиженный природный газ и т.д.

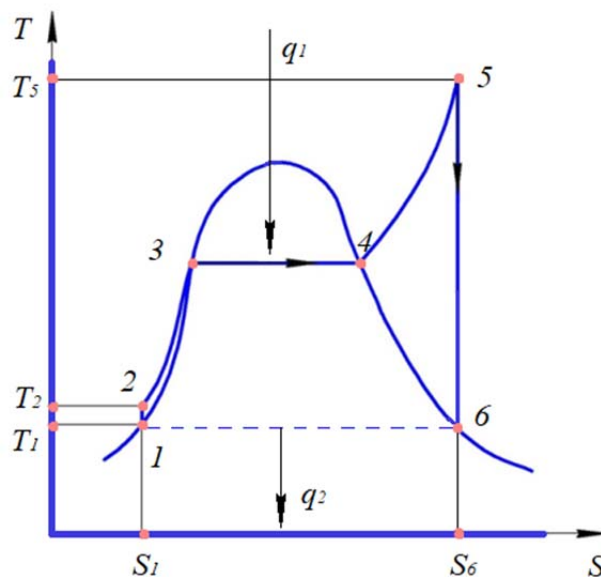


Рис. 3. Изображение процессов цикла Ренкина на T-S диаграмме

С помощью T-S диаграммы (температурно-энтропийной диаграммы) азота и справочных данных [4; 5] были вычислены термодинамические параметры точек (табл. 1).

Количество подведённого тепла:

$$q_1 = i_5 - i_6.$$

Количество отведённого тепла:

$$q_2 = i_6 - i_1,$$

где  $i_i$  – энтальпия в  $i$ -й точке.

Удельная работа цикла:

$$l_u = RT_5 \ln \left( \frac{p_5}{p_6} \right),$$

где  $T_i$  – температура в  $i$ -й точке;  $p_i$  – давление в  $i$ -й точке.

Расход криогенного рабочего тела:

$$G = \frac{N}{l_u},$$

где  $N$  – мощность силовой установки.

Теплообменник-испаритель способен нагреть рабочее тело до температуры окружающей среды. Примем, что высота полёта беспилотного летательного аппарата 2000 м, следовательно температура окружающей среды 275 К.

Расчётное исследование аэродинамических характеристик БПЛА показало, что при крейсерском полёте потребная мощность составит 7,6 кВт [6].

Таблица 1. Результаты расчёта криогенной силовой установки БПЛА с воздушным подогревом

$p_1, p_6,$ кПа	$p_2, p_3,$ $p_4, p_5,$ МПа	$T_1,$ $T_6,$ К	$T_4,$ $T_3,$ К	$T_5,$ К	$i_5,$ кДж/ кг	$i_6,$ кДж/ кг	$i_1,$ кДж/ кг	$q_1,$ кДж/ кг	$q_2,$ кДж/ кг	КПД	$l_u,$ кДж/ кг	$N,$ кВт	$G,$ кг/с
66,96	1	74	77	275	282,8	135,9	-121,4	404,2	257,3	0,36	146,9	7,6	0,052
66,96	3	74	88	275	277,8	93,8	-121,4	399,2	215,2	0,46	184,0	7,6	0,041
66,96	5	74	94	275	272,9	75,3	-121,4	394,3	196,7	0,50	197,6	7,6	0,038
66,96	10	74	104	275	261,9	48,6	-121,4	383,3	170,0	0,56	213,2	7,6	0,036
66,96	15	74	110	275	252,9	31,9	-121,4	374,3	153,3	0,59	221,0	7,6	0,034
66,96	20	74	116	275	246,2	20,2	-121,4	367,6	141,6	0,61	226,0	7,6	0,034
66,96	30	74	124	275	238,7	6,3	-121,4	360,1	127,7	0,65	232,4	7,6	0,033

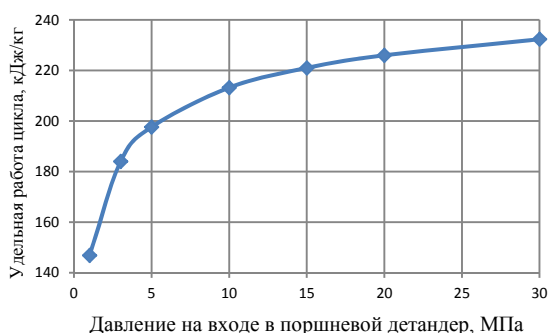


Рис. 4. Зависимость удельной работы цикла от температуры рабочего тела на входе в поршневой детандер

