

УДК 621.438.082  
DOI 10.47049/2226-1893-2021-1-72-80

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ  
ОТКРЫТЫХ ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК.  
1. ЦИКЛ С РАСШИРЕНИЕМ ГАЗОВ В ТУРБИНЕ ДО ДАВЛЕНИЯ  
НИЖЕ АТМОСФЕРНОГО И ЦИКЛ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ  
ВОЗДУХА, ВСАСЫВАЕМОГО КОМПРЕССОРОМ**

**А.А. Вассерман**

доктор технических наук, профессор кафедры  
«Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация»

**А.Г. Слынько**

кандидат технических наук, профессор кафедры  
«Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация»

*Одесский национальный морской университет, Украина, Одесса*

**Аннотация.** Предлагаются новые термодинамические циклы открытых газотурбинных установок (ГТУ): цикл с расширением газов в турбине до давления ниже атмосферного и цикл с предварительным охлаждением воздуха, всасываемого компрессором. Расчёты показали, что работа и термический КПД ГТУ при расширении газов в турбине до давления ниже атмосферного (0,05 МПа) повышаются на 19,7 и 24,5 % соответственно. В цикле с предварительным охлаждением воздуха до температуры минус 30 °С работа цикла повышается на 17,6 %. Термический КПД при этом не изменяется, так как степень повышения давления при этом та же. Учитывая, что процессы охлаждения газов и воздуха в предлагаемых циклах осуществляются с помощью утилизационной холодильной установки («бесплатны»), некоторые конструктивные усложнения таких модифицированных ГТУ оправдываются такими существенными повышениями основных характеристик циклов.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, утилизационная холодильная установка, расширение в вакуум, охлаждение воздуха, термический КПД, удельная мощность.

УДК 621.438.082  
DOI 10.47049/2226-1893-2021-1-72-80

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДКРИТИХ  
ГАЗОТУРБИНИХ УСТАНОВОК. 1. ЦИКЛ З РОЗШИРЕННЯМ ГАЗІВ У ТУРБІНІ  
ДО ТИСКУ НИЖЧЕ АТМОСФЕРНОГО ТА ЦИКЛ З ПОПЕРЕДНІМ  
ОХОЛОДЖЕННЯМ ПОВІТРЯ, ЯКЕ ВСМОКТУЄ КОМПРЕСОРОМ**

**О.А. Вассерман**

доктор технічних наук, професор кафедри  
«Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»

**О.Г. Слынько**

кандидат технічних наук, професор кафедри  
«Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»

*Одеський національний морський університет, Україна, Одеса*

© Вассерман О.А., Слынько О.Г., 2021

**Анотація.** Пропонуються нові термодинамічні цикли відкритих газотурбінних установок (ГТУ): цикл з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного і цикл з попереднім охолодженням повітря, яке всмоктує компресор. Розрахунки показали, що робота і термічний ККД ГТУ при розширенні газів в турбіні до тиску нижче атмосферного (0,05 МПа) збільшились на 19,7 і 24,5 % відповідно. У циклі з попереднім охолодженням повітря до температури мінус 30 °С робота циклу зросла на 17,6 %. Термічний ККД при цьому не змінився, оскільки не змінилась ступінь підвищення тиску. Враховуючи те, що процеси охолодження газів і повітря в пропонуємих циклах «безкоштовні», деякі конструктивні ускладнення модифікованих ГТУ цілком окупаються такими суттєвими підвищеннями основних характеристик циклів.

**Ключові слова:** газотурбінна установка, утилізаційна холодильна установка, розширення у вакуум, охолодження повітря, термічний ККД, питома потужність.

