

УДК 621.48

Расчет и подбор оптимальной схемы гибридной криогенной энергетической установки, работающей на жидком водороде

Канд. техн. наук В. В. КАРНАУХ¹

¹karnaukh.vita0629@gmail.com

Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского

А. Д. КРЫЛОВА², А. Л. ЛОПАТИН, А. С. МИРОНЕНКОВА³,

О. В. ТРЕМКИНА⁴, канд. техн. наук Д. А. УГЛАНОВ⁵

²anastaia2011@mail.ru, ³anna.mironenkova.97@mail.ru, ⁴t.olga.vit@bk.ru, ⁵dmitry.uglanov@mail.ru

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(Самарский университет)

Проведена оценка параметров гибридной криогенной энергетической установки, использующей в качестве топлива жидкий водород, а также выполнен расчет характеристик основного контура гибридной энергетической установки на основе поршневого детандера, роторно-лопастного детандера и турбодетандера. Осуществлен расчет параметров оптимальной схемы вспомогательного контура предлагаемой энергетической установки. Представлены результаты расчета коэффициента возврата энергии и сравнение энергетических параметров проектируемых систем. Наиболее эффективными в применении, с точки зрения безопасности и экономичности, признаны энергетические установки вспомогательного контура, работающие по циклу Ренкина на неоне.

Ключевые слова: гибридная энергетическая установка, поршневой детандер, роторно-лопастной детандер, турбодетандер, коэффициент возврата энергии.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 16.01.2020, принята к печати 21.03.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-9-18

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Карнаух В. В., Крылова А. Д., Лопатин А. Л., МIRONЕНКОВА А. С., ТРЕМКИНА О. В., Угланов Д. А. Расчет и подбор оптимальной схемы гибридной криогенной энергетической установки, работающей на жидком водороде // Вестник Международной академии холода. 2020. № 2. С. 9–18.

Calculation and selection of the optimal scheme of a hybrid cryogenic power plant running on liquid hydrogen

Ph. D. V. V. KARNAUKH¹

¹karnaukh.vita0629@gmail.com

Donetsk National University of Economics and Trade named after M. Tugan-Baranovsky

A. D. KRYLOVA², A. L. LOPATIN, A. S. MIRONENKOVA³, O. V. TREMKINA⁴, Ph. D. D. A. UGLANOV⁵

²anastaia2011@mail.ru, ³anna.mironenkova.97@mail.ru, ⁴t.olga.vit@bk.ru, ⁵dmitry.uglanov@mail.ru

Samara National Research University (Samara University)

In this work, the parameters of a hybrid cryogenic power plant using liquid hydrogen as a fuel are evaluated, and the characteristics of the main circuit of a hybrid power plant based on a piston expander, a rotor-blade expander, and a turbo expander are calculated. The parameters of the optimal scheme of the auxiliary circuit of the proposed power plant are calculated. The article presents the results of calculating the energy return coefficient and comparing the energy parameters of the designed systems. Energy plant of Rankine cycle auxiliary circuit using neon is shown to be the most effective in terms of their safety and cost-efficiency.

Keywords: hybrid power plant, piston expander, rotor-blade expander, turbo expander, energy return coefficient.

Article info:

Received 16/01/2020, accepted 21/03/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-9-18

Article in Russian

For citation:

Karnaukh V. V., Krylova A. D., Lopatin A. L., Mironenkova A. S., Tremkina O. V., Uglov D. A. Calculation and selection of the optimal scheme of a hybrid cryogenic power plant running on liquid hydrogen. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 2. p. 9-18.

Введение

В настоящее время существует серьезная проблема загрязнения атмосферы выхлопами транспортных средств. В данной статье предлагается энергетическая установка, которая может обеспечить достаточно высокую энергетическую эффективность силовой установки и позволит решить экологические проблемы города. Использование энергетической установки на альтернативных видах топлива позволит существенно сократить выбросы вредных веществ в окружающую среду.

Для решения этой проблемы применяем гибридную криогенную энергетическую установку, состоящую из двух контуров: основного и вспомогательного. Топливом в основном контуре является водород, во вспомогательном — криогенное топливо, наиболее эффективное для системы. Предлагается реализовать три возможные схемы основного контура энергетической установки, а именно в качестве тепловой машины основного контура возможно использовать:

- поршневой детандер;
- турбодетандер;
- роторно-лопастной детандер.

Определение исходных данных

В разрабатываемой гибридной энергетической установке предлагается использовать водород при криогенных температурах. Открытая схема энергетической установки, использующей низкопотенциальную теплоту криопродукта [1], является наиболее простой и экономичной.

На рис 1. показаны процессы на T - s диаграмме цикла Ренкина. Цикл Ренкина состоит из нескольких последовательных процессов: 1–2 — адиабатное сжатие в насосе, 2–3 — нагрев до кипения, 3–4 — процесс кипения, 4–5 — перегрев пара, 5–5' — адиабатное расширение, 5–7 — дополнительный перегрев пара.

Достоинством представленной схемы реализации цикла Ренкина является малый расход рабочего тела и возможность реализации цикла, при высоких степенях повышения давления π_k .

В рассматриваемой установке параметры теплоносителя в точке 1: $p_1 = 100000$ Па; $T_1 = 20$ К.

Так как температура окружающей среды в зависимости от времени года и суток в среднем изменяется в пределах от 250 до 300 К, то рассматриваются циклы с учетом пяти вариантов значений температуры в точке 5, при этом $\Delta T = 10^\circ$.

Рассмотрим 4 варианта цикла Ренкина со следующими параметрами:

1. $p_{2,3,4,5} = 1$ МПа — давление в точках 2, 3, 4, 5;
 $T_{3,4} = 32$ К — температура в точках 3, 4.

