

**Александр Борисович ШАБАРОВ<sup>1</sup>**  
**Альбина Вольфовна ШИРШОВА<sup>2</sup>**  
**Дмитрий Евгеньевич САГАЙДАЧНЫЙ<sup>3</sup>**

УДК 625.13

## **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ И ГАЗОГИДРАТНОМ ТОПЛИВЕ**

<sup>1</sup> доктор технических наук, профессор  
кафедры механики многофазных систем,  
Физико-технический институт,  
Тюменский государственный университет  
kaf\_mms@utmn.ru

<sup>2</sup> кандидат физико-математических наук, доцент  
кафедры механики многофазных систем,  
Физико-технический институт,  
Тюменский государственный университет  
albstain@gmail.com

<sup>3</sup> магистрант кафедры механики многофазных систем,  
Физико-технический институт,  
Тюменский государственный университет  
sagadim@mail.ru

### **Аннотация**

Предложена и обоснована для проектирования, изготовления и применения в России и других странах газопаротурбинная установка (ГПТУ) с промежуточным охлаждением в процессе сжатия, работающая на природном газе или газогидратном топливе. Предложена принципиальная схема диссоциатора для ГПТУ на газогидратном топливе. Приведена и доведена до практического применения методика термодинамического

---

**Цитирование:** Шабаров А. Б. Термодинамический расчет и параметры энергетических газопаротурбинных установок на природном газе и газогидратном топливе / А. Б. Шабаров, А. В. Ширшова, Д. Е. Сагайдачный // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 1. С. 22-36.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-22-36

---

расчета, а также компьютерная программа, основанная на едином для всех узлов и установки в целом уравнении первого начала термодинамики для открытых систем с источниками и стоками рабочих тел с различной полной энтальпией с учетом подвода и отвода механической и тепловой мощности. Выявлены оптимальные степени сжатия в компрессорах из условий максимальных КПД и мощности установки. Показано, что при рациональных параметрах ГПТУ предложенной термодинамической схемы может быть создана установка на газовом или газогидратном топливе с тепловой экономичностью на уровне 50% при начальной температуре газа перед турбиной высокого давления равной 1500 К. При расчете термодинамических параметров установок, а также при получении, транспорте, хранении и разложении газогидратного топлива могут быть использованы результаты исследований свойств газогидратов, полученные в Тюменском государственном университете. Разработанный вариант ГПТУ может быть рекомендован для выполнения ОКР по созданию установки, использующей газогидраты, полученные из нефтяных попутных газов. Результаты выполненных исследований показывают перспективность для промышленного внедрения ГПТУ на газогидратном топливе.

#### **Ключевые слова**

Газопаротурбинная установка, охлаждение в процессе сжатия, разложение газогидратов, схема диссоциатора, коэффициент полезного действия, мощность установки.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-22-36**

#### **Введение**

Для энергетики России актуальной проблемой является разработка, производство и эксплуатация высокоэффективных установок мощностью 100 МВт и выше, а так же установки в диапазоне мощностей 6-60 МВт. Наивысшей термодинамической эффективностью обладают тепловые двигатели (газотурбинные, парогазовые, газопаровые и др.), цикл которых максимально приближен к циклу Карно. Для приближения к циклу Карно необходимо без диссипативных потерь проводить изотермическое (с отводом тепла), а затем адиабатическое сжатие, после чего проводить изотермическое (с подводом тепла), а затем адиабатическое расширение с отводом механической мощности. Процесс изотермического расширения с подводом тепла в камерах сгорания промежуточного подогрева газа предложен Г. И. Зотиковым, В. В. Уваровым и др. в [1], где теоретически доказано, что наилучшим приближением к циклу Карно является изотермо-адиабатический цикл с 3-4 компрессорами, между которыми устанавливаются промежуточные воздухоохладители, а затем компрессор высокого давления с высокой степенью сжатия. Процесс подвода тепла проводится при практически постоянном давлении или постоянном объеме, затем проводится расширение в 2-3 турбинах с промежуточными камерами подогрева газа и турбиной низкого давления с увеличенной степенью расширения. Проект энергетической установки изотермо-адиабатического цикла по схеме МВТУ им. Баумана мощностью 200 МВт был выполнен в 1967 году на Харьковском турбогенераторном заводе, однако не

освоен отечественной промышленностью. Установки мощностью 100 МВт с двумя компрессорами и двумя турбинами на Ленинградском металлическом заводе выпускались и успешно эксплуатировались в энергетике [6]. Однако, в дальнейшем в нашей стране, в отличие от США и Японии, разрабатывались лишь малоэффективные установки с простейшей тепловой схемой. Эта техническая политика привела к ограничению по единичной мощности и экологичности.

Наибольший эффект по повышению КПД и мощности ГТУ дает первый шаг приближения к изотермо-адиабатическому сжатию — конструкция с компрессором низкого давления (КНД), промежуточным воздухоохладителем (ВО) и компрессором высокого давления (КВД), степень сжатия воздуха в котором больше степени сжатия в КНД в 2,6-2,8 раза [8; 9]. Такие установки были предложены, а затем подробно исследованы в России, однако производство и экспорт таких установок налажены в США фирмой General Electric, например, LMS 100 [3]. Дальнейшим развитием этого научно-технического направления, по нашему мнению, может стать выполнение НИОКР и производство в России газотурбинных установок с промощением на органическом и, в частности, газогидратном топливе, чему и посвящена данная статья.