UDC 621.438.082

DOI 10.47049/2226-1893-2021-1-72-80

**INCREASE OF EFFICIENCY AND SPECIFIC POWER OF OPEN GAS TURBINE PLANTS. 1. CYCLE WITH BROADENING OF GASES INTO TURBINE TO PRESSURE LOWER THAN ATMOSPHERIC AND CYCLE WITH PRELIMINARY COOLING OF AIR SUCKED BY COMPRESSOR**

**A.A. Vasserman**

Doctor of technical sciences,  
Professor of department «Ships energetic plants and technical operation»

**A.G. Slyn`ko**

Candidate of technical sciences,  
Professor of department «Ships energetic plants and technical operation»

*Odessa National Maritime University, Ukraine, Odessa*

**Abstract.** *New thermodynamic cycles of open gas turbine plants (GTP) are proposed: cycle with broadening gases into turbine to pressure lower than atmospheric and cycle with preliminary cooling of air sucked by compressor. Calculations showed, that work and thermal coefficient of efficiency of GTP at broadening of gases into turbine to pressure lower than atmospheric (0,05 MPa) increased on 19,7 and 24,5 % correspondingly. At cycle with preliminary cooling of air to temperature minus 30 °C work of cycle increased on 17,6 %. Thermal coefficient of efficiency at this case not changed, because degree of rise of pressure not changed. Taking into account, that processes of cooling gases and air at proposed cycles are «free of charge», some constructive complications of modified GTP are fully justified by such essential increase of basic characteristics of cycles.*

**Keywords:** *gas turbine plant, utilizing refrigerating plant, broadening to vacuum, cooling of air, thermal coefficient of efficiency, specific power.*

**Введение.** В работах [1-4] обоснована актуальность и необходимость усовершенствования термодинамических циклов ДВС с целью повышения их экономичности и мощности. Предлагаемые в этих работах способы повышения термического КПД и мощности ДВС основаны на так называемом «золотом» правиле технической термодинамики. В настоящей работе рассматривается два способа повышения эффективности и мощности простой открытой ГТУ, основанные также на «золотом» правиле термодинамики – *для уменьшения работы сжатия рабочее тело надо предварительно охлаждать, а для увеличения работы расширения – нагревать.*

Главным недостатком простых открытого типа ГТУ является сопоставимость работы сжатия воздуха компрессором и работы расширения газов в турбине, а также ограничение температуры газов, подаваемых на лопатки турбины. Это обуславливает низкое значение термического и, соответственно, эффективного КПД таких установок. Учитывая существенные преимущества ГТУ над ДВС – возможность получения больших мощностей при малых удельных массогабаритных показателях и пригодность ГТУ выступать в качестве утилизационного энергетического элемента ДВС, они имеют большое будущее. Поэтому нами в последнее время предложен ряд усовершенствований термодинамического цикла простых открытых ГТУ.

**Целью статьи** является рассмотрение двух способов усовершенствования термодинамического цикла простой открытой ГТУ. В соответствии с первым способом газы расширяют в турбине до давления ниже атмосферного, а в соответствии со вторым – воздух, всасываемый и сжимаемый компрессором, предварительно охлаждают. Необходимые при этом охлаждения газов, расширившихся в турбине до давления ниже атмосферного, и воздуха, всасываемого компрессором, осуществляется с помощью утилизационной теплоиспользующей холодильной установки, генератор пара которой нагревается отработавшими газами турбины.

**Изложение основного материала.** Сначала рассмотрим первый способ усовершенствования термодинамического цикла простой открытого типа ГТУ. Для этого на рис. 1 изображены совместно в  $p, v$  и  $T, s$  координатах термодинамические циклы простой открытого типа ГТУ ( $I-2-3-4$ ) и усовершенствованной путём расширения газов в турбине до давления ниже атмосферного ( $I-2-3-5-6-I$ ), а на рис. 2 – принципиальная схема модифицированной установки.

Модифицированный термодинамический цикл осуществляется следующим образом. Воздух всасывается компрессором  $I$  из окружающей среды (рис. 2) и изоэнтропно сжимается, как и в обычных ГТУ открытого типа, до давления  $p_2$  (процесс  $I-2$ , рис. 1). Сжатый воздух вместе с топливом подаётся в камеру сгорания  $II$  (рис. 2).

