

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПУТЁМ ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

© 2021

- И. А. Елисеев** студент магистратуры Института двигателей и энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [vanchel20@gmail.com](mailto:vanchel20@gmail.com)
- В. В. Точёнов** студент магистратуры Института двигателей и энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [vladtochenov@gmail.com](mailto:vladtochenov@gmail.com)
- Р. А. Паньшин** аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [panshinroman2016@yandex.ru](mailto:panshinroman2016@yandex.ru)

Рассматривается один из способов повышения эффективности низкотемпературных энергетических установок. Актуальным вариантом увеличения мощности является подбор рабочего вещества для вспомогательного низкотемпературного энергетического контура. Низкотемпературный потенциал криогенных веществ используется для повышения эффективности энергетических систем. При работе были использованы вспомогательные энергетические установки, работающие по циклу Ренкина и Брайтона, так как эти циклы являются наиболее эффективными при работе в вспомогательных низкотемпературных энергетических установках. Для вспомогательной энергетической установки, работающей по циклу Ренкина, были выбраны следующие низкотемпературные криогенные вещества: аргон, дифторхлорметан, трифторхлорметан, этилен, тетрафторэтан, тетрафторметан, этан. Для вспомогательной энергетической установки, работающей по циклу Брайтона, были выбраны следующие низкотемпературные криогенные вещества: этилен, трифторхлорметан, тетрафторметан. По результатам расчётов, а также по результатам анализа зависимостей мощности от степени повышения давления приведены несколько криогенных веществ, которые показывают наилучшие показатели среди рассмотренных рабочих тел.

*Криогенная энергетическая установка; рабочее тело*

---

**Цитирование:** Елисеев И.А., Точёнов В.В., Паньшин Р.А. Повышение эффективности низкотемпературных энергетических установок путём подбора оптимального рабочего тела вспомогательного контура // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 4. С. 79-88. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-79-88

### Введение

В настоящее время происходит значительное увеличение объёмов производства энергетических комплексов различного назначения, где используется низкопотенциальная энергия криогенных веществ. Это объясняется удобством их хранения, улучшением экологических характеристик и увеличением ресурса работы техники. Для того, чтобы получить криопродукт, затрачивается энергия, которая может частично возвращаться в процессе его регазификации. Одним из вариантов такого возврата является применение энергетических установок, которые работают по циклам Ренкина или Брайтона. Сжиженный природный газ (СПГ) используется в различных областях, таких как промышленность, транспорт и сельское хозяйство. Зарубежное производство имеет большой опыт в проектировании, изготовлении и эксплуатации автомобилей и судов на сжиженном природном газе [1; 2].

### Вспомогательный энергетический контур

В работе рассматривается газопоршневая установка (ГПУ) JMS 920 GS-N.LC мощностью 10 МВт, предназначенная для поддержания потребности населённого пункта в тепловой и электрической энергии. Топливом для газопоршневой установки также является сжиженный природный газ.

Для увеличения КПД и мощности энергетической установки зачастую используются вспомогательные контуры или вспомогательные энергетические установки. Одним из способов увеличения эффективности вспомогательного контура является подбор оптимального рабочего тела.

### Вспомогательный низкотемпературный энергетический контур

Работа вспомогательной энергетической установки осуществляется с учётом исходных данных холодного теплоносителя СПГ: расход  $G_{\text{СПГ}} = 0,579$  кг/с, температура  $T_{\text{СПГ}} = 110$  К и теплота парообразования  $r_{\text{СПГ}} = 510$  кДж/кг.

Так как подогрев идёт от окружающего воздуха, можно считать, что на нагрев рабочего тела энергия не затрачивается. Поэтому в установках циклов Ренкина и Брайтона возможно догреть рабочее тело до температуры окружающей среды ( $T_3 = 293$  К).

### Установка на основе цикла Ренкина

Работа вспомогательной энергетической установки рассматривалась с применением следующих криопродуктов: аргон, дифторхлорметан, трифторхлорметан, этилен, тетрафторэтан, тетрафторметан, этан. Схема вспомогательной энергетического контура на основе цикла Ренкина представлена на рис. 1.