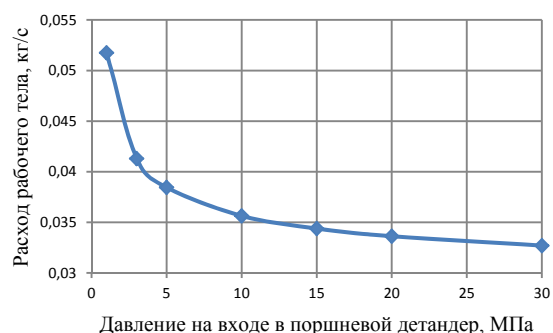


Рис. 5. Зависимость расхода рабочего тела от температуры на входе в поршневой детандер

Полученные зависимости (рис. 4, 5) показывают, что при увеличении давления на входе в поршневой детандер от 1 до 30 МПа работа цикла на единицу массы рабочего тела увеличивается в 1,5 раза, а расход жидкого азота уменьшается в 1,5 раза.

### Расчётное исследование параметров криогенной силовой установки БПЛА с подогревом рабочего тела за счёт солнечной энергии

Предполагается, что температура рабочего тела в нагревателе 3 (рис. 2) достигает  $T_5 = 300 \dots 800$  К. Расчёт криогенной силовой установки БПЛА с подогревом рабочего тела за счёт солнечной энергии (табл. 2) проводится аналогично расчёту криогенной силовой установки БПЛА с воздушным подогревом.

Таблица 2. Результаты расчёта криогенной силовой установки БПЛА с подогревом рабочего тела за счёт солнечной энергии

$p_1, p_6,$ кПа	$p_2, p_3,$ $p_4, p_5,$ МПа	$T_1,$ $T_6,$ К	$T_4,$ $T_3,$ К	$T_5,$ К	$i_5,$ кДж/ кг	$i_6,$ кДж/ кг	$i_1,$ кДж/ кг	$q_1,$ кДж/ кг	$q_2,$ кДж/ кг	КПД	$l_u,$ кДж/ кг	$N,$ кВт	$G,$ кг/с
67	3	74	88	300	305,1	104,4	-121,4	426,5	225,8	0,47	200,7	7,6	0,038
67	3	74	88	400	412,5	144,9	-121,4	533,9	266,3	0,50	267,6	7,6	0,028
67	3	74	88	500	519,3	184,8	-121,4	640,7	306,2	0,52	334,5	7,6	0,023
67	3	74	88	600	627	225,6	-121,4	748,4	347,0	0,54	401,4	7,6	0,019
67	3	74	88	700	736	268,1	-121,4	857,8	389,5	0,55	468,3	7,6	0,016
67	3	74	88	800	848	312,8	-121,4	969,4	434,2	0,55	535,2	7,6	0,014

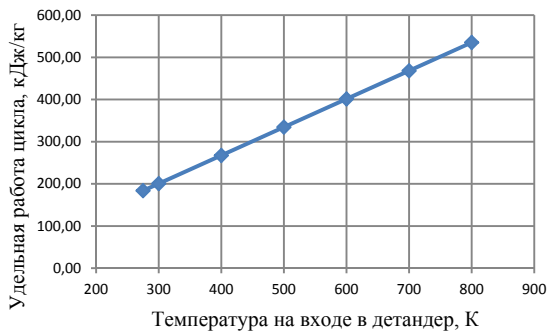


Рис. 6. Зависимость удельной работы цикла от температуры рабочего тела на входе в поршневой детандер

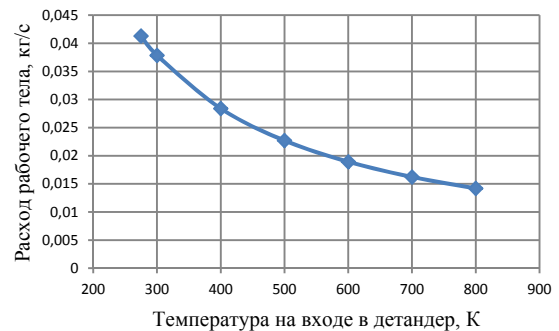


Рис. 7. Зависимость расхода рабочего тела от температуры на входе в поршневой детандер

Удельная работа насоса:

$$l_n = \frac{\Delta p}{\rho_{LN_2} \eta_n},$$

где  $\Delta p$  – перепад давления в насосе;  $\rho_{LN_2}$  – плотность жидкого азота;  $\eta_n$  – КПД насоса.