По данным Международного энергетического агентства (МЭА) запасы газогидратного топлива на Земле превосходят потенциальные запасы нефти и газа и оценены величиной эквивалентной по энергии природного газа в 468 трлн. куб. м. [2].

В настоящей работе предлагается исследовать и создать в России газопаротурбинные установки с промежуточным охлаждением (ГПТУ ПО) и использовать в качестве топлива газогидраты природного или попутного нефтяного газа для установок 6-60 МВт и более.

По современным общепринятым представлениям [12] газогидраты (ГГ) — это кристаллические соединения, образующиеся при определенных термобарических условиях из воды и газа. Один объем этих соединений содержит примерно 180 объемов газа энергоносителя. В общем виде состав газовых гидратов описывается формулой  $M \cdot n \cdot H_2O$ , где  $M$  — молекула газа – гидратообразователя,  $n$  — число молекул воды, приходящихся на одну включенную молекулу газа, причем  $n$  — переменное число, зависящее от типа гидратообразователя, давления и температуры. Использование газогидратов для получения газового топлива предполагает наличие трех различных систем: систему производства искусственного газогидрата, систему транспорта и хранения газогидратов и систему подачи топлива и воды в энергетическую установку. Производство газогидратов в промышленных масштабах наложено в Японии компаниями Mitsui Engineering & Shipbuilding (MES) и Chugoku Electric Power (CEP) [5]. В России также ведутся разработки по интенсификации процесса искусственного газогидратообразования с применением ударно-волнового воздействия, "сухой воды" и вихревой трубки Ранка-Хилша [12].

Получившийся газогидрат в виде гранул диаметром около 20 мм при небольших давлениях и температурах ниже 273 К относительно долго может

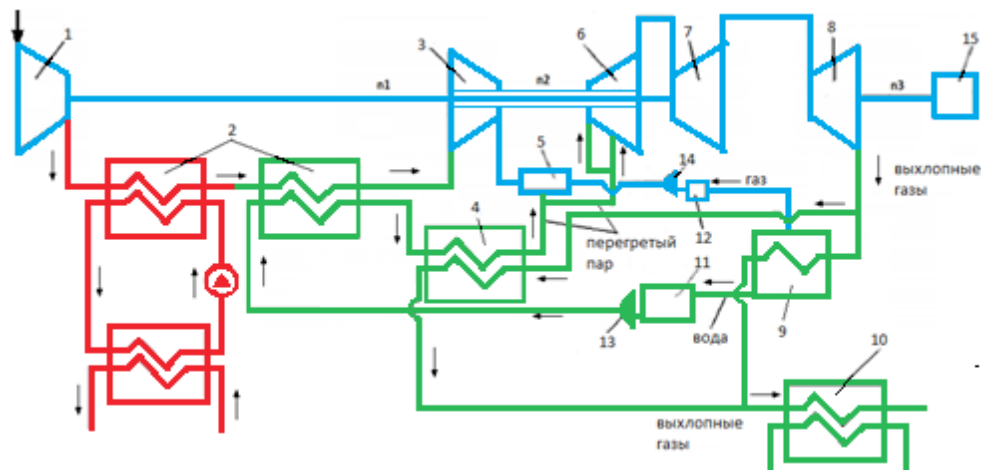


Рис. 1. Схема газопаротурбинной установки на газогидратном топливе

Fig. 1. Scheme of the gas steam turbine plant which is use the gas hydrate fuel

храниться в стабильном состоянии за счет эффектов самоконсервации или принудительной консервации ледяной коркой [11] и затем транспортироваться в специальных контейнерах. При использовании баллонов для сжатого газа из углеродистой или легированной стали относительная масса тары составляет 7,35 кг стали на 1 кг газа (метана) соответственно. При использовании газогидратов этот показатель равен 6,6 кг стали и воды на 1 кг газа (метана) [4]. При разложении газогидрата выделяется дистиллированная вода, не требующая дополнительной очистки [11]. В лаборатории кафедры ММС Тюменского государственного университета с 2001 г. и до настоящего времени изучаются теплофизические свойства газогидратов, процессы их получения и диссоциации [7; 12]. Производство газогидратов может быть налажено на нефтяных промыслах из нефтяного попутного газа [12]. Доставка газогидратов в контейнерах до места потребления может осуществляться автотранспортом.

Схема предлагаемой ГПТУ с ПО приведена на рис. 1. Часть отработанных газов газопаротурбинной установки из силовой турбины 8 идет в диссоциатор 9 для подогрева газогидратов и разложения их на газ и воду. Выделившаяся при разложении вода направляется в резервуар для хранения воды 11, а выделившаяся газ поступает в газгольдер 12. Выделившаяся вода насосом с электродвигателем 13 закачивается в воздухоохладитель, где нагревается, а газ из газгольдера 12 с помощью компрессора с электродвигателем 14 под давлением закачивается в камеру сгорания 5. В соответствии с рекомендациями работ [8; 9] промежуточный воздухоохладитель 2 целесообразно выполнять в виде 2-х последовательно расположенных секций. В первой секции температура воздуха понижается от 443,6 К до 369,1 К, а во второй секции до 329,5 К. Используется замкнутый промежуточный водяной контур в первой секции. Во вторую секцию подводится вода из диссоциатора. Другая часть выхлопных газов идет в котел-пароперегреватель 4 для дополнительного подогрева воды после воз-