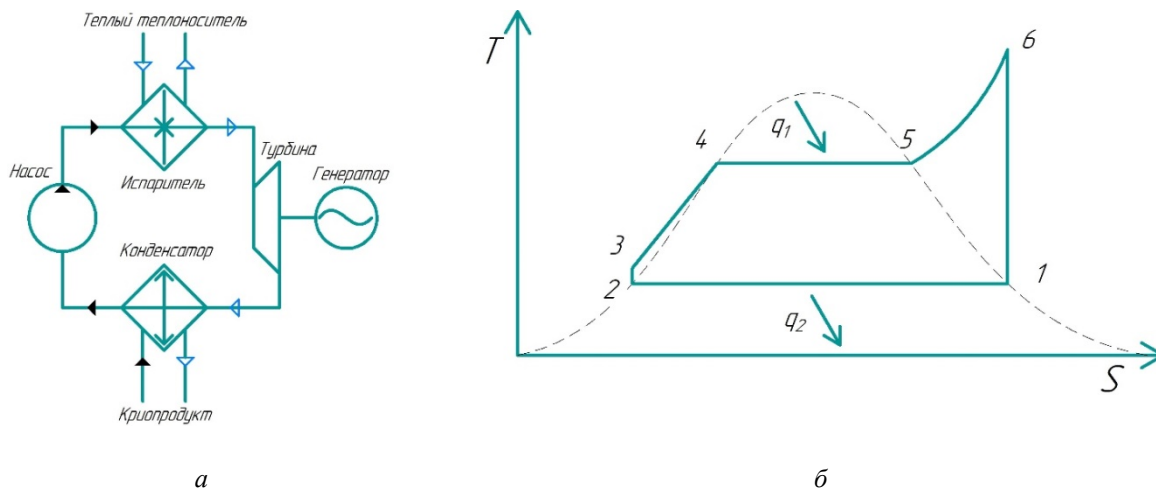


Рис. 1. Схема вспомогательной энергетической установки, работающей по циклу Ренкина:

а – схема энергетического контура; б – графическое изображение цикла Ренкина:

$T$  – температура;  $S$  – энтропия;  $q_1$  – подводимая теплота цикла;  $q_2$  – отводимая теплота цикла

Рабочее вещество охлаждается в конденсаторе от холодного СПГ, переходя из газообразного в жидкое агрегатное состояние. Далее с помощью насоса направляется в испаритель, где догревается до температуры окружающей среды 293 К. После чего рабочее тело расширяется, раскручивая турбину. Турбина подключена к электрогенератору, который вырабатывает электроэнергию. Цикл повторяется.

На рис. 1, б процесс 2–3 – адиабатное нагнетание в насосе; 3–6 – процесс испарения жидкости; 3–4 – процесс нагрева жидкости; 4–5 – процесс кипения; процесс 5–6 – изобарный нагрев пара (техническая работа насоса); процесс 6–1 – адиабатное расши-

рение пара в турбине. Процесс замыкается линией 1–2, соответствующей конденсации рабочего вещества.

Построение графика осуществляется с определения параметров точки 1. Температура точки берётся выше параметров криопродукта. Затем проводится вертикальная линия вверх до температуры тёплого теплоносителя б (температура окружающей среды 293 К). Далее по изобаре проводится линия до пересечения с кривой насыщения 5, проводится горизонтальная линия влево до пересечения с кривой насыщения 4, далее по кривой насыщения вниз до первоначальной температуры б, цикл замыкается.

Затем определяется подводимая теплота:

$$q_1 = i_6 - i_1, \text{ где } i_1 - \text{энтальпия в точке 1, } i_6 - \text{энтальпия в точке б.}$$

Отводимая теплота:

$$q_2 = i_2 - i_1, \text{ где } i_2 - \text{энтальпия в точке 2.}$$

Работа турбины:

$$l_T = q_1 - q_2.$$

Термический КПД цикла:

$$\eta_T = \frac{q_1 - q_2}{q_1}.$$

Расход рабочего тела:

$$G = \frac{r_{CH4} \cdot G_{CH4}}{q_2}.$$

Мощность, вырабатываемая турбиной, определяется как

$$N = l_T G.$$

Количество электрической энергии для различных веществ приведено в табл. 1. В цикле Ренкина в качестве рабочего вещества были выбраны Аргон R740, Дифторхлорметан R22, Трифторхлорметан R13, Этилен R1150, Тетрафторэтан R134а, Тетрафторметан R14, Этан R170.