Полезная работа цикла:

$$l_n = l_u - l_n.$$

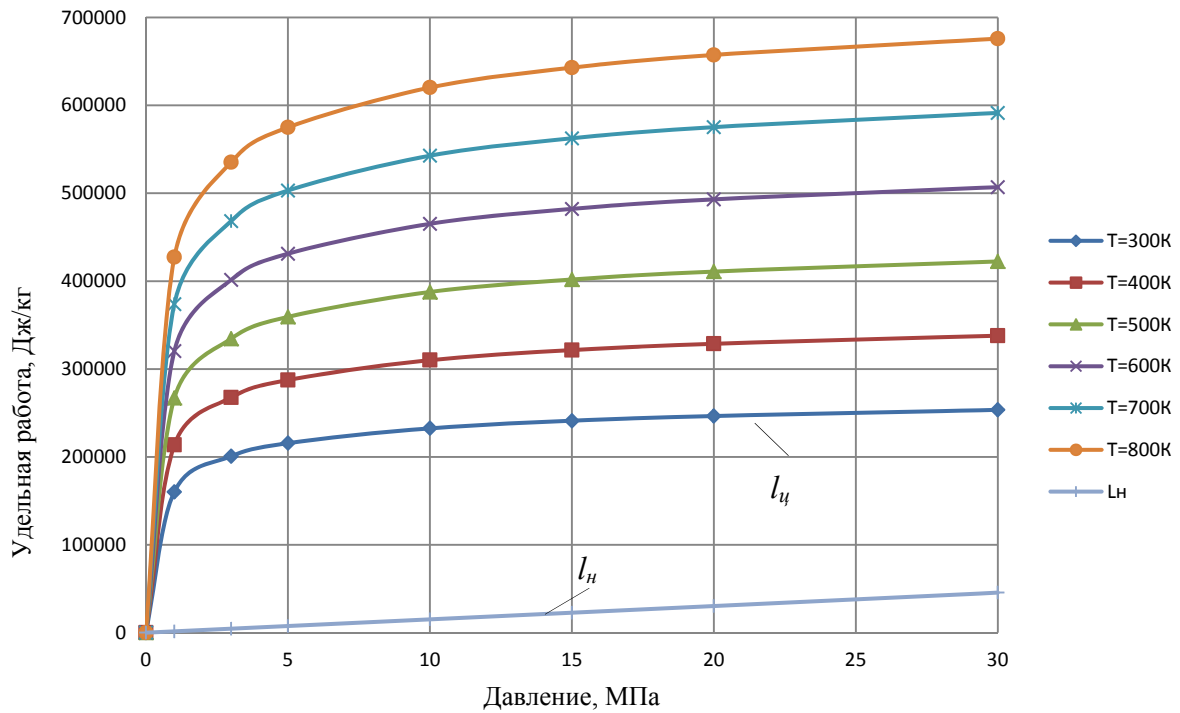


Рис. 8. Зависимость удельной работы от давления на входе в поршневой детандер при различных температурах рабочего тела