2. $p_{2,3,4,5} = 0,8$ МПа — давление в точках 2, 3, 4, 5;
 $T_{3,4} = 30$ К — температура в точках 3, 4.
3. $p_{2,3,4,5} = 0,6$ МПа — давление в точках 2, 3, 4, 5;
 $T_{3,4} = 28$ К — температура в точках 3, 4.
4. $p_{2,3,4,5} = 0,4$ МПа — давление в точках 2, 3, 4, 5;
 $T_{3,4} = 27$ К — температура в точках 3, 4.

Основываясь на расчетах четырех вариантов цикла Ренкина, выбран наиболее подходящий вариант, соответствующий заявленной мощности $N = 265$ кВт, $G_{H_2} = 0,136$ кг/с.

Расчет параметров основного контура гибридной энергетической установки на основе поршневого детандера

Схема энергетической установки на основе поршневого детандера представлена на рис. 2.

Криогенная жидкость (жидкий водород) из емкости 1, при помощи насоса 2, поступает в теплообменник 3. Далее газообразный поступает в поршневой детандер 7, где за счет теплопритоков через стенки цилиндра и поршня происходит политропный процесс расширения ($1 \leq n \leq k$).

В энергетическую установку вспомогательного контура также входит: теплообменник-испаритель 5, насос 6, турбина 4 и теплообменник криогенного рабочего тела 3. Энергия, полученная в процессе сгорания, передается на электрогенератор 13 и аккумулируется в батарее 12. Энергия с турбины 6 вспомогательного контура и детандера

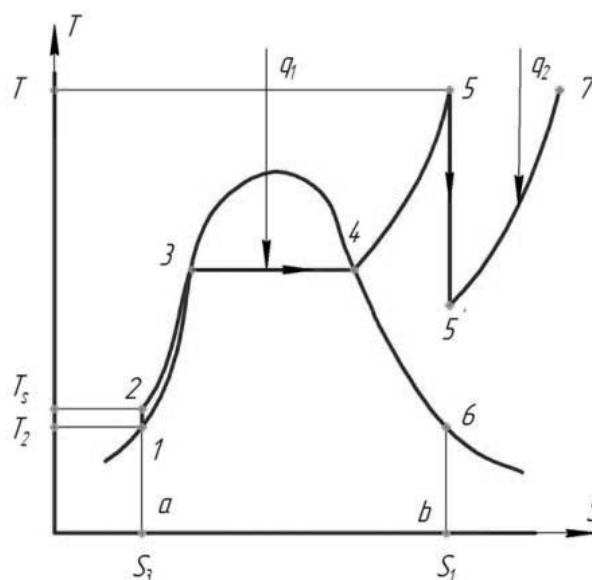


Рис. 1. Изображение процессов цикла Ренкина на T - s диаграмме
Fig. 1. Rankine cycle processes on T - s diagram

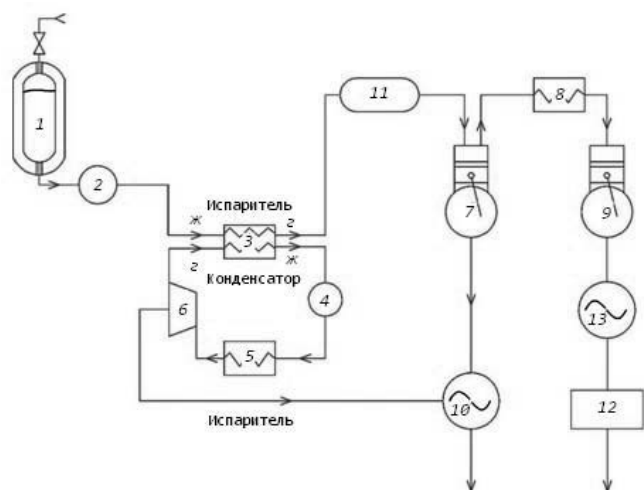


Рис. 2. Схема криогенной силовой установки с приводом от поршневого детандера: 1 — емкость с криогенной заправкой; 2 — криогенный насос; 3 — теплообменник криогенного рабочего тела; 4 — насос; 5 — испаритель хладагента; 6 — турбина; 7 — поршневой детандер; 8 — трубчатоленточный теплообменник; 9 — двигатель; 10, 13 — электрогенератор; 11 — ресивер; 12 — аккумуляторная батарея

Fig. 2. Cryogenic power plant powered by piston expander: 1 — cryogenic tank; 2 — cryogenic pump; 3 — heat exchanger of refrigerant; 4 — pump; 5 — refrigerant evaporator; 6 — turbine; 7 — piston expander; 8 — ribbon-tubular heat exchanger; 9 — engine; 10, 13 — electro generator; 11 — receiver; 12 — accumulator

дера 7 основного контура передается на электрогенератор 10 и идет на привод.

Исходные данные для расчета следующие:
 $G_{\text{LH2}}=0,136 \text{ кг/с}$; $p_{\text{вх}}=0,6 \text{ МПа}$; $T_{\text{вх}}=250 \text{ К}$.

Поршневой детандер представляет собой цилиндр с диаметром $d=220 \text{ мм}$, давление выходящего газа — $0,1 \text{ МПа}$ и температура 248 К .

Проведены расчеты и определены геометрические характеристики детандера в соответствии с методикой [10].

Алгоритм расчета представлен на рис. 3.

Расчет параметров основного контура гибридной энергетической установки на основе турбодетандера

Схема энергетической установки на основе турбодетандера представлена на рис. 4. Принцип работы энергетической установки аналогичен принципу работы энергоустановки на основе поршневого детандера.

Алгоритм расчета представлен на рис. 5.

Расчет параметров основного контура гибридной энергетической установки на основе роторно-лопастного детандера

Схема энергетической установки на основе роторно-лопастного детандера представлена на рис. 6.