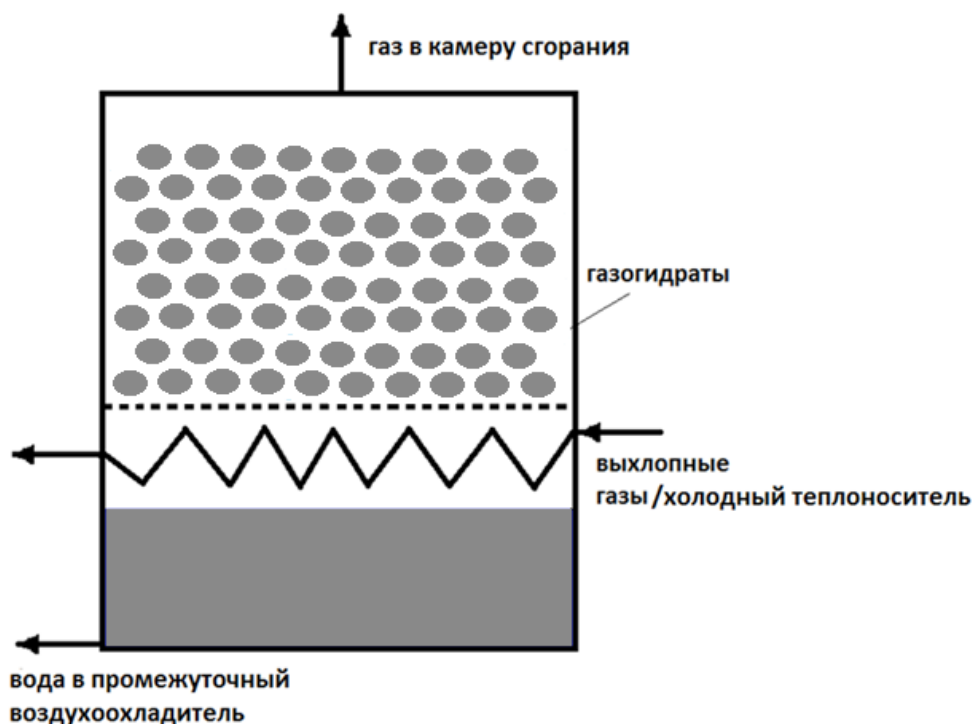


Рис. 2. Схема диссоциатора для ГПТУ на газогидратном топливе

Fig. 2. Scheme of the dissociator for the gas steam turbine plant which is use the gas hydrate fuel

духоохладителя 2 до состояния перегретого пара. Большая часть пара (“энергетический пар”) поступает в турбину высокого давления 6, где часть пара охлаждает детали, а другая часть, смешиваясь с продуктами сгорания, приводит во вращение турбину высокого давления 6, турбину низкого давления 7 и силовую турбину 8. Силовая турбина 8 приводит в движение нагрузку 15, например, электрогенератор. Выхлопные газы проходят через конденсатор 10 для выделения из отработавших газов воды.

В ГПТУ с промежуточным охлаждением необходимо провести процесс разложения газогидратов в диссоциаторе (рис. 2) с получением топливного газа и воды. Этот процесс происходит за счет нагрева газогидрата выше равновесной температуры. Выделяющийся при этом газ поступает в газгольдер, затем дожимается компрессором и подается в топливную систему двигателя, а выделившаяся вода поступает в промежуточный воздухоохладитель, где нагревается за счет воздуха за КНД. Затем вода прогревается, испаряется и перегревается в котле-пароперегревателе и подается в турбину высокого давления. В качестве источника тепла для интенсификации разложения ГГ можно использовать продукты сгорания за силовой турбиной.

Термодинамический расчет элементов ГПТУ на газогидратном топливе основан на следующих базовых соотношениях [9]:

первое начало термодинамики для открытых систем с источниками и стоками рабочего тела, имеющими различную энтальпию, с учетом подвода и отвода механической и тепловой мощности:

$$\sum_{j=1}^m i_j^* \cdot G_j - \sum_{i=1}^n i_i^* \cdot G_i = N_{\text{вн}} + Q_{\text{вн}}, \quad (1)$$

где  $i, j$  — номер подвода, отвода массы;  $i_j^*, i_i^*$  — полная удельная энтальпия подводимых и отводимых масс с расходами  $G$ , кг/с;  $N_{\text{вн}}$  — подводимая ( $>0$ ) или отводимая ( $<0$ ) механическая мощность;  $Q_{\text{вн}}$  — подводимая ( $>0$ ) или отводимая ( $<0$ ) тепловая мощность [кВт]. Следует отметить, что соотношение (1) используется нами для расчета всех узлов установки (входное и выходное устройства, компрессора, камера сгорания, турбины, теплообменники аппараты), а также ГПТУ в целом.

Уравнение реальных процессов в компрессорах и турбинах:

$$T_2^* = T_1^* \cdot \pi_k^{*\frac{k-1}{k}}; T_4^* = T_3^* \cdot \pi_m^{*\frac{(1-k) \cdot \eta_{mn}}{k}}, \quad (2)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют параметрам при входе и выходе из компрессоров; 3 и 4 — параметрам при входе и выходе из турбин;  $\pi_k^*, \pi_m^*$  — степени сжатия и расширения;  $\eta_{кп}, \eta_{мт}$  — политропические КПД компрессоров и турбин,  $k$  — показатель адиабаты, зависящий от температуры и состава рабочего тела [1].