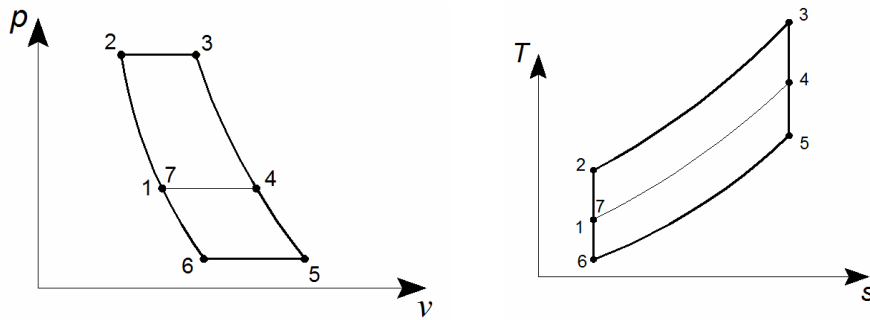


Рис. 1. Сопоставление термодинамических циклов простой открытой ГТУ (1-2-3-4-1) и модифицированной с расширением газов до давления ниже атмосферного (1-2-3-5-6-1)

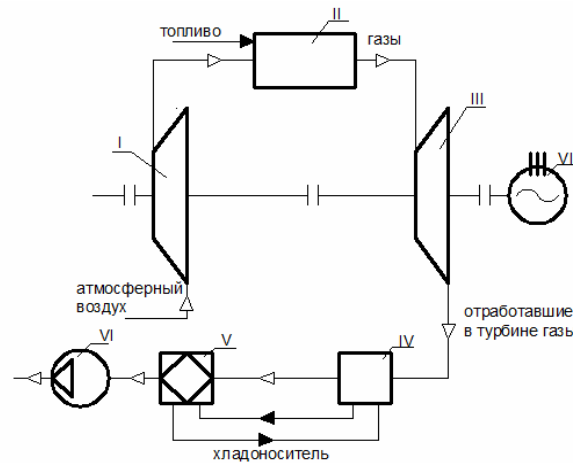


Рис. 2. Принципиальная схема ГТУ с расширением газов в турбине до давления ниже атмосферного:

- I* – компрессор; *II* – камера сгорания; *III* – газовая турбина;
- IV* – утилизационная теплоиспользующая холодильная машина;
- V* – ресивер-охладитель газов, отработавших в турбине;
- VI* – вакуумный насос

Газы, образующиеся в камере, подаются в газовую турбину *III*, где изэнтропно расширяются до давления ниже атмосферного, которое создают и поддерживают в ресивере-охладителе *V* с помощью вакуумного насоса *VI* (процесс 3-5, рис. 1).

Газы, расширившиеся в газовой турбине до давления ниже атмосферного, перед сжатием вакуумным насосом до атмосферного давления (процесс 6-7), охлаждаются (процесс 5-6) холодоносителем утилиза-

ционной теплоиспользующей холодильной установки *IV*, генератор пара которой нагревают отработавшими в турбине газами.

Для иллюстрации эффективности такого усовершенствования термодинамического цикла открытых ГТУ нами выполнены соответствующие расчеты при фиксированных значениях температуры газов перед турбиной  $t_3$  (эта температура ограничивается жаропрочностью лопаток турбины) и степени повышения давления  $\beta$  (обычно принимаемой при одноступенчатом сжатии воздуха не выше 8 для обеспечения приемлемого соотношения между мощностями компрессора и турбины). Поэтому в расчетах принято  $t_3 = 850$  °C и  $\beta = 7$ . Расчеты выполнены, как для базового цикла (при расширении газов в турбине до нормального атмосферного давления – первая строчка в приведенной ниже табл. 1), так и для модифицированных циклов в интервале значений конечных давлений расширения газов в турбине от 0,09 до 0,01 МПа.