Основой для расчета рабочих параметров и характеристик является методика расчета роторно-лопастного детандера [13].

Алгоритм расчета представлен на рис 7.

Выбор оптимальных параметров вспомогательной энергетической установки

В качестве энергетической установки вспомогательного контура предлагается использовать тепловую машину, работающую по циклу Ренкина или по циклу Брайтона.

Энергетическая установка вспомогательного контура (рис 8) может работать на различных криопродуктах: водород, неон, параводород, фтор, гелий.

На основании известных методик расчета [11], [12] и справочных данных была проведена оценка перспективности такого решения для разных рабочих веществ, подходящих для работы при температурах в теплообменнике-испарителе $20\text{--}50 \text{ К}$ в жидком агрегатном состоянии. Предполагается довести температуру рабочего тела в цикле Брайтона до температуры окружающей среды ($T_3=290 \text{ К}$).

Оценка количества получаемой дополнительной электрической энергии приведена в табл. 1.

Общая мощность, необходимая для реализации движения транспортного средства в городских условиях составляет 265 кВт (табл. 2, см. стр. 15), поэтому для получения общей мощности необходимо разделить получаемую мощность между энергетической установкой вспомогательного и основного контуров. Для этого не-

Таблица 1

Оценка количества получаемой дополнительной электрической энергии

Table 1

The amount of additional electrical power

	Цикл Ренкина						Цикл Брайтона					
	q_1 , кДж/кг	q_2 , кДж/кг	l_m , кДж/кг	G , кг/с	N , кВт	η , %	q_1 , кДж/кг	q_2 , кДж/кг	l_m , кДж/кг	G , кг/с	N , кВт	η , %
Фтор	348,8	187,0	169,2	0,437	73,9	0,475	132,6	95,6	37,0	0,377	13,95	0,279
Неон	150,3	85,8	71,2	0,952	68,1	0,454	240,8	159,3	83,0	0,226	18,75	0,345
Водород	488,5	406,5	113,6	0,201	22,8	0,218	3109,5	2119,2	1042,0	0,017	17,70	0,335
Параводород	485,3	403,4	113,7	0,203	23,0	0,220	3613,2	2471,0	1053,8	0,015	15,35	0,292
Гелий	-	-	-	-	-	-	1275,4	949,2	450,5	0,038	17,09	0,353

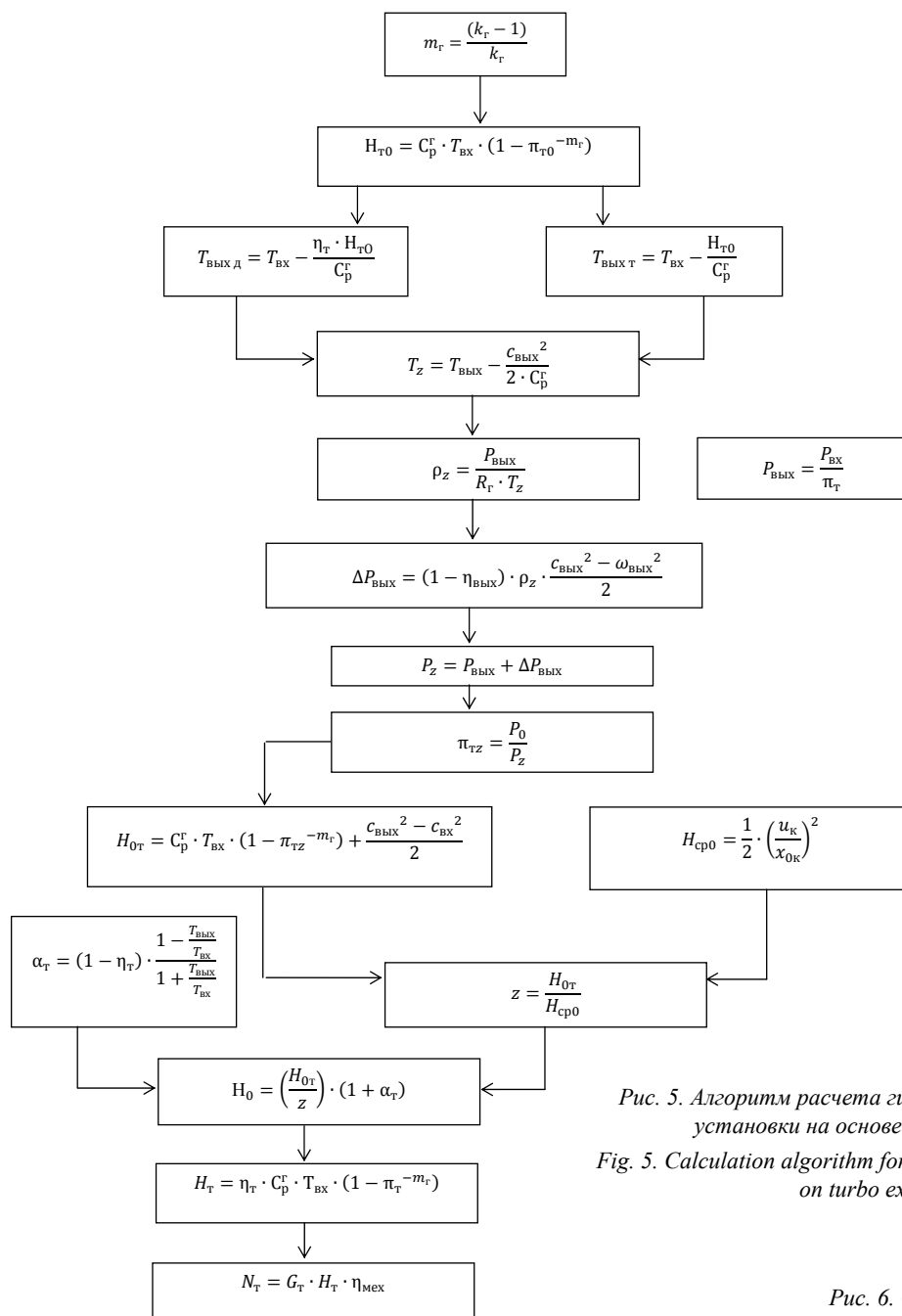


Рис. 5. Алгоритм расчета гибридной энергетической установки на основе турбодетандера