Таблица 1. Оценка количества получаемой электрической энергии

Аргон R740						
$p_1$ , бар	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$l_T$ , кДж/кг	$G$ , кг/с	$N$ , кВт	$\eta_T$
10	228	165	63	1,789	112,747	0,27
13	222	168	54	1,757	94,914	0,24
15	218	169	49	1,747	85,616	0,22
18	214	174	40	1,697	67,882	0,18
20	210	173	37	1,706	63,154	0,17
Дифторхлорметан R22						
$p_1$ , бар	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$l_T$ , кДж/кг	$G$ , кг/с	$N$ , кВт	$\eta_T$
0,05	320	258	62	1,144	70,961	0,19
0,1	310	254	56	1,162	65,103	0,18
0,25	296	247	49	1,195	58,579	0,16
0,5	282	240	42	1,23	51,675	0,14
1,0	267	233	34	1,267	43,089	0,12

Окончание таблицы 1. Оценка количества получаемой электрической энергии

Трифторхлорметан R13						
$p_1$ , бар	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$l_T$ , кДж/кг	$G$ , кг/с	$N$ , кВт	$\eta_T$
0,05	240	166	74	1,778	131,635	0,31
0,1	233	163	70	1,811	126,811	0,3
0,25	221	160	61	1,845	112,579	0,27
0,5	210	155	55	1,905	104,780	0,26
1,0	196	150	46	1,968	90,555	0,23
Этилен R1150						
$p_1$ , бар	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$l_T$ , кДж/кг	$G$ , кг/с	$N$ , кВт	$\eta_T$
0,05	739	529	210	0,558	117,222	0,284
0,1	726	526	200	0,561	112,277	0,275
0,25	695	510	185	0,579	107,115	0,266
0,5	667	497	170	0,594	101,004	0,254
1,0	635	480	155	0,615	95,354	0,244
Тетрафторэтан R134a						
$p_1$ , бар	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$l_T$ , кДж/кг	$G$ , кг/с	$N$ , кВт	$\eta_T$
0,05	309	240	69	1,23	84,895	0,223
0,1	298	236	62	1,251	77,576	0,208
0,25	280	230	50	1,283	64,193	0,178
0,5	264	223	41	1,324	54,290	0,155
1,0	245	215	30	1,373	41,203	0,122
Тetraфторметан R14						
$p_1$ , бар	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$l_T$ , кДж/кг	$G$ , кг/с	$N$ , кВт	$\eta_T$
0,05	246	148	98	1,995	195,529	0,398
0,1	239	146	93	2,022	188,095	0,389
0,25	228	143	85	2,064	175,522	0,372
0,5	216	139	77	2,124	163,577	0,356
1,0	203	134	69	2,203	152,052	0,339
Этан R170						
$p_1$ , бар	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$l_T$ , кДж/кг	$G$ , кг/с	$N$ , кВт	$\eta_T$
0,05	768	550	218	0,536	117,042	0,28
0,1	745	537	208	0,549	114,376	0,27
0,25	707	519	188	0,568	106,964	0,26
0,5	675	505	170	0,584	99,404	0,25
1,0	638	488	150	0,605	90,765	0,23

Зависимость мощности от степени повышения давления  $\pi_k$  (отношения давления после компрессора к давлению перед компрессором) представлена на рис. 2.