Расход воздуха на охлаждение турбин зависит от температуры и типа системы охлаждения и принят нами в соответствии с [3]:

$$G_{\text{охл}} = G_{1200} + (G_{1800} - G_{1200}) \cdot (0,8\bar{x}^2 + 0,2\bar{x}), \quad (3)$$

где  $G_{1200}, G_{1800}$  — расходы охлаждающего рабочего тела (кг/с), зависящие от типа и параметров системы охлаждения при температурах газа перед турбиной высокого давления  $T_3^*=1200$  и  $1800$  °С,  $\bar{x} = \frac{T - 1200}{600}$  — уравнение баланса мощности на валах:

$$N_k = N_m \cdot \eta_{\text{мех}}, \quad (4)$$

где  $N_k$  — мощность компрессоров,  $N_m$  — мощность турбин,  $\eta_{\text{мех}}$  — механический КПД, учитывающий потери энергии в подшипниках.

Система уравнений (1)-(4) записывается для отдельных узлов и ГПТУ в целом и дополняется известными рекомендациями [1] о потерях в узлах и теплофизических параметрах.

Далее в качестве примера приведены результаты расчета ГПТУ ПО со следующими исходными данными: температура воздуха  $T_a=288,15$  К; атмосферное давление  $P_a=0,101$  МПа; температура топливного газа  $T_r=293$  К; температура за камерой сгорания  $T_3=1500$  К; расход воздуха через компрессора  $G_b=200$  кг/с; отношение степеней сжатия в КНД и КВД  $\pi_{к1}/\pi_{к2}=3/8$ ; коэффициент полного давления при входе  $\sigma_{\text{вх}} = 0,99$ ; политропный КПД компрессоров  $\eta_{\text{пк}} = 0,90$ ; коэффициент полноты сгорания  $h_{\text{кс}}=0,99$ ; коэффициент полного давления в КС  $\sigma_{\text{кс}} = 0,97$ ; политропный КПД турбин  $h_{\text{пт}}=0,91$ ; коэффициент полного давления при выходе  $\sigma_{\text{вых}} = 0,995$ ; скорость выхлопных газов при выходе из силовой тур-

бины 160 м/с; низшая теплотворная способность топлива  $Q_H^p=50000$  кДж/кг; стехиометрический коэффициент  $L_0=16,7$ ; теплоемкость топлива  $C_{pr}=2,3$  кДж/кг\*К; удельная газовая постоянная для воздуха  $R=0,287$  кДж/кг\*К. Результаты расчетов ГТУ простейшего цикла, ГТУ ПО (с промежуточным охлаждением) и ГПТУ ПО представлены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетные параметры  
основных узлов и установок

Table 1

The calculated parameters  
of the main nodes and plants

Параметры	Обозначения	ГТУ	ГТУ+ПО	ГПТУ+ПО
1	2	3	4	5
Компрессор низкого давления				
Степень сжатия КНД	$\pi_{k1}$ , б/р	2,372	3,623	3,8723
Температура воздуха за КНД	$T_{21}$ , К	397,56	434,36	443,61
Давление за КНД	$P_{21}$ , МПа	0,238	0,363	0,389
Средняя температура в КНД	$T_{cp}$ , К	333,9705	361,26	365,88
Удельная изобарная теплоемкость	$C_p$ , кДж/кг·К	1,016	1,019	1,020
Удельная работа системы в КНД	$l_{k1}$ , кДж/кг	186,3	298,1	317,12
Мощность КНД	$N_{k1}$ , кВт	18 629,32	29 810,88	31 712,54
Промежуточный воздухоохладитель				
Температура воздуха при входе в ВО	$T_{21}$ , К		434,36	443,61
Давление воздуха при входе в ВО	$P_{21}$ , МПа		0,36	0,385
Температура воды при входе в ВО	$T_{w\text{ вх}}$ , К		278	278
Температура воздуха при выходе из ВО	$T_{12}$ , К		320,39	329,5
Температура воды при выходе из ВО	$T_{w\text{ вых}}$ , К		288,39	297,5
Давление воздуха при выходе из ВО	$P_{12}$ , МПа		0,359	0,385
Передаваемая тепловая мощность	$Q_{\text{во}}$ , кВт		23 204	27 300
Компрессор высокого давления				
Степень сжатия КВД	$\pi_{k2}$ , б/р	6,325	9,661	10,328
Давление за КВД	$P_2$ , МПа	1,505	3,476	3,972
Температура за КВД	$T_2$ , К	674,96	652,73	683,95
Средняя температура в КВД	$T_{cp}$ , К	527,38	486,56	506,72
Удельная изобарная теплоемкость	$C_p$ , кДж/кг·К	1,04	1,036	1,041

Продолжение таблицы 1

Table 1 (continue)