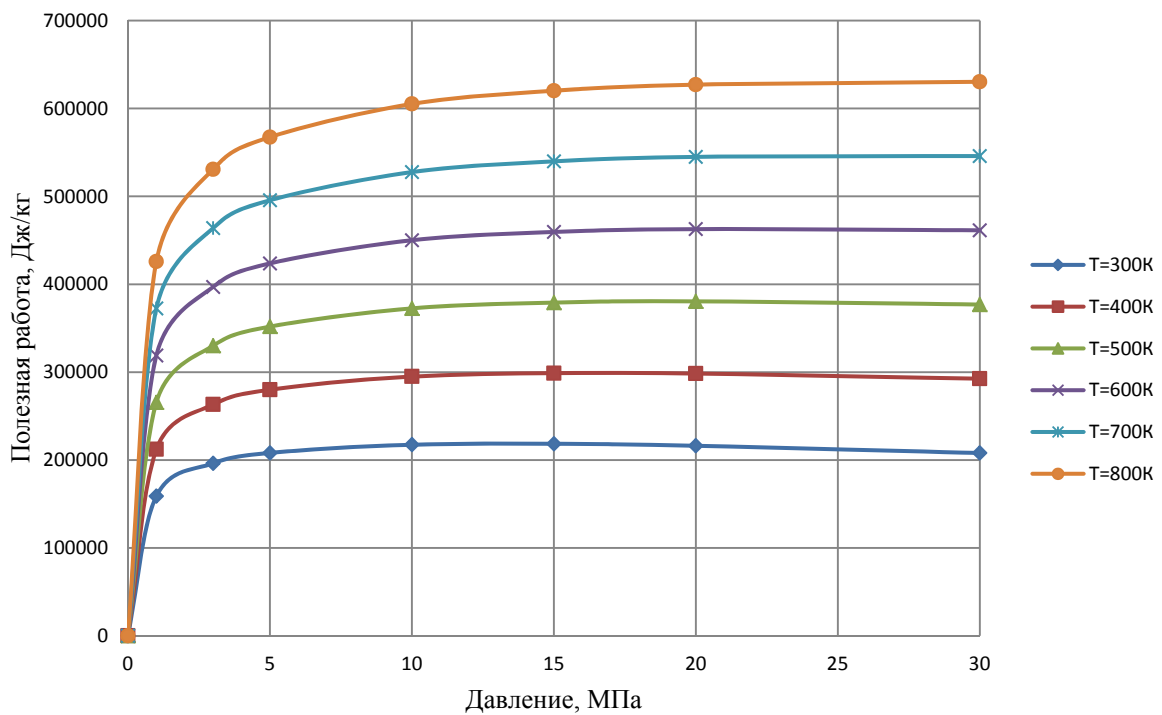


Рис. 9. Зависимость полезной работы цикла и удельной работы насоса от давления на входе в поршневой детандер

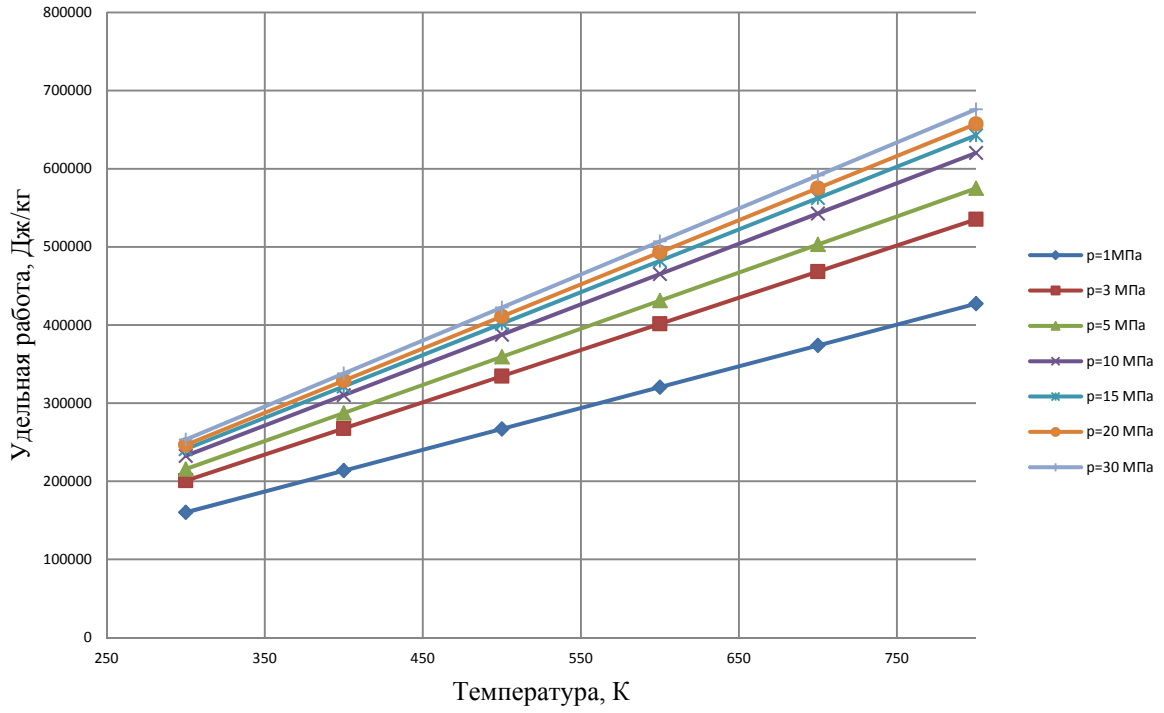


Рис. 10. Зависимость удельной работы цикла от температуры на входе в поршневой детандер