Fig. 5. Calculation algorithm for a hybrid energy plant based on turbo expander

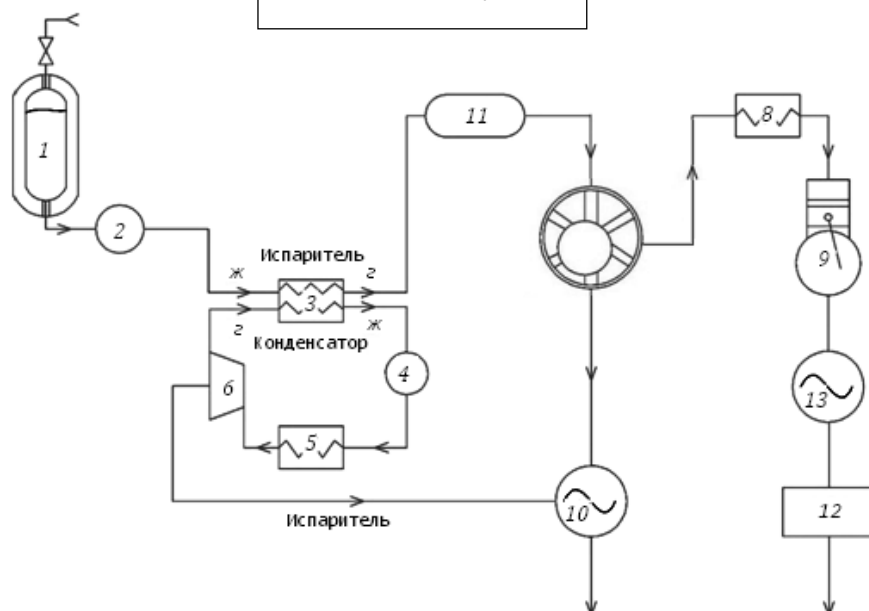


Рис. 6. Схема криогенной силовой установки с приводом от роторно-лопастного детандера: 1 — емкость с криогенной заправкой; 2 — криогенный насос; 3 — теплообменник криогенного рабочего тела; 4 — насос; 5 — испаритель хладагента; 6 — турбина; 7 — роторно-лопастной детандер; 8 — трубчато-ленточный теплообменник; 9 — двигатель; 10, 13 — электрогенератор; 11 — ресивер; 12 — аккумуляторная батарея

Fig. 6. Cryogenic power plant powered by rotary-blade expander: 1 — cryogenic tank; 2 — cryogenic pump; 3 — heat exchanger of refrigerant; 4 — pump; 5 — refrigerant evaporator; 6 — turbine; 7 — rotary-blade expander; 8 — ribbon-tubular heat exchanger; 9 — engine; 10, 13 — electro generator; 11 — receiver; 12 — accumulator