1	2	3	4	5
Показатель адиабаты	$k$ , б/р	1,378	1,381	1,376
Удельная работа системы в КВД	$l_{k2}$ , кДж/кг	615,42	688,52	736,6
Мощность КВД	$N_{k2}$ , кВт	61 542,2	68 851,72	73 660,08
Камера сгорания				
Давление за КС	$p_3$ , Мпа	1,459	3,372	3,853
Уд. изобарная теплоемкость ЧПС	$C_p$ при $T_3(\alpha=1)$ , кДж/кг·К	1,185	1,185	1,185
Уд. изобарная теплоемкость перед КС	$C_p$ при $T_2(\alpha=\infty)$ , кДж/кг·К	1,019	1,019	1,019
Уд. изобарная теплоемкость остат. возд.	$C_p$ при $T_3(\alpha=\infty)$ , кДж/кг·К	1,089	1,089	1,089
Уд. энтальпия остаточного воздуха	$i_{в3}$ , кДж/кг	1 634	1 634	1 634
Уд. энтальпия воздуха перед КС	$i_{в2}$ , кДж/кг	1 375,19	1 327,796	1 394,40
Уд. энтальпия ЧПС	$i_{чпс}$ , кДж/кг	3 553,5	3 553,5	3 553,5
Уд. энтальпия топлива	$i_f$ , кДж/кг	1 348,49	1 348,49	1 348,49
Коэффициент избытка воздуха	$\alpha$ , б/р	2,911	2,84	2,941
Расход ЧПС	$G_{чпс}$ , кг/с	65,53	67,17	72,072
Расход воздуха	$G_v$ , кг/с	118,17	116,62	132,00
Тепловая мощность, подвод. к раб. телу	$Q_{кс}$ , кВт	183 260,1	187 848,6	201 555,96
Расход воздуха в КС	$G_{кс}$ , кг/с	180	180	200
Расход топлива	$G_f$ , кг/с	3,702	3,794	4,072
Расход пара	$G_{пар}$ , кг/с	-	-	25
Турбина высокого давления				
Расход смеси в ТВД	$G_{твд}$ , кг/с	183,7	183,8	204,1
Мощность ТВД	$N_{твд}$ , кВт	67 628,8	75 661,24	80 945,1
Удельная работа системы в ТВД	$l_{т1}$ , кДж/кг	736,28	823,32	793,3
Температура за ТВД	$T_{41}$ , К	1 202,6	1 167,08	1 199,18
Средняя температура в ТВД	$T_{cp}$ , К	1 351,3	1 333,54	1 349,59
Удельная изобарная теплоемкость	$C_p$ , кДж/кг·К	1,239	1,238	1,321
Показатель адиабаты	$k$ , б/р	1,304	1,304	1,28



Продолжение таблицы 1

Table 1 (continue)

1	2	3	4	5
Степень расширения в ТВД	$\pi_{Т1}$ , б/р	2,833	3,258	3,076
Давление за ТВД	$P_{41}$ , МПа	0,515	1,039	1,253
Турбина низкого давления				
Мощность ТНД	$N_{ТНД}$ , кВт	20 471,8	32 759,21	34 849
Расход смеси в ТНД	$G_{ТНД}$ , кг/с	203,7	203,8	224
Удельная работа системы в ТНД	$l_{Т2}$ , кДж/кг	201	321,5	311,05
Температура охлаждающего возд.	$T_{41охл}$ , К	1 097,26	1 064,434	1 096,53
Температура за ТНД	$T_{42}$ , К	1 119,87	1 033,857	1 079,41
Средняя температура в ТНД	$T_{ср}$ , К	1 161,35	1 100,609	1 139,54
Удельная изобарная теплоемкость	$C_p$ , кДж/кг·К	1,212	1,205	1,294
Показатель адиабаты	$k$ , б/р	1,313	1,315	1,287
Степень расширения в ТНД	$\pi_{Т2}$ , б/р	1,39	1,745	1,682
Давление за ТНД	$P_{42}$ , МПа	0,371	0,593	0,745
Силовая турбина				
Расход продуктов сгорания в СТ	$G_{сг}$ , кг/с	203,7	203,8	224,07
Давление за СТ	$P_5$ , Мпа	0,10368	0,106125	0,10597
Степень расширения в СТ	$\pi_{сг}$ , б/р	3,574	5,589	7,027
Температура за СТ	$T_5$ , К	844,77	702,89	719,58
Средняя температура в СТ	$T_{ср}$ , К	982,32	868,37	899,496
Удельная изобарная теплоемкость	$C_p$ , кДж/кг·К	1,187	1,172	1,263
Показатель адиабаты	$k$ , б/р	1,321	1,327	1,296
Мощность СТ	$N_{сг}$ , кВт	65 838	78 244	100 805
Удельная работа системы в СТ	$l_e$ , кДж/кг	649,58	771,64	904,2
Расход смеси в СТ	$G_p$ , кг/с	202,8	202,8	222,97
Параметры установки				
Суммарная степень сжатия компрессоров	$\pi_k$ , б/р	15	35	40
Давление за СТ	$P_5$ , Мпа	0,10368	0,106125	0,10597
Степень расширения в СТ	$\pi_{сг}$ , б/р	3,574	5,589	7,027
Температура за СТ	$T_5$ , К	844,77	702,89	719,58

Окончание таблицы 1

Table 1 (end)