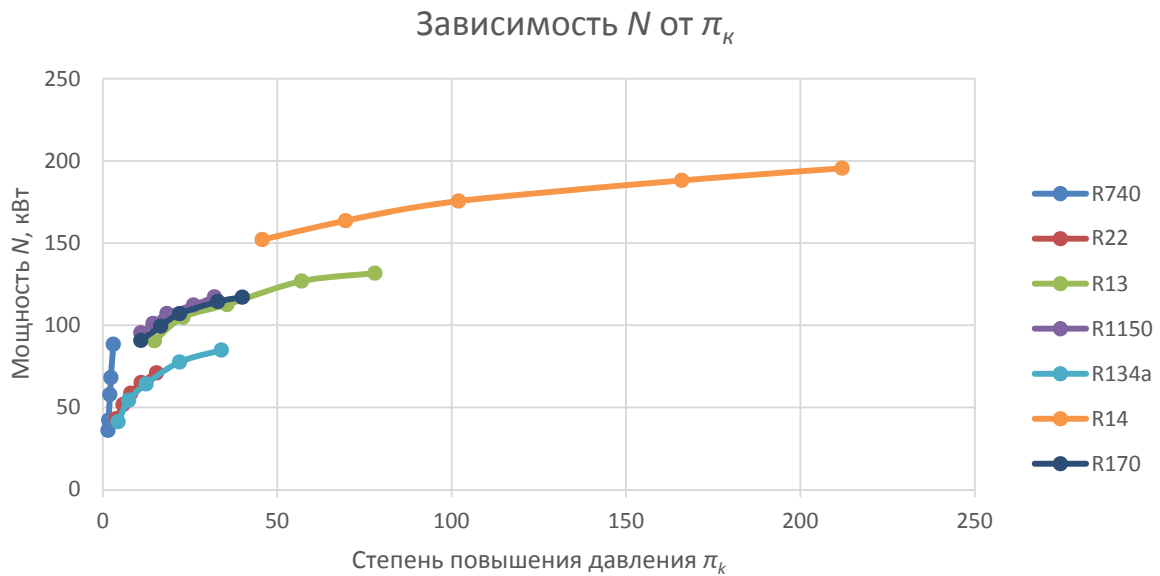


Рис. 2. Зависимость мощности, вырабатываемой дополнительным контуром, от степени повышения давления (цикл Ренкина)

### Установка на основе цикла Брайтона

Работа вспомогательной энергетической установки рассматривалась с применением следующих криопродуктов: трифторхлорметан R13; этилен R1150; тетрафторметан R14. Схема вспомогательной энергетического контура на основе цикла Брайтона представлена на рис. 3.

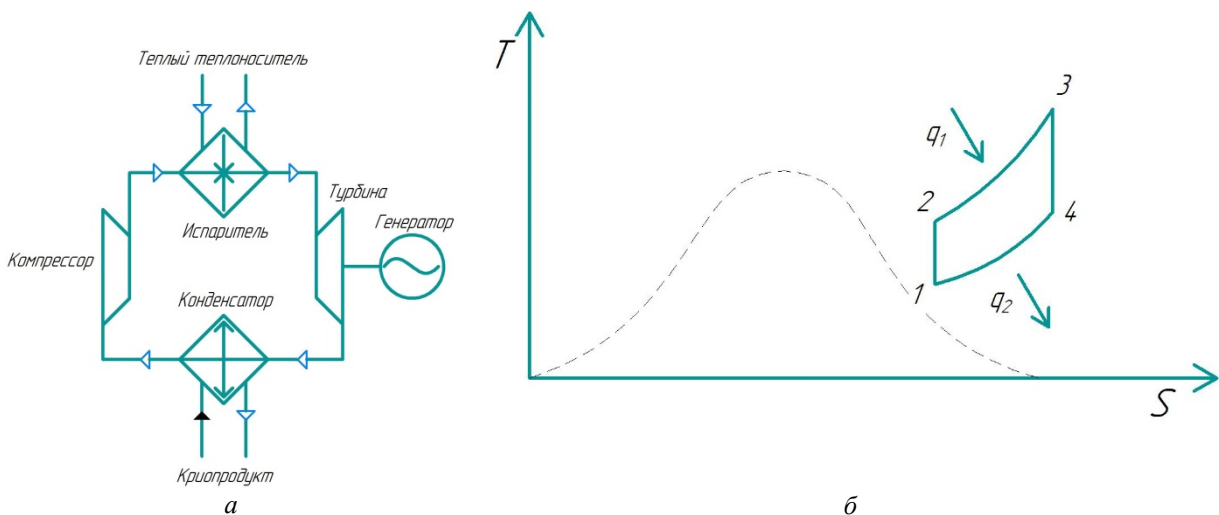


Рис. 3. Схема вспомогательной энергетической установки, работающей по циклу Брайтона:  
 а — схема энергетического контура; б — графическое изображение цикла Брайтона:  
 $T$  — температура;  $S$  — энтропия;  $q_1$  — подводимая теплота цикла;  $q_2$  — отводимая теплота цикла