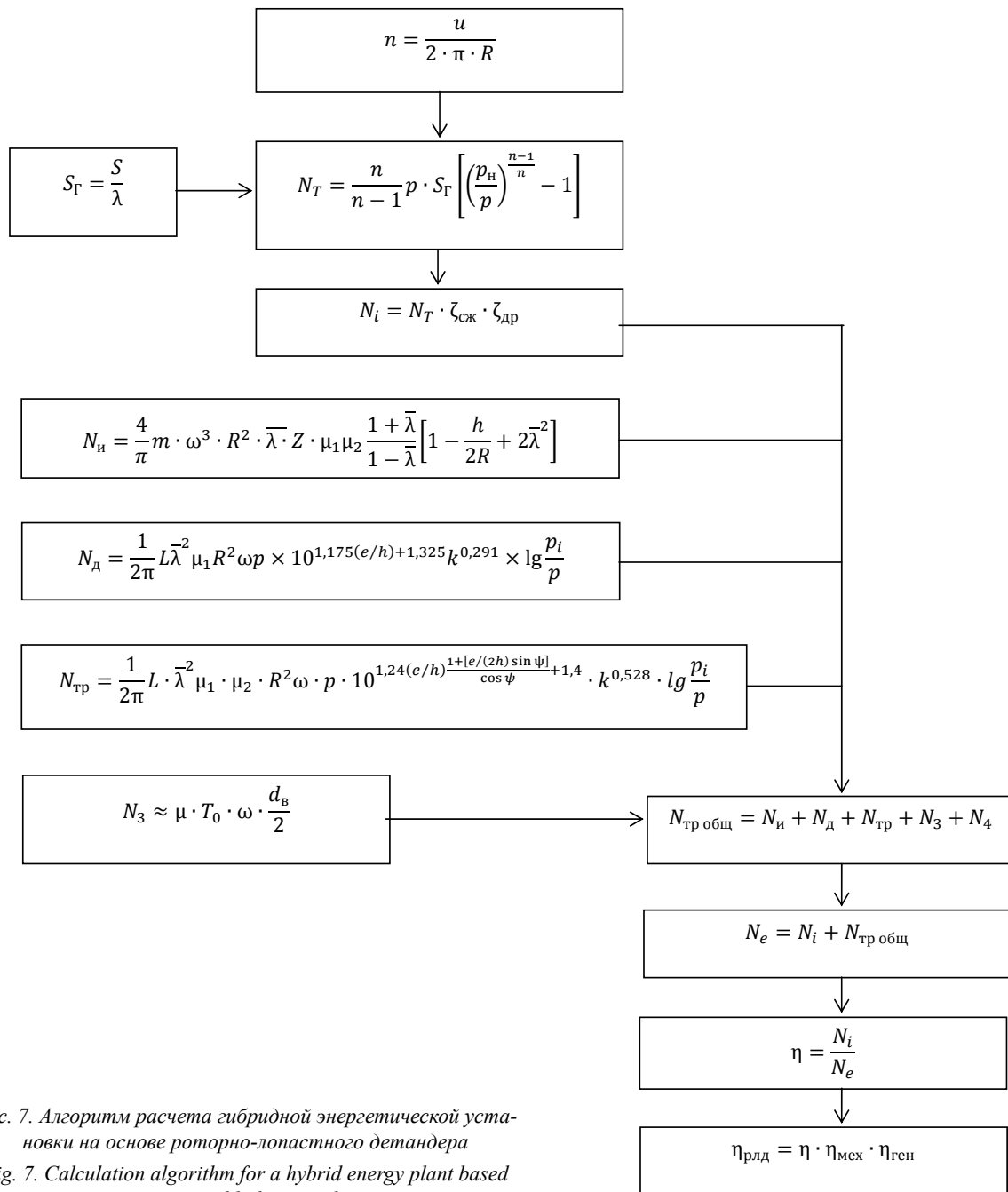


Рис. 7. Алгоритм расчета гибридной энергетической установки на основе роторно-лопастного детандера

Fig. 7. Calculation algorithm for a hybrid energy plant based on rotary-blade expander

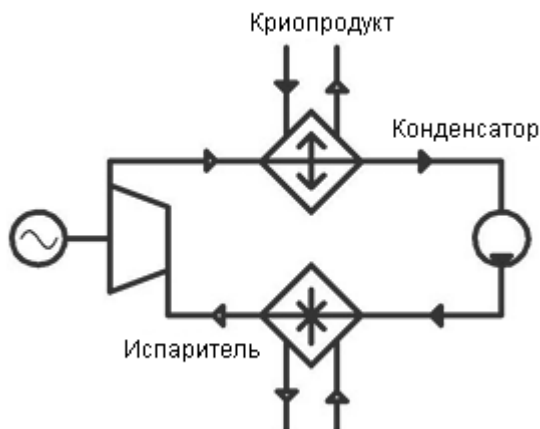


Рис. 8. Схема вспомогательной энергетической установки

Fig. 8. An auxiliary power plant

необходимо оптимально подобрать мощность установки основного контура $N_{уст}$ и мощность установки вспомогательного контура $N_{вуст}$, расход рабочего тела G и коэффициент полезного действия η .

Сравнение эффективности энергетических параметров гибридных энергетических установок

Для энергетической оценки использования низкотемпературного потенциала криогенного продукта используется показатель, характеризующий долю возвращаемой энергии от той, что была затрачена ранее на охлаждение криопродукта — коэффициент возврата энергии, который вычисляется в соответствии с методикой, представленной в работах [8, 9] (табл. 3).

Коэффициент возврата энергии:

Таблица 2
Подбор оптимальных параметров для реализации цикла вспомогательной энергетической установки

Table 2

Selection of optimum parameters for the cycle of an auxiliary power plant

$N_{уст} = 180 \text{ кВт}; N_{вуст} = 85 \text{ кВт (ожидаемая)}$						
	Цикл Ренкина			Цикл Брайтона		
	$G, \text{ кг/с}$	$N, \text{ кВт}$	$\eta, \%$	$G, \text{ кг/с}$	$N, \text{ кВт}$	$\eta, \%$
Фтор	0,420	71,067	47%	0,255	9,452	28%
Неон	0,935	66,830	45%	0,153	12,711	34%
Водород	0,170	19,313	22%	0,012	11,998	34%
Параводород	0,185	21,029	22%	0,010	10,406	29%
Гелий	—	—	—	0,026	11,581	35%
$N_{уст} = 195 \text{ кВт}; N_{вуст} = 70 \text{ кВт (ожидаемая)}$						
	Цикл Ренкина			Цикл Брайтона		
	$G, \text{ кг/с}$	$N, \text{ кВт}$	$\eta, \%$	$G, \text{ кг/с}$	$N, \text{ кВт}$	$\eta, \%$
Фтор	0,400	67,683	47%	0,278	10,304	28%
Неон	0,900	64,328	45%	0,167	13,857	34%
Водород	0,100	11,361	22%	0,013	13,078	34%
Параводород	0,150	17,050	22%	0,011	11,344	29%
Гелий	—	—	—	0,028	12,625	35%
$N_{уст} = 190 \text{ кВт}; N_{вуст} = 75 \text{ кВт (ожидаемая)}$						
	Цикл Ренкина			Цикл Брайтона		
	$G, \text{ кг/с}$	$N, \text{ кВт}$	$\eta, \%$	$G, \text{ кг/с}$	$N, \text{ кВт}$	$\eta, \%$
Фтор	0,413	69,882	47%	0,270	9,994	28%
Неон	0,912	65,186	45%	0,162	13,441	34%
Водород	0,150	17,041	22%	0,012	12,686	34%
Параводород	0,173	19,665	22%	0,010	11,003	29%
Гелий	—	—	—	0,027	12,245	35%
$N_{уст} = 200 \text{ кВт}; N_{вуст} = 65 \text{ кВт (ожидаемая)}$						
	Цикл Ренкина			Цикл Брайтона		
	$G, \text{ кг/с}$	$N, \text{ кВт}$	$\eta, \%$	$G, \text{ кг/с}$	$N, \text{ кВт}$	$\eta, \%$
Фтор	0,386	65,314	47%	0,285	10,536	28%
Неон	0,671	63,256	45%	0,171	14,170	34%
Водород	0,070	7,953	22%	0,013	13,374	34%
Параводород	0,100	11,367	22%	0,01	11,600	29%
Гелий	—	—	—	0,029	12,906	35%

$$\epsilon_{В Н2 \text{ ид}} = \frac{W_{осн}}{W_{ожд Н2} \cdot G_{Н2}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$\epsilon_{В Н2 \text{ реал}} = \frac{W_{осн}}{W_{ож. \text{ реал } Н2} \cdot G_{Н2}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$\epsilon_{В Ne \text{ ид}} = \frac{W_{осн}}{W_{ожд Ne} \cdot G_{Ne}} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\epsilon_{В Ne \text{ реал}} = \frac{W_{осн}}{W_{ож. \text{ реал } Ne} \cdot G_{Ne}} \cdot 100\% \quad (4)$$