Таблица 1

*Зависимость удельной работы, термического КПД и температуры газов в конце расширения в турбине и в конце охлаждения их в ресивере-охладителе в зависимости от конечного давления их расширения в турбине ( $p_3$ )*

Конечное давление расширения газов в турбине, МПа	Температура газов в точках 5 и 6		Полезная работа и её относительное повышение в модифицированных циклах ГТУ		Термический КПД и его относительное повышение в модифицированных ГТУ	
	$t_5, ^\circ\text{C}$	$t_6, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{ГТУ}}, \text{кДж/кг}$	$\delta l_{\text{ГТУ}}, \%$	$\eta_t, \%$	$\delta \eta_t, \%$
0,101325		303,15	252,1	–	42,65	
0,09	341,2	150,7	263,4	4,29	44,56	4,48
0,08	320,9	5,54	274,2	8,07	46,39	8,78
0,07	298,7	-4,90	286,1	11,88	48,40	13,48
0,06	274,0	-16,46	299,3	15,75	50,62	18,70
0,05	246,2	-29,49	314,1	19,73	53,13	24,57
0,04	214,2	-44,54	331,2	23,87	56,02	31,36
0,03	175,7	-62,57	351,7	28,31	59,49	39,50
0,02	126,6	-85,61	377,9	33,28	63,93	49,89
0,01	54,8	-119,3	416,2	39,43	70,41	65,08

Температура газов в точке 6 определялась из условия, что их энтропия равна энтропии воздуха в точках 1 и 2. Если газы, расширившиеся в турбине до указанного в таблице давления, охладить до температуры ниже  $t_6$ , указанной в табл. 1, то можно еще больше увеличить работу и КПД установки, и наоборот, чем меньше охлаждать газы, которые расширились в турбине, тем меньше будет полезная работа и КПД модифицированной установки.

Анализируя данные табл. 1, можно сделать следующие выводы:

– снижение конечного давления расширения газов в турбине ниже атмосферного приводит к существенному повышению значений удельной работы и термического КПД модифицированной установки относительно базового цикла, в котором газы расширяются атмосферного давления;

– при уменьшении конечного давления расширения газов в турбине заметно снижается их температура в конце расширения  $t_5$  и соответственно после охлаждения их в ресивере-охладителе  $t_6$ ;

– при значениях конечного давления расширения газов в турбине 0,05 МПа и выше для их охлаждения можно использовать утилизиционную абсорбционную водоаммиачную холодильную установку, генератор пара которой нагревается отработавшими газами турбины  $t_5$ ;

– при значениях конечного давления расширения газов ниже 0,05 МПа необходимо для их охлаждения использовать каскадную холодильную установку, нижняя ступень которой потребует затраты дополнительной внешней работы, что уменьшит указанные в таблице значения работы и термического КПД модифицированных таким образом ГТУ.

Теперь рассмотрим *второй способ усовершенствования термодинамического цикла* простых открытых ГТУ.

На рис. 3 приведены совместно термодинамические циклы простой открытой ГТУ *1-2-3-4-1* и модифицированной путём предварительного охлаждения воздуха, всасываемого и сжимаемого компрессором, *1-5-6-3-4-1*. На рис. 4 изображена принципиальная схема ГТУ, в которой реализуется предлагаемое усовершенствование термодинамического цикла.

Из совместного рассмотрения термодинамических циклов базовой и модифицированной ГТУ (см. рис. 3) можно сделать однозначный вывод, что работа ГТУ с предварительным охлаждением воздуха, всасываемого компрессором, больше работы исходной ГТУ при фиксированной теплонапряженности лопаток турбины (при равных параметрах газа в точке 3). Предлагаемое усовершенствование термодинамического цикла открытой ГТУ позволяет не только увеличивать её удельную мощность при фиксированных массогабаритных показателях, но и регулировать теплонапряжённость деталей установки (в первую очередь лопаток турбины), что является одним из основных проблемных недостатках обычных ГТУ. Регулирование температуры газов, подаваемых на лопатки турбины, осуществляется путём смещения всего цикла влево и вниз диаграммы  $T-s$  при той же эффективности.

Принцип действия модифицированной таким способом ГТУ следующий. Атмосферный воздух (точка 1, рис. 3), всасываемый и сжимаемый компрессором I (рис. 4), предварительно охлаждается (процесс *1-5*, см. рис. 3) с помощью утилизиционной теплоиспользующей холодильной установки IV, генератор пара которой нагревается отработавшими газами турбины III.