Рабочее вещество охлаждается в конденсаторе от холодного СПГ. Далее оно сжимается в компрессоре и направляется в испаритель. В испарителе происходит нагрев рабочего тела. Рабочее тело расширяется, раскручивая турбину. Аналогично циклу Ренкина турбина подключена к электрогенератору, который вырабатывает электроэнергию. Цикл повторяется.

Процесс 1–2 соответствует адиабатному сжатию рабочего вещества в компрессоре. Процесс 2–3 – изобарный подвод теплоты. Процесс 3–4 – адиабатное расширение рабочего вещества в турбине. Замыкающий процесс 4–1 – изобарный отвод теплоты от рабочего вещества.

Построение графика осуществляется с определения параметров точки 1. Температура точки берётся немного выше параметров криопродукта. Затем задаются два параметра, которые характеризуют цикл – степень повышения давления и начальное давление. Проводится вертикальная линия вверх до давления, обусловленного степенью повышения давления (точка 2). Далее по изобаре проводится кривая вверх до температуры окружающей среды 293 К (точка 3), затем вертикальная линия вниз до точки 4. График замыкается кривой 4–1, которая проводится по изобаре.

Работа сжатия компрессора:

$$l_k = i_2 - i_1, \text{ где } i_1 - \text{энтальпия в точке 1; } i_2 - \text{энтальпия в точке 2.}$$

$$\text{Температура в конце процесса сжатия: } T_2 = T_1 \frac{p_1^{\frac{1-k}{k}}}{p_2}, \text{ где } p_1 - \text{давление в точке 1;}$$

$p_2$  – давление в точке 2;  $k$  – показатель адиабаты.

Далее находим значение энтальпии с помощью известных нам давления в точке 2 и температуры в точке 3.

Работа расширения в турбине:

$$l_T = i_3 - i_4, \text{ где } i_3 - \text{энтальпия в точке 3; } i_4 - \text{энтальпия в точке 4.}$$

После расчёта параметров цикла определяется КПД цикла.

$$\text{Работа цикла: } l_u = l_T - l_k.$$

Термический КПД цикла:  $\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$ , где  $l_u$  – удельная работа цикла;  $q_1$  – количество теплоты, подводимое к рабочему веществу,  $q_2$  – количество теплоты, отведённое от рабочего вещества.

Мощность, вырабатываемая турбиной, определяется по формуле  $N = l_u G$ , где  $G$  – расход рабочего вещества в контуре получения дополнительной энергии.

Количество получаемой электрической энергии для различных веществ приведено в табл. 2.

Таблица 2. Оценка количества получаемой электрической энергии

Трифторхлорметан R13							
$\pi_k$	$p_1$ , МПа	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$l_T$ , кДж/кг	$G$ , кг/с	$N$ , кВт	$\eta_T$
12	0,05	34	23	11	12,838	141,225	0,32
12	0,1	29	20	9	14,764	132,88	0,31
12	0,25	19	13	6	22,714	136,287	0,31
12	0,5	11	8	3	36,911	110,733	0,27