1	2	3	4	5
Мощность СТ	$N_{\text{стр}}$ кВт	65 838	78 244	100 805
Удельная работа системы в СТ	$l_e$ , кДж/кг	649,58	771,64	904,2
Расход смеси в СТ	$G_p$ , кг/с	202,7	202,8	222,97
Коэффициент полезного действия	$\eta_e$ , б/р	0,356	0,412	0,495

В ГПТУ с ПО используется также котел-пароперегреватель, в котором вода из ВО нагревается, происходит кипение и перегрев пара до температуры 500 К, и направляется в турбину высокого давления, в систему охлаждения, а часть смешивается с продуктами сгорания. Мощность нагрева для разложения газогидрата равна 9 772 кВт. Тепловая мощность для нагрева и испарения воды, а также перегрева пара равна 58 053 кВт. Расход природного газа  $G_T = 4,072$  кг/с и газогидратов  $G_{\text{гт}} = 27,146$  кг/с при мощности  $N_e = 100$  МВт. Изменение КПД и мощности установок на газогидратном топливе при изменении степени сжатия и принятой начальной температуре при входе в ТВД приведены на рис. 3 и 4.

Следует отметить, что при расчете параметров установок использован достигнутый в России уровень [1] экономичности турбомашин и теплообменных аппаратов.

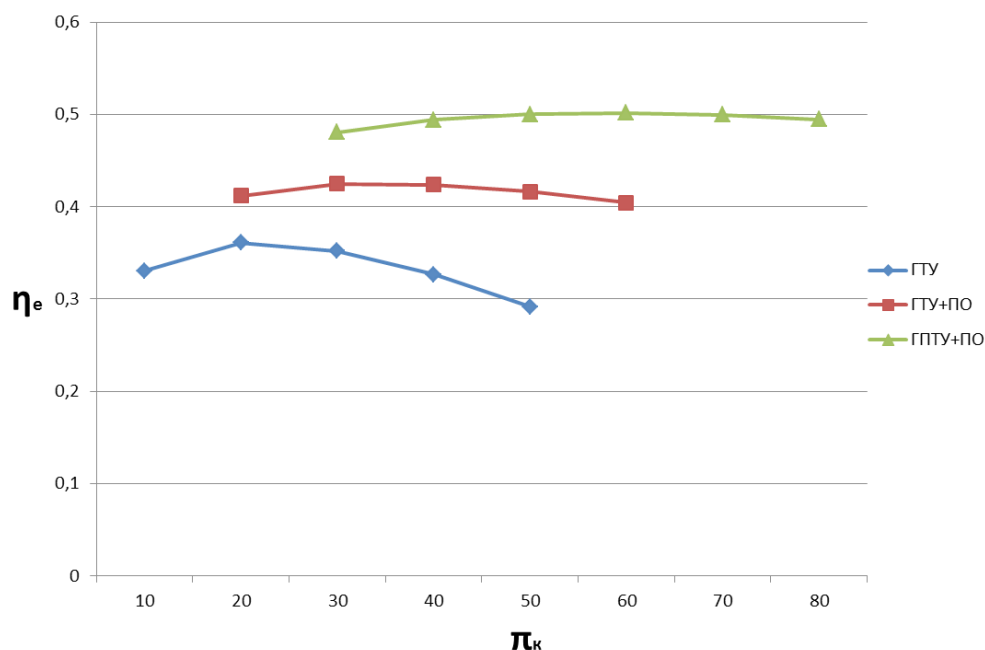


Рис. 3. График зависимости КПД от степени сжатия в установках

Fig. 3. Energy conversion efficiency depending on the compression ratio in the plants