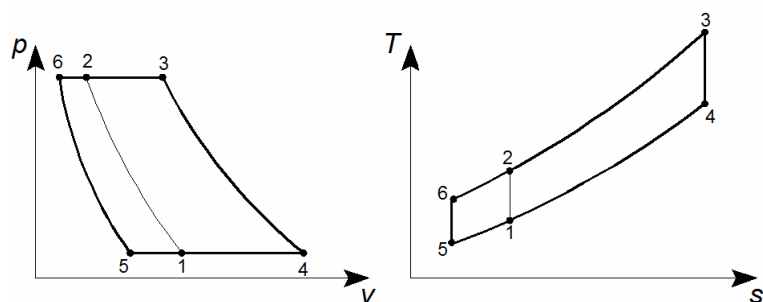


Рис. 3. Сопоставление термодинамических циклов простой открытой ГТУ (1-2-3-4-1) и модифицированной путём предварительного охлаждения воздуха, всасываемого компрессором (1-5-6-3-4-1)

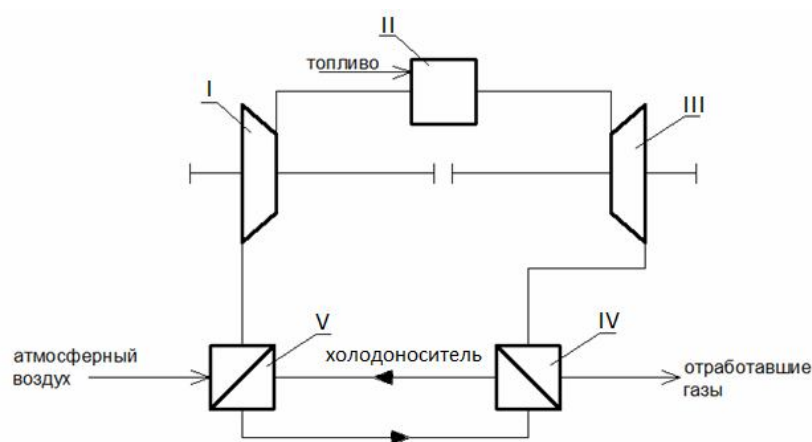


Рис. 4. Принципиальная схема ГТУ с предварительным охлаждением воздуха, всасываемого компрессором:

*I* – компрессор; *II* – камера сгорания; *III* – турбина;

*IV* – утилизационная теплоиспользующая холодильная установка;

*V* – охладитель воздуха, всасываемого компрессором

Предварительное охлаждение воздуха уменьшает работу сжатия, потребляемую компрессором, обычно составляющую 50-70 % от работы турбины.

Для проверки этого качественно верного утверждения нами выполнены расчёты при следующих исходных данных: начальные параметры атмосферного воздуха (точка **1**) –  $p_1 = 0,101325$  МПа,  $t_1 = 30$  °С, температура газов, поступающих на лопатки турбины (точка **3**)  $t_3 = 850$  °С, степень повышения давления  $\beta = 7$ . Результаты расчётов приведены ниже в табл. 2; первая строчка таблицы соответствует базовому циклу ГТУ, а последующие – модифицированным циклам.

Таблица 2

*Удельная работа ГТУ и её относительное увеличение  
в зависимости от температуры предварительного охлаждения воздуха,  
всасываемого компрессором*

Температура охлаждения воздуха, °С	Удельная работа ГТУ, кДж/кг	Относительное увеличение работы ГТУ, %
30 (нет охлаждения воздуха)	254,8	–
10	269,7	5,9
-10	284,7	11,7
-30	299,6	17,6

Анализируя данные табл. 2, можно сделать однозначный вывод, что предварительное охлаждение воздуха, всасываемого компрессором, обуславливает значительное повышение удельной работы ГТУ.

**Выводы.** Усовершенствовав термодинамический цикл простой открытой ГТУ путём расширения газов в турбине до давления ниже атмосферного, можно увеличить удельную мощность установки и термический КПД.

Модифицировав термодинамический цикл ГТУ путём предварительного охлаждения воздуха, всасываемого компрессором, можно повысить её удельную мощность. При этом остаётся постоянным термический КПД установки. Кроме того, таким способом можно регулировать температуру газов, поступающих на лопатки турбины (теплонапряжённость турбины) при сохранении мощности и КПД установки.