Продолжение таблицы 2. Оценка количества получаемой электрической энергии

10	0,05	37	26	11	11,357	124,93	0,29
10	0,1	32	23	9	12,838	115,548	0,28
10	0,25	24	16	8	18,455	147,645	0,33
10	0,5	16	11	5	26,844	134,222	0,31
7	0,05	44	33	11	8,948	98,43	0,25
7	0,1	39	29	10	10,182	101,824	0,25
7	0,25	31	23	8	12,838	102,709	0,25
7	0,5	23	18	5	16,405	82,025	0,21
5	0,05	50	39	11	7,571	83,286	0,22
5	0,1	44	36	8	8,202	65,62	0,18
5	0,25	38	29	9	10,182	91,641	0,23
5	0,5	31	25	6	11,811	70,869	0,19
3	0,05	58	49	9	6,026	54,236	0,15
3	0,1	54	46	8	6,419	51,354	0,14
3	0,25	47	39	8	7,571	60,572	0,17
3	0,5	41	35	6	8,436	50,621	0,14
Этилен R1150							
$\pi_k$	$p_1$ , бар	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$l_T$ , кДж/кг	$G$ , кг/с	$N$ , кВт	$\eta_r$
12	0,05	55	30	25	9,843	246,075	0,45
12	0,1	41	25	16	11,812	188,986	0,39
12	0,25	19	10	9	29,529	265,761	0,47
10	0,05	69	40	29	7,382	214,085	0,42
10	0,1	58	33	25	8,948	223,704	0,43
10	0,25	34	21	13	14,061	182,798	0,38
10	0,5	14	7	7	42,184	295,29	0,5
7	0,05	96	61	35	4,841	169,428	0,36
7	0,1	83	53	30	5,572	167,145	0,36
7	0,25	61	40	21	7,38225	155,027	0,34
7	0,5	44	28	16	10,546	168,737	0,36
5	0,05	118	80	38	3,691	140,262	0,32
5	0,1	107	74	33	3,99	131,68	0,3
5	0,25	86	59	27	5,005	135,132	0,31
5	0,5	70	47	23	6,283	144,503	0,32
3	0,05	147	114	33	2,59	85,478	0,22
3	0,1	135	107	28	2,76	77,272	0,2
3	0,25	119	95	24	3,108	74,599	0,2
3	0,5	104	83	21	3,558	74,711	0,2

Окончание таблицы 2. Оценка количества получаемой электрической энергии

Тетрафторметан R14							
$\pi_k$	$p_1$ , МПа	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$l_T$ , кДж/кг	$G$ , кг/с	$N$ , кВт	$\eta_T$
12	0,05	58	38	20	7,77	155,415	0,34
12	0,1	55	36	19	8,20	155,847	0,34
12	0,25	48	32	16	9,227	147,645	0,33
12	0,5	43	28	15	10,546	158,191	0,34
10	0,05	62	42	20	7,03	140,614	0,32
10	0,1	58	39	19	7,571	143,859	0,32
10	0,25	52	35	17	8,436	143,426	0,32
10	0,5	46	32	14	9,227	129,189	0,30
7	0,05	69	49	20	6,026	120,526	0,28
7	0,1	65	47	18	6,287	113,089	0,27
7	0,25	58	43	15	6,867	103,008	0,25
7	0,5	54	39	15	7,571	113,573	0,27
5	0,05	74	57	17	5,18	88,068	0,22
5	0,1	71	54	17	5,468	92,961	0,23
5	0,25	66	50	16	5,905	94,492	0,24
5	0,5	60	47	13	6,282	81,675	0,21
3	0,05	81	68	13	4,342	56,452	0,16
3	0,1	79	66	13	4,474	58,163	0,16
3	0,25	74	62	12	4,762	57,152	0,16
3	0,5	70	58	12	5,091	61,094	0,17

Зависимость мощности  $N$  от степени повышения давления  $\pi_k$  для различных значений давления  $p$  представлена на рис. 4.