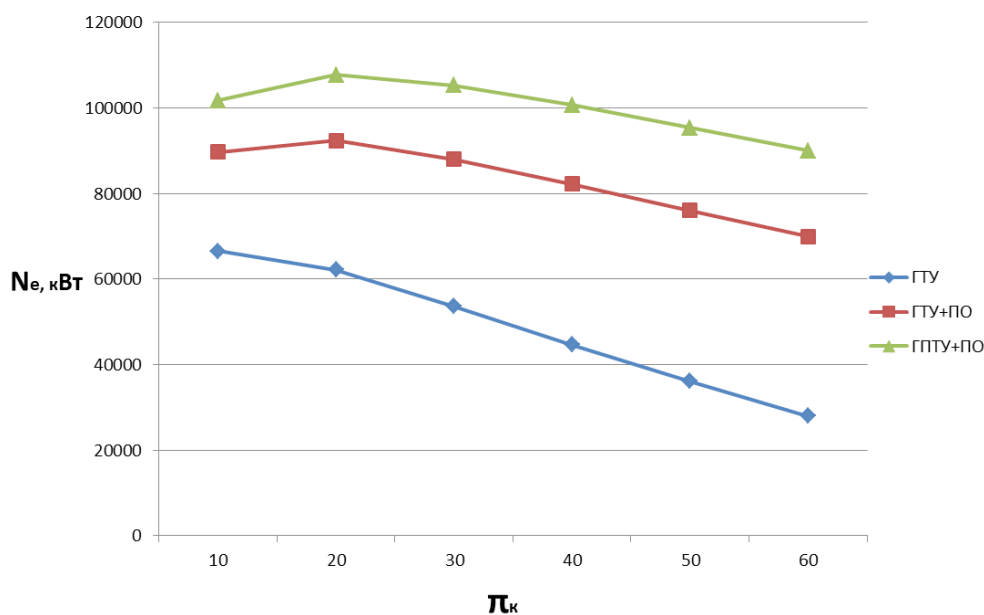


Рис. 4. График зависимости мощности от степени сжатия в установках

Fig. 4. Power depending on the compression ratio in the plants

#### Основные результаты и выводы

1. Предложена газопаротурбинная установка (ГПТУ) на газогидратном топливе с охлаждением в процессе сжатия, обоснован выбор конструктивной схемы и параметров ГПТУ.
2. Разработана методика и компьютерная программа расчета ГПТУ с промежуточным воздухоохладителем и паровым охлаждением элементов газовых турбин.
3. Выполнен расчетно-параметрический анализ энергетических и транспортных ГПТУ на газогидратном топливе, который позволил обосновать параметры перспективных высокоэкономичных ГПТУ с КПД на уровне 50% при температуре газа перед турбиной  $T_3^* = 1500$  К.
4. В лаборатории Тюменского государственного университета выполнены экспериментальные исследования теплофизических параметров газогидратов, которые могут быть использованы при проектировании ГПТУ на газогидратном топливе.
5. Разработанный вариант ГПТУ может быть рекомендован для выполнения ОКР по созданию установки, использующей газогидраты, полученные из нефтяных попутных газов.
6. Результаты выполненных исследований показывают перспективность промышленного внедрения ГПТУ на газогидратном топливе.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Арбеков А. Н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / А. Н. Арбеков, под общей редакцией А. Ю. Вараксина. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 677 с.
2. Газогидраты перспективы разработки. URL: [http://bizon.ru/news/view/news\\_id/46953](http://bizon.ru/news/view/news_id/46953)
3. Газопаротурбинная установка LMS100. URL: <https://dmenergy.ru/ge-lms100>
4. Лавров В. Г. Способ питания двигателя внутреннего сгорания газовым топливом (метаном) с помощью газогидратных образований / В. Г. Лавров // патент РФ № 2000110447/06.
5. Накоряков В. Е. Формирование газовых гидратов ударно-волновым воздействием / В. Е. Накоряков, В. Е. Донцов, А. А. Чернов // Доклады РАН. 2006. С. 190-193.
6. Ольховский Г. Г. Энергетические газотурбинные установки / Г. Г. Ольховский. М.: Энерго-атомиздат, 1985. 304 с.
7. Шабаров А. Б. Проектирование установки ускоренного роста газогидрата из ледяных частиц микронного размера в потоке газа / А. Б. Шабаров, М. Ю. Данько, А. В. Ширшова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2011. № 7. С. 46-51.
8. Шабаров А. Б. Газопаровая установка с охлаждением воздуха при сжатии / А. Б. Шабаров, К. В. Кривохижа // Теплофизика, гидродинамика, теплотехника: Сборник научных трудов. Тюмень: ТГУ, 2002. С. 127-133.
9. Шабаров А. Б. Газотурбинные установки с охлаждением воздуха в процессе сжатия для ком-прессорных станций магистральных трубопроводов / А. Б. Шабаров, К. В. Кривохижа // Энергосберегающие технологии в нефтегазовой промышленности России: Материалы меж-дународного совещания. Тюмень: ТГНГУ, 2001. Часть 2. С. 83-90.
10. Шабаров А. Б. Экспериментальное исследование газогидрообразования пропан-бутановой смеси / А. Б. Шабаров, А. В. Ширшова, М. Ю. Данько, Н. С. Комисарова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2009. № 6. С. 73-82.
11. Ширшова А. В. Исследование газогидратов. Учебно-методическое пособие для студентов направления «Техническая физика» / А. В. Ширшова. Тюмень: ТюмГУ, 2016. 50 с.
12. Ширшова А. В. Способ утилизации попутного нефтяного газа / А. В. Ширшова, М. Ю. Данько // Патент РФ № 2488625. Дата регистрации 27.07.2013.
13. Якушев В. С. Эффект самоконсервации в газогидратах / В. С. Якушев, В. А. Истомина // Физика и химия льда. 1993. С. 136-139.

**Aleksandr B. SHABAROV<sup>1</sup>**  
**Albina V. SHIRSHOVA<sup>2</sup>**  
**Dmitriy E. SAGAIACHNY<sup>3</sup>**

**THERMODYNAMIC CALCULATION  
AND PARAMETERS OF COMBINED GAS  
AND STEAM TURBINE POWER PLANT  
ON NATURAL GAS AND GAS HYDRATE FUEL**

<sup>1</sup> Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
Department of Multiphase Systems Mechanics,  
Institute of Physics and Technology, Tyumen State University  
kaf\_mms@utmn.ru

<sup>2</sup> Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,  
Department of Multiphase Systems Mechanics,  
Institute of Physics and Technology, Tyumen State University  
albstain@gmail.com

<sup>3</sup> Master Degree Student,  
Department of Multiphase Systems Mechanics,  
Institute of Physics and Technology, Tyumen State University  
sagadim@mail.ru

**Abstract**

A Combined gas and steam (COGAS) power plant with intermediate cooling in the process of com-pression operating on natural gas or gas hydrate fuel is proposed and justified for the design, manu-facturing and use in Russia and other countries. A schematic diagram of the dissociator for COGAS power plant on gas hydrate fuel is proposed. The method of thermodynamic calculation and a computer program based on a single equation for all nodes and a power plant as a whole equation of the first law of thermodynamics for open systems with sources and sinks of working bodies with different total enthalpy are considered and brought to practical use, taking into account the supply and removal of mechanical and thermal power. The optimal compression ratios in compressors are determined from the conditionally