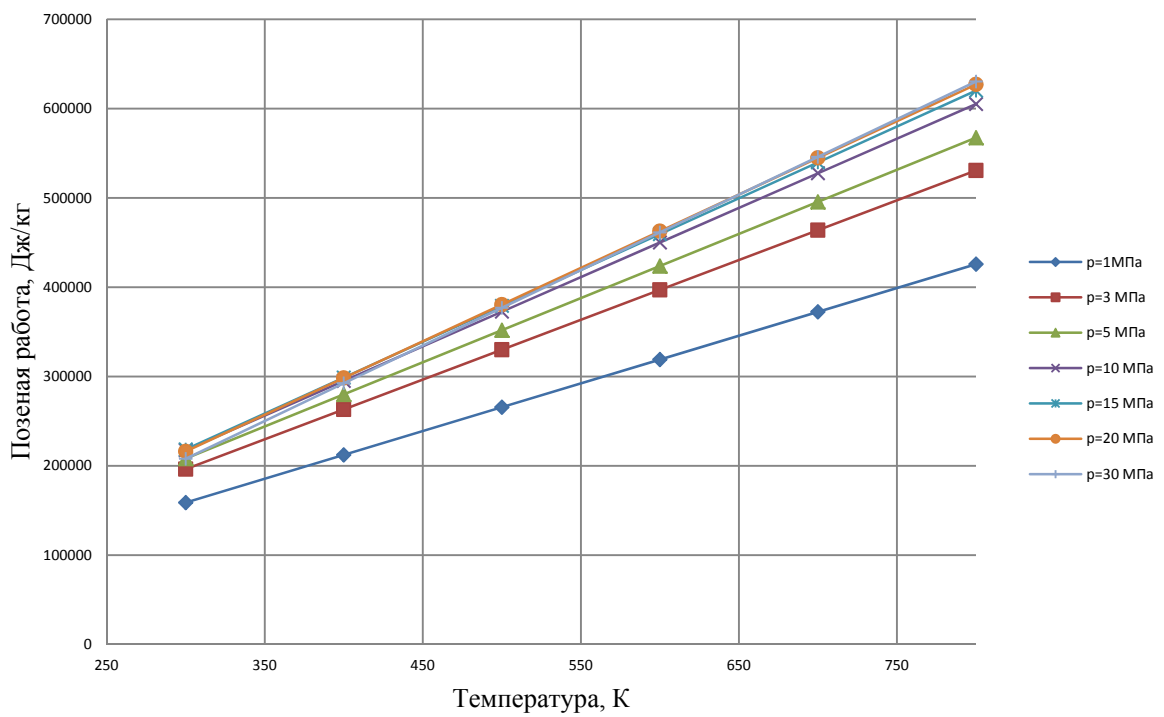


Рис. 11. Зависимость полезной работы цикла от температуры на входе в поршневой детандер

Анализ полученных данных расчётных исследований (рис. 6 – 11) позволяет сделать вывод, что с увеличением температуры на входе в поршневой детандер от 300 до 800 К энергетические характеристики криогенной силовой установки повышаются, при этом удельная работа цикла увеличивается в 2,7 раза, полезная работа увеличивается в 3 раза, а расход криогенного рабочего тела уменьшается в 2,7 раза.

### **Заключение**

Результаты расчётного исследования показали, что для увеличения эффективности криогенной силовой установки необходимо увеличивать давление и температуру на входе в поршневой детандер. Увеличение температуры до 800 К, что можно получить за счёт использования солнечной энергии в качестве источника теплоты, позволит увеличить значение КПД до 55%, а расход криогенного рабочего тела снизить до 0,014 кг/с при обеспечении производимой мощности силовой установки беспилотного летательного аппарата на уровне 7,6 кВт.

Результаты работы получены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Межкафедральный учебно-производственный научный центр САМ-технологий» при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 0777-2020-0019).