В табл. 4 представлены основные сравнительные параметры криогенных установок с приводом от поршневого детандера, роторно-лопастного детандера и турбодетандера, где $N_{у.ок}$, $N_{у.вк}$ и N_{Σ} — мощность установки основного и вспомогательного контуров и суммарная мощность, соответственно.

$$\eta_{\Sigma} = \frac{Q_1 \cdot \eta_T}{Q_2} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ген} \cdot \eta_{лоп} \quad (5)$$

Из данных табл. 3 и 4 видно, что с точки зрения вычисления эффективности энергетических параметров энергетических установок, наиболее эффективной явля-

Таблица 3
Сравнение коэффициента возврата энергии

Table 3

Energy return coefficients

Пара-метр	Порш-невой детандер	Роторно-лопаст-ной детандер	Турбо-детандер	Пара-метр	Вспомо-гательный контур
$\epsilon_{В Н2 \text{ ид}}$	12,5%	12,7%	12,4%	$\epsilon_{В Ne \text{ ид}}$	4,9%
$\epsilon_{В Н2 \text{ реал}}$	8,6%	8,7%	8,55%	$\epsilon_{В Ne \text{ реал}}$	0,5%

Таблица 4
Сравнение энергетических параметров криогенных силовых установок

Table 4

Energy parameters of cryogenic power plants

Название	$N_{у.ок}, \text{ кВт}$	$N_{у.вк}, \text{ кВт}$	$N_{\Sigma}, \text{ кВт}$	η	η_{Σ}
Установка с приводом от поршневого детандера	203	63,2	266,2	0,375	0,39
Установка с приводом от турбодетандера	206,2	63,2	269,4	0,44	0,61
Установка с приводом от роторно-лопастного детандера	202	63,2	265,2	0,36	0,58

ется энергетическая установка с приводом от турбодетандера с КПД 44%, однако у турбодетандера присутствует сложность в конструкции, возникают вибрации и большие массогабаритные характеристики. Установка с приводом от роторно-лопастного детандера имеет КПД 36%, существует проблема обеспечения герметичности и большие потери рабочего тела в межлопаточном пространстве. Эффективность установки с приводом от поршневого детандера составляет 37,5%, преимуществом поршневого детандера является относительно низкая стоимость и отработанная технология его изготовления.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Анализ расчетов показал эффективность применения энергетических установок вспомогательного контура, работающих по циклу Ренкина на неоне или фторе. Из результатов расчетов видно, что более эффективно использовать установки, работающие по циклу Ренкина на неоне $G_{Ne}=0,671 \text{ кг/с}$, $N_{вуст}=200 \text{ кВт}$ и $\eta=45\%$.

К тому же, с точки зрения обеспечения безопасности и экономичности, наиболее подходящим рабочим телом для энергетической установки вспомогательного контура признан неон. При его использовании расход составляет $G=0,67 \text{ кг/с}$, мощность вспомогательной установки $N_{вуст}=63,256 \text{ кВт}$, коэффициент полезного действия $\eta=45\%$.

Сравнительный анализ энергетических установок показал, что наиболее оптимальной является установка

с приводом от турбодетандера $N=206,2$ кВт, $\eta=44\%$. Общая мощность силовой установки $N=269,4$ кВт и $\varepsilon_b=5,5$.

Применение гибридной энергетической установки, состоящей из энергетической установки основного контура с приводом от турбодетандера и энергетической установки вспомогательного контура, возможно в системах приведения в движение автобуса, что позволит решить экологические проблемы крупных городов без снижения конкурентоспособности на рынке с точки зрения эффективности.

Условные обозначения, применяемые в статье

G_{H_2} — расход рабочего тела, кг/с;
 p — давление, Па;
 T — температура, К;
 d — диаметр цилиндра, м;
 φ — угол поворота коленвала, град;
 $V_c(\varphi)$ — объем рабочей зоны цилиндра, м³;
 V_c — минимальный зазор между поршнем и головкой цилиндра, м³;
 V_h — объем камеры расширения не перекрываемый поршнем, м³;
 n — число оборотов;
 $l(\varphi)$ — перемещение поршня;
 R — отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;
 $Q(\varphi)$ — теплота, передаваемая через стенку цилиндра, кДж;
 K_x — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);
 $\delta_{ст}$ — толщина стенки, м;
 $\lambda_{ст}$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 α_x — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 Nu — критерий Нуссельта;
 $N_{и}$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения пластин в пазах ротора от сил инерции, Вт;
 $N_{д}$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения пластин в пазах ротора от сил инерции, Вт;
 N_e — полная мощность, Вт;
 $W_{осн}, W_{всп}$ — мощность основного и вспомогательно-го контура, соответственно, Вт;
 $H_{т0}$ — теплоперепад турбодетандера, кДж/кг;
 π_t — степень расширения турбодетандера;
 ρ_z — плотность газа за последней ступенью, кг/м³;
 ΔP — перепад давления, Па;