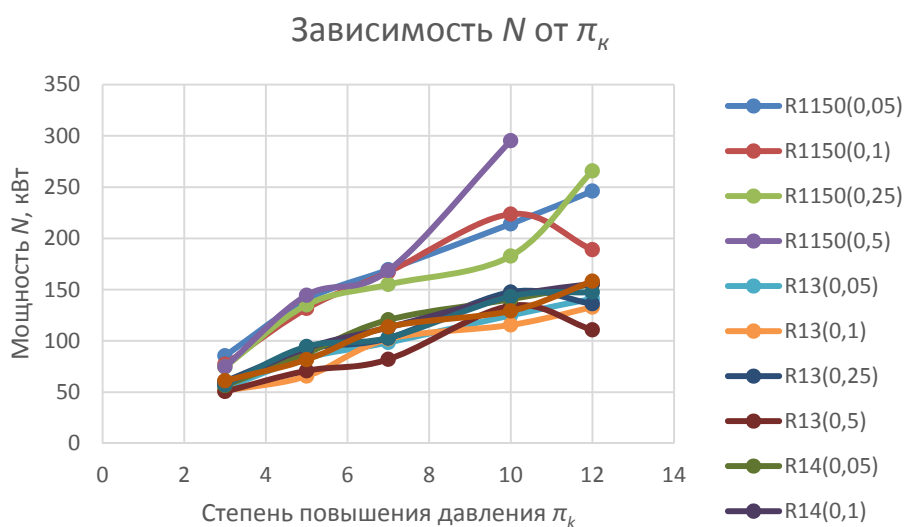


Рис. 4. Зависимость мощности, вырабатываемой дополнительным контуром, от степени повышения давления (цикл Брайтона)



## Заключение

Проведя подбор оптимального рабочего тела для дополнительных низкотемпературных контуров, можно сделать следующие выводы:

1. Для установок, работающих по циклу Ренкина, наиболее подходящим веществом является R14 (тетрафторметан). При одинаковом начальном давлении его КПД 39% и мощность 195 кВт являются самыми высокими среди остальных рабочих веществ.

2. Для установок, работающих по циклу Брайтона, наиболее подходящим веществом является R1150 (этилен). При одинаковых степенях повышения давления его КПД 49% и мощность 295 кВт являются самыми высокими среди остальных рабочих веществ. Но так как этилен чрезвычайно огнеопасен и взрывоопасен, альтернативой ему может служить R14 (тетрафторметан). Его КПД и мощность составляют 34% и 158 кВт соответственно.

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. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 256 с.
2. Архаров А.М., Беляков В.П., Микулин Е.И. Криогенные системы. М.: Машиностроение, 1987. 535 с.

## INCREASING THE EFFICIENCY OF LOW-TEMPERATURE POWER PLANTS BY SELECTING THE OPTIMAL WORKING FLUID OF THE AUXILIARY CIRCUIT

© 2021

- I. A. Eliseev** Master Student; Institute of Engines and Power Plants;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[vanchel20@gmail.com](mailto:vanchel20@gmail.com)
- V. V. Tochenov** Master Student; Institute of Engines and Power Plants;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[vladtochenov@gmail.com](mailto:vladtochenov@gmail.com)
- R. A. Panshin** Postgraduate Student of the Department of Thermal Engineering  
and Thermal Engines;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[panshinroman2016@yandex.ru](mailto:panshinroman2016@yandex.ru)

The article discusses one of the ways to improve the efficiency of low-temperature power plants. Selection of the working substance for the auxiliary low-temperature power circuit is a relevant option for increasing the power. The low temperature potential of cryogenic substances is used to improve the efficiency of energy systems. Auxiliary power plants operating according to the Rankine cycle and the Brayton cycle were used in the work since these cycles are most efficient for the operation of auxiliary low-temperature power plants. The following low-temperature cryogenic substances were chosen for the power plant operating according to the Rankine cycle: argon, difluorochloromethane,

trifluoromethane, tetrafluoromethane, ethylene, ethane. For the power plant operating according to the Brayton cycle we chose ethylene, trifluorochloromethane, tetrafluoromethane. According to the results of calculations, as well as according to the results of analyzing the dependence of power on the degree of increasing the pressure, we suggest several cryogenic substances that show the best performance among the considered working fluids.

*Cryogenic power plant; working fluid*

---

*Citation:* Eliseev I.A., Tochenov V.V., Panshin R.A. Increasing the efficiency of low-temperature power plants by selecting the optimal working fluid of the auxiliary circuit. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 4. P. 79-88. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-79-88

### References

1. Barmin I.V., Kunis I.D. *Szhizhennyy prirodnyy gaz vchera, segodnya, zavtra* [Liquefied natural gas yesterday, today, tomorrow]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2009. 256 p.
2. Arkharov A.M., Belyakov V.P., Mikulin E.I. *Kriogennyye sistemy* [Cryogenic systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 535 p.