### **Библиографический список**

1. Андреев В.А., Борисов В.Б., Климов В.Т., Малышев В.В., Орлов В.Н. Внимание: газы. Криогенное топливо для авиации. М.: Московский рабочий, 2001. 244 с.
2. Карнаух В.В., Крылова А.Д., Лопатин А.Л., Мироненкова А.С., Тремкина О.В., Угланов Д.А. Расчёт и подбор оптимальной схемы гибридной криогенной энергетической установки, работающей на жидком водороде // Вестник Международной академии холода. 2020. № 2. С. 9-18. DOI 10.17586/1606-4313-2020-19-2-9-18
3. Тремкина О.В., Угланов Д.А., Паньшин Р.А., Бадьков Р.Р. Расчётное исследование энергетических характеристик низкотемпературной энергетической установки, работающей на различных криогенных топливах // Насосы. Турбины. Системы. 2020. № 3 (36). С. 40-49.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
5. Jacobsen R.T., Penoncello S.G., Lemmon E. Thermodynamic properties of cryogenic fluids. Springer, 1997. 312 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-1798-0\_5
6. Тремкина О.В., Аднан Х., Пулатов Т.Н., Паньшин Р.А. Расчётное исследование аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата с криогенной силовой установкой // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (23-25 июня 2021 г., Самара). Т. 2. Самара: Издательство Самарского университета, 2021. С. 206-207.



## SELECTION OF THE OPTIMUM CONFIGURATION AND CALCULATION STUDIES OF THE PARAMETERS OF A CRYOGENIC PROPULSION SYSTEM FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

© 2021

- O. V. Tremkina** Postgraduate Student of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [t.olga.vit@bk.ru](mailto:t.olga.vit@bk.ru)
- D. A. Uglanov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [dmitry.uglanov@mail.ru](mailto:dmitry.uglanov@mail.ru)
- V. V. Urlapkin** Postgraduate Student of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [viktor.urlapkin@gmail.com](mailto:viktor.urlapkin@gmail.com)
- S. S. Korneev** Postgraduate Student of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [skorneev1993@mail.ru](mailto:skorneev1993@mail.ru)
- Yu. V. Komisar** Postgraduate Student of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [komisar.yuv@ssau.ru](mailto:komisar.yuv@ssau.ru)

A computational study of the parameters of a propulsion system of an unmanned aerial vehicle operating on a cryogenic working medium has been carried out. Liquid nitrogen was selected as the cryogenic working fluid. Two alternative configurations of a cryogenic propulsion system for an unmanned aerial vehicle are presented. The first one is a scheme of an air-heated cryogenic propulsion system of an unmanned aerial vehicle in which air acts as the heat source at an ambient temperature at an altitude of 2000 m. The second one is a scheme wherein the working fluid is heated due to solar energy, in this case solar energy acts as the source of heat. A computational study of a cryogenic propulsion system operating on the open Rankine cycle was carried out, as well as computational studies of possible cryogenic propulsion system configurations. As a result of the studies a comparative analysis of the data obtained was made and a suitable cryogenic propulsion system configuration for an unmanned aerial vehicle with the required parameters was selected.

*Cryogenic propulsion system; liquid nitrogen; unmanned aerial vehicle*

---

**Citation:** Tremkina O.V., Uglanov D.A., Urlapkin V.V., Korneev S.S., Komisar Yu.V. Selection of the optimum configuration and calculation studies of the parameters of a cryogenic propulsion system for an unmanned aerial vehicle. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 4. P. 59-68. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-59-68

### References

1. Andreev V.A., Borisov V.B., Klimov V.T., Malyshev V.V., Orlov V.N. *Vnimanie: gazy. Kriogennoe toplivo dlya aviatsii* [Attention: gases. Cryogenic fuel for aviation]. Moscow: Moskovskiy Rabochiy Publ., 2001. 244 p.
2. Karnaukh V.V., Krylova A.D., Lopatin A.L., Mironenkova A.S., Tremkina O.V., Uglanov D.A. Calculation and selection of the optimal scheme of a hybrid cryogenic power plant running on liquid hydrogen. *Journal International Academy of Refrigeration*. 2020. No. 2. P. 9-18. (In Russ.). DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-9-18
3. Tremkina O.V., Uglanov D.A., Panshin R.A., Badykov R.R. Calculated study of energy characteristics of a low temperature power plant functioning with different cryogenic fuels. *Pumps. Turbines. Systems*. 2020. No. 3 (36). P. 40-49. (In Russ.)

4. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook on the thermophysical properties of fluids]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 720 p.

5. Jacobsen R.T., Penoncello S.G., Lemmon E. Thermodynamic properties of cryogenic fluids. Springer, 1997. 312 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-1798-0\_5

6. Tremkina O.V., Adenane H., Pulatov T.N., Panshin R.A. Calculated study of aerodynamic characteristics of unmanned aircraft with a cryogenic power plant. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy i Perspektivy Razvitiya Dvigatelistroeniya» (June, 23-25, 2021, Samara)*. V. 2. Samara: Samara University Publ., 2021. P. 206-207. (In Russ.)