$H_{0т}$ — располагаемый теплоперепад, кДж/кг;
 c — скорость, м/с;
 $H_{ср.0}$ — перепад тепла одной ступени, кДж/кг;
 $F_w(\varphi)$ — общая площадь поверхности цилиндра, м²;
 F_p — площадь поршня, м²;
 F_h — внутренняя область головки цилиндра, м²;
 t_r — толщина поршневого кольца, м;
 F_c — площадь поверхности зазора, м²;
 γ — показатель адиабаты;
 m — массовый расход рабочего тела, кг/с;
 h — энтальпия, кДж/кг;
 Q_1 — подвод теплоты, кДж;
 N — мощность установки, кВт;
 $N_{уд}$ — удельная мощность энергетической установки, кВт;
 η — термодинамический КПД цикла установки;
 η_t — коэффициент полезного действия турбодетандера;
 C_p^r — изобарная теплоемкость, Дж/кг;
 π_t — степень расширения турбодетандера;
 $\eta_{мех}$ — механический КПД турбодетандера;
 N_4 — мощность на трение в уплотнениях;
 $N_{тр}$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения пластин по цилиндру от разности давлений в соседних ячейках;
 N_3 — мощность на трение в подшипниках;
 N_i — индикаторная мощность;
 $W_{ож}$ — мощность, затрачиваемая на сжижение газа;
 S_t — теоретическая быстрота действия, м³/с;
 u — окружная скорость пластин, м/с;
 z — количество ступеней турбодетандера;
 α_t — коэффициент возврата теплоты;
 H_t — расчет действия расширения одного килограмма используемого вещества в турбодетандере, кДж/кг;
 N_t — мощность турбодетандера, кВт;
 $\eta_{рлд}$ — КПД роторно-лопастного детандера.

Благодарности

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

Литература

1. Sun Z, Wang J, Dai Y, Wang J. Energy analysis and optimization of a hydrogen production process by a solar-liquefied natural gas hybrid driven transcritical CO₂ powercycle. // *Int J Hydrog Energy*. 2012. 37 (24). 18731–8.
2. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. С. 720.
3. Архаров А. М. Криогенные системы. М.: Машиностроение, 1987. С. 320.
4. Терещенко О. В. Расчет основных характеристик криогенного двигателя с нулевым выбросом вредных веществ / О. В. Терещенко, Ю. С. Журавлева, Д. А. Угланов // Лукачевские чтения: сб. науч. трудов. Самара: Самарский университет, 2017. С. 13–17.
5. Грызунов А. А., Корниенко В. Н., Авилова С. В. О необходимости совершенствования подходов к выбору авторефри-

References

1. Sun Z, Wang J, Dai Y, Wang J. Energy analysis and optimization of a hydrogen production process by a solar-liquefied natural gas hybrid driven transcritical CO₂ powercycle. *Int J Hydrog Energy*. 2012; 37 (24): 18731–8.
2. Vargaftik N. B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. Moscow: Nauka, 1972. P. 720. (in Russian)
3. Arkharov A. M. Cryogenic systems. Moscow: Mechanical engineering, 1987. P. 320. (in Russian)
4. Tereshchenko O. V. Calculation of the main characteristics of a cryogenic engine with zero emission of harmful substances. / O. V. Tereshchenko Yu. S. Zhuravleva, D. A. Uglanov. *Lukachevsky readings*. Samara. 2017. PP. 13–17. (in Russian)
5. Gryzunov A. A., Kornienko V. N., Avilova S. V. On the necessity of improving approaches to the selection of refrigerator vehicles

- жераторов для внутригородских перевозок пищевых продуктов // Вестник Международной академии холода. 2019. № 2. С. 13–21.
6. Owen N., Clarke H., Charters D., Trembley J., Garner C., Mohr S., Williams A., Zhao H. Development of a high efficiency liquid-air engine for cooling, heat recovery and power. // *Vehicle Thermal Management Systems Conference*. May 2015. 2015. P. 229–245.
 7. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1990. С. 320.
 8. Uglanov D. A. Efficiency Criteria and Comparative Analysis of Combined Energy Plants Utilizing LNG Cold Energy. / D. A. Uglanov, E. V. Blagin, A. A. Shimanov, A. I. Dovgyallo. // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 152. PP. 219–225.
 9. Угланов Д. А. К вопросу оценки эффективности использования низкопотенциального тепла криопродукта / Д. А. Угланов, Е. В. Благин, А. И. Довгялло. Омск: Издательство ОМГТУ, 2016. С. 104–105.
 10. Терещенко О. В. Выбор оптимальной схемы гибридной криогенной энергетической установки. / О. В. Терещенко, Д. А. Угланов // *Насосы. Турбины. Системы*. 2019. № 32. С. 30–37.
 11. Терещенко О. В., Благин Е. В. Исследование возможности утилизации низкопотенциального тепла при помощи установок, работающих по циклу Ренкина. // *Лукачевские чтения: сб. науч. трудов*. Самара: Самарский университет, 2017. С. 7–12.
 12. Терещенко О. В. Исследование возможности утилизации низкопотенциального тепла при помощи установок, работающих по циклу Брайтона [Текст] / О. В. Терещенко, А. В. Заика, Е. В. Благин // *Лукачевские чтения: сб. науч. трудов*. Самара: Самарский университет, 2017. С. 58–62.
 13. Uglanov D. Calculation of parameters of the Cryogenic rotor-blade engine for the drive of the refrigeration unit for truck. / D. Uglanov, O. Tereshchenko, S. Zaika, I. Neverov, R. Panshin // *IOP conference series: materials science and engineering*. 2019. p. 692.
 - for intracity food transportation. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019. No 2. p. 13–21. (in Russian)
 6. Owen N., Clarke H., Charters D., Trembley J., Garner C., Mohr S., Williams A., Zhao H. Development of a high efficiency liquid-air engine for cooling, heat recovery and power. *Vehicle Thermal Management Systems Conference*, May 2015. 2015. PP. 229–245.
 7. Rozanov L. N. Vacuum technology. Studies. for universities. 2nd ed., Rev. and Dop. Moscow. 1990. P. 320. (in Russian)
 8. Uglanov, D. A. Efficiency Criteria and Comparative Analysis of Combined Energy Plants Utilizing LNG Cold Energy. / D. A. Uglanov, E. V. Blagin, A. A. Shimanov, A. I. Dovgyallo. *Proceedings Engineering*. 2016. Vol. 152. PP. 219–225.
 9. Uglanov D. A. On the issue of evaluating the efficiency of using low-potential heat of cryoproduct. / D. A. Uglanov, E. V. Blagin, A. I. Dovgyallo. Omsk: OMTU Publishing House, 2016. PP. 104–105. (in Russian)
 10. Tereshchenko, O. V. Selection of the optimal scheme of a hybrid cryogenic power plant. / O. V. Tereshchenko, D. A. Uglanov. *Pumps. Turbines. Systems*. 2019. No. 32. PP. 30–37. (in Russian)
 11. Tereshchenko O. V., Blagin E. V. Investigation of the possibility of utilization of low-potential heat by means of installations operating on the Rankin cycle *Lukachevsky readings*. Samara. 2017. PP. 7–12. (in Russian)
 12. Tereshchenko O. V. Investigation of the possibility of utilization of low-potential heat using installations operating on the Brighton cycle. / O. V. Tereshchenko, A. V. Zaika, E. V. Blagin. *Lukachevsky readings*. Samara. 2017. PP. 58–62. (in Russian)
 13. Uglanov D. Calculation of parameters of the Cryogenic rotor-blade engine for the drive of the refrigeration unit for truck. / D. Uglanov, O. Tereshchenko, S. Zaika, I. Neverov, R. Panshin. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2019. p. 692.