При больших масштабах использования и мощностях современных ГТУ открытого типа внедрение рассмотренных усовершенствований позволит не только экономить топливо при их эксплуатации, но и улучшать их массогабаритные показатели. Особенно это актуально для стационарных ГТУ, используемых на ТЭЦ и газоперекачивающих станциях. Количество сэкономленных при этом средств быстро окупит дополнительные капитальные расходы, связанные с производством модифицированных предлагаемыми способами ГТУ.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Вассерман А.А., Слынько А.Г. (2018). Повышение эффективности и мощности двигателей внутреннего сгорания. 1. Цикл ДВС с выпуском отработавших газов в атмосферу // Технические газы. – Т. 18. – № 3. – С. 34-37.*
2. *Вассерман А.А., Слынько А.Г. (2018) Повышение эффективности и мощности двигателей внутреннего сгорания. 2. Цикл с охлаждением воздуха, подаваемого в цилиндры двигателя // Технические газы. – Т. 18. – № 4. – С. 34-38.*



3. *Вассерман А.А., Слынько А.Г. (2018). Повышение эффективности и мощности двигателей внутреннего сгорания. 3. Цикл с газотурбинным наддувом и охлаждением подаваемого в ДВС воздуха // Технические газы. (2019) – Т. 19. – № 1. – С. 43-47.*
4. *Вассерман А.А., Слынько А.Г. (2019). Повышение эффективности и мощности двигателей внутреннего сгорания. 4. Цикл с газотурбинным наддувом, охлаждением подаваемого в ДВС воздуха и расширением газов в турбине до давления ниже атмосферного // Технические газы. – № 2. – С. 44-48.*

#### REFERENCES

1. *Vasserman, A.A., Slyn'ko, A.G. (2018). Povishenie effektivnosti and moshosti dvigateley vnytrinego sgorania. 1. Chikl DVS z vipyskom otrabotavchich gazov v atmosfery // Technicheski gazi. – V. 18. – № 3. – P. 34-37.*
2. *Vasserman, A.A., Slyn'ko, A.G. (2018). Povishenie effektivnosti and moshosti dvigateley vnytrinego sgorania. 2. Chikl z ochlachdeniem vozducha, podavaemogo v chilindri dvigatelja // Technicheski gazi. – V. 18. – № 4. – P. 34-38.*
3. *Vasserman, A.A., Slyn'ko, A.G. (2018). Povishenie effektivnosti and moshosti dvigateley vnytrinego sgorania. 3. Chikl z gazotyrbinnim nadyvom and ocholodchenniem podavaemogo v DVS vozducha // Technicheski gazi. – V. 19. – № 1. – P. 43-47.*
4. *Vasserman, A.A., Slyn'ko, A.G. (2019). Povishenie effektivnosti and moshosti dvigateley vnytrinego sgorania. 4. Chikl z gazotyrbinnim nadyvom, ochlachdeniem podavaemogo v DVS vozducha and rachireniem gazov v tyrbine do davlenia niche atmosfernogo // Technicheski gazi. – № 2. – P. 44-48.*

*Стаття надійшла до редакції 28.12.2020*

**Посилання на статтю: Вассерман А.А., Слынько А.Г.** Повышение эффективности и удельной мощности открытых газотурбинных установок. 1. Цикл с расширением газов в турбине до давления ниже атмосферного и цикл с предварительным охлаждением воздуха, всасываемого компрессором // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2021. № 1 (64). С. 72-80. DOI 10.47049/ 2226-1893-2021-1-72-80.

*Article received 28.12.2020*

**Reference a JournalArtic: Vasserman A.A., Slyn'ko A.G.** Increase of efficiency and specific power of open gas turbine plants. 1. Cycle with broadening of gases into turbine to pressure lower than atmospheric and cycle with preliminary cooling of air sucked by compressor // Herald of the Odessa National Maritime University. 2021. 1(64), 72-80. DOI 10.47049/ 2226-1893-2021-1-72-80.