---

**Citation:** Shabarov A. B., Shirshova A. V., Sagaidachny D. E. 2017. “Thermodynamic Calculation and Parameters of Combined Gas and Steam Turbine Power Plant on Natural Gas and Gas Hydrate Fuel”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 3, no 1, pp. 22-36.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-22-36

---

maximum efficiency and output of the plant. It is shown that with rational parameters of the COGAS power plant with the proposed thermodynamic scheme, a gas or gas hydrate fuel plant with a thermal efficiency of 50% can be created with an initial gas temperature in front of a high-pressure turbine of 1500 K. When calculating the thermodynamic parameters of the production, transport, storage and decomposition of the gas hydrate fuel, the results of the thermodynamic properties of gas hydrates obtained at the Tyumen State University can be used. The developed version of COGAS power plant can be recommended for the experimental development and the creation of a facility using gas hydrates obtained from petroleum associated gases. The results of the performed studies show the prospects for the industrial introduction of COGAS power plant on gas hydrate fuel.

**Key words**

Gas-steam turbine plant, cooling in the process of compression, decomposition of gas hydrates, dis-sociator circuit, efficiency, plant power.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-22-36**

**REFERENCES**

1. Arbekov A. N., Varaksina A. Yu. (eds.). 2016. *Teoriya i proektirovanie gazoturbinnnykh i kom-binirovannykh ustanovok: uchebnyk dlya vuzov. 3-e izd., pererab. i dop.* [Theory and Design of the Gas Turbine and Combined Plants: a Textbook for Universities. 3<sup>rd</sup> Edition, Revised and En-larged]. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University.
2. *Gazogidraty perspektivy razrabotki* [The Development Prospects of Gas Hydrates]. [http://bizon.ru/news/view/news\\_id/46953](http://bizon.ru/news/view/news_id/46953)
3. *Gazoparoturbinnaya ustanovka LMS100* [Gas-turbine plant LMS100]. <https://dmenergy.ru/ge-lms100>
4. Lavrov V. G. 2000. Russian Federation Patent 2000110447/06 “Sposob pitaniya dvigatelya vnu-trennego sgoraniya gazovym toplivom (metanom) s pomoshch'yu gazogidratnykh obrazovaniy” [The method for supplying an internal combustion engine with gas fuel (methane) using gas hydrates].
5. Nakoryakov V. E., Dontsov V. E., Chernov A. A. 2006. “Formirovanie gazovykh gidratov udarno-volnovym vozdeystviem” [Formation of Gas Hydrates by Shock-Wave Action]. *Doklady Ros-siyskoy akademii nauk*, pp. 190-193.
6. Olkhovskiy G. G. 1985. *Energeticheskie gazoturbinnnye ustanovki* [Power gas-turbine plants]. Mos-cow: Energoatomizdat.
7. Shabarov A. B., Danko M. Yu., Shirshova A. V. 2011. “Proektirovanie ustanovki uskorenogo rosta gazogidrata iz ledyanykh chastits mikronnogo razmera v potoke gaza” [Development of In-stallation of Gas Hydrates Accelerated Growth from the Micron-Sized Icy Particles in Gas Flow]. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, no 7, pp. 46-51.
8. Shabarov A. B., Krivokhizha K. V. 2002. “Gazoparovaya ustanovka s okhlazhdeniem vozdukha pri szhatii” [Gas-Vapor Plant with Air Cooling under Compression].

- Teplofizika, gidrodinamika, teplotekhnika: Sbornik nauchnykh trudov. Tyumen: Tyumen State University, pp. 127-133.
9. Shabarov A. B., Krivokhizha K. V. 2001. "Gazoturbinnye ustanovki s okhlazhdeniem vozdukh v protsesse szhatiya dlya kompressornykh stantsiy magistral'nykh truboprovodov" [Gas-Turbine Plants with Air Cooling during Compression for the Compressor Stations of Main Pipelines]. Ener-gosberegayushchie tekhnologii v neftegazovoy promyshlennosti Rossii: Materialy mezhdunarod-nogo soveshchaniya. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, part 2, pp. 83-90.
  10. Shabarov A. B., Shirshova A. V., Danko M. Yu., Komisarova N. S. 2009. "Eksperimental'noe is-sledovanie gazogidroobrazovaniya propan-butanovoy smesi" [Experimental Study of Gas Hydrate Formation of Propane-Butane Mixture]. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, no 6, pp. 73-82.
  11. Shirshova A. V. 2016. Issledovanie gazogidratov. Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov napravleniya "Tekhnicheskaya fizika" [Investigation of gas hydrates. Teaching-methodical manual for students of the direction "Technical Physics"]. Tyumen: Tyumen State University.
  12. Shirshova A. V., Danko M. Yu. 2013. Russian Federation Patent 2488625 "Sposob utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza" [Method of the Utilization of Associated Petroleum Gas], July 27.
  13. Yakushev V. S., Istomin V. A. 1993. "Effekt samokonservatsii v gazogidratakh" [The effect of self-preservation in gas hydrates]. Fizika i khimiya l'da, pp. 136-139.