Сведения об авторах

Карнаух Виктория Викторовна

К.т. н., доцент, профессор кафедры Холодильной и торговой техники имени В. В. Осокина Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, ДНР, 83050, г. Донецк, ул. Щорса, 31, karnaukh.vita0629@gmail.com

Крылова Анастасия Дмитриевна

Магистрант кафедры Теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, anastaia2011@mail.ru

Лопатин Алексей Леонидович

Магистрант кафедры Теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34

Мироненкова Анна Сергеевна

Магистрант кафедры Теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, anna.mironenkova.97@mail.ru

Information about authors

Karnaukh Victoria V.

Ph.D., Associate Professor, Professor of the Department of refrigeration and commercial equipment named after V. V. Osokin, Donetsk national University of Economics and trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, DPR, 83050, Donetsk, Shchorsa str., 31, karnaukh.vita0629@gmail.com

Krylova Anastasia D.

Under-graduate student of the Department of heat engineering and thermal engines of the Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia, anastaia2011@mail.ru

Lopatin Aleksey L.

Under-graduate student of the Department of heat engineering and thermal engines of the Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia

Mironenkova Anna S.

Under-graduate student of the Department of heat engineering and thermal engines of the Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia, anna.mironenkova.97@mail.ru

Тремкина Ольга Витальевна

Аспирант кафедры Теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, t.olga.vit@bk.ru

Tremkina Olga V.

Post-graduate student of the Department of heat engineering and thermal engines of the Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia, t.olga.vit@bk.ru

Угланов Дмитрий Александрович

К.т.н, доцент кафедры Теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, dmitry.uglanov@mail.ru

Uglanov Dmitry A.

Ph.D., Associate Professor of the Department of heat engineering and thermal engines of the Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia, dmitry.uglanov@mail.ru

**Международная агропромышленная выставка-ярмарка****АГРОРУСЬ-2020**

**Выставка «АГРОРУСЬ» проводится
2 – 5 сентября 2020 г.**

**Ярмарка региональных продуктов «АГРОРУСЬ»
25 августа – 6 сентября 2020 г.**

Проект АГРОРУСЬ проводится с 1991 года – ровесник современной России:

- единственный агропромышленный форум, представляющий интересы: крестьянских, фермерских и личных подсобных хозяйств, сельских кооперативов, садоводов и огородников, специалистов перерабатывающих предприятий, потребителей сельскохозяйственной продукции;
- ведущая выставочная площадка по вопросам стимулирования и развития всех малых форм хозяйствования и кооперации в АПК России, направленная на обеспечение продовольственной безопасности и поддержку экспортоориентированных российских сельхозтоваропроизводителей.

Выставка «АГРОРУСЬ» – крупнейшая выставочная площадка России для демонстрации возможностей малых форм хозяйствования АПК, обмена опытом и обсуждения перспектив развития отрасли.

На выставке представлены почти все регионы России и порядка 20 стран с лучшими продовольственными товарами и достижениями местного сельского хозяйства.

ВЫСТАВКА. РАЗДЕЛЫ:

- ✓ Сельскохозяйственная техника
- ✓ Оборудование для АПК
- ✓ Растениеводство сельскохозяйственных культур
- ✓ Средства защиты растений. Агрохимия
- ✓ Животноводство. Корма и комбикорма. Ветеринария
- ✓ Продукты питания
- ✓ Напитки (Кухня регионов «От поля до прилавка»)
- ✓ Услуги для АПК. Научное обеспечение. Управление

<http://agrorus.expoforum.ru/>

Организатор выставки-ярмарки:

Министерство сельского хозяйства РФ,
при официальной поддержке Правительств
Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Контакты:

Тел./факс: +7 (812) 240-40-40, доб.2235
E-mail: e.gabuchiya@expoforum.ru,

Место проведения:
КВЦ «Экспофорум»

Адрес дирекции:
Петербургское шоссе 64, корпус 1,
конгресс-центр, ЭКСПОФОРУМ