

УДК 621.313.13.662

**ПЕРСПЕКТИВЫ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ТЕПЛОТЫ ЗА ГАЗОТУРБИНЫМИ ПРИВОДАМИ УКРАИНСКОЙ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ**

**Халатов А.А.**, академик НАН Украины, **Коваленко А.С.**, канд. техн. наук

*Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина*

Наведено результати аналізу можливостей утилізації теплоти газів, які виходять з газотурбінного приводу газотранспортної системи України.

Приведены результаты анализа возможностей утилизации теплоты газов, выходящих из газотурбинного привода газотранспортной системы Украины.

The results are given analyzing possibilities of waste gas heat utilization after gas turbines of the Ukrainian gas pipeline network.

Библ. 15, рис. 6.

**Ключевые слова:** газотурбинный привод, выходящие газы, регенерация и утилизация теплоты, теплоноситель.

$i$  – энтальпия;  
 $G_T$  – расход топлива;  
 $G_B$  – расход воздуха;  
 $H_u$  – низшая теплотворная способность топлива;  
 $L$  – работа;  
 $N_e$  – мощность газотурбинного привода;  
 $q_r$  – теплота, подводимая в термодинамическом процессе к 1 кг рабочего тела;  
 $T$  – температура рабочего тела;  
 $\Delta T^* = T_4^* - T_2^*$  – потенциал воздушной регенерации теплоты в ГТД;  
 $\pi_k^*$  – степень повышения давления воздуха в компрессоре;  
 $\eta$  – КПД;  
 $\eta_T$  – коэффициент выделения тепла.

**Нижние индексы:**

$v$  – воздух;  
 $г$  – газ;  
 $e$  – энергетический;  
 $к$  – компрессор;  
 $н$  – сечение в невозмущенном потоке;  
 $пр$  – привод;  
 $с$  – сечение на выходе из двигателя;

$t$  – турбина;  
 $2$  – сечение за компрессором;  
 $3$  – сечение перед турбиной;  
 $4$  – сечение за турбиной.

**Верхние индексы:**

• – заторможенный поток.

**Сокращения:**

ВТТУ – воздушная теплоутилизующая турбинная установка;  
 ГПА – газоперекачивающий агрегат;  
 ГПТУ – газопаровая турбинная установка;  
 ГПУ – газопаровая установка;  
 ГТД – газотурбинный двигатель;  
 ГТП – газотурбинный привод;  
 ГТС – газотранспортная система;  
 ГТУ – газотурбинная установка;  
 КИТ – коэффициент использования теплоты;  
 КПД – коэффициент полезного действия;  
 КС – компрессорная станция;  
 НРТ – низкокипящее рабочее тело;  
 ПТД – паротурбинный двигатель;  
 САУ – стандартные атмосферные условия;  
 ТА – теплообменный аппарат.

**Введение**

Надежная эксплуатация газотранспортной системы (ГТС) Украины обеспечивается газоперекачивающими агрегатами (ГПА), силовым элементом которых в 82% случаев является газотурбинный привод (ГТП). Общая характери-

стика украинской ГТС и обоснование необходимости улучшения экономичности ее работы были представлены ранее [1]. Там же был подробно рассмотрен один из способов повышения эффективности использования топливного газа – воздушная утилизация теплоты выбрасываемых

в атмосферу продуктов сгорания.

В Украине ГТП представлены как промышленными газотурбинными установками (ГТУ), так и установками, созданными на основе судовых и авиационных технологий. На практике понятия ГТП, ГТУ, газовая турбина (ГТ) часто интерпретируются как однозначные.

Конструктивно и функционально ГТП представляет собой работающий по циклу Брайтона газотурбинный двигатель (ГТД), предназначенный для передачи избыточного крутящего момента на вал компрессора-нагнетателя ГПА. Анализ баланса энергии в открытом цикле ГТД простой схемы [2] показывает, что значительная часть ее (для украинских ГТП – 64...76%) в виде кинетической и тепловой энергии безвозвратно теряется с выходящими газами (рис. 1). Суммарная величина этих потерь определяется разностью полных энтальпий продуктов сгорания за силовой турбиной и атмосферного воздуха. При этом в выпускном патрубке двигателя происходит лишь некоторое уменьшение доли сбрасываемой кинетической энергии в пользу тепловой.

Степень совершенства ГТД, рабочий процесс которого объединяет функции, как тепловой машины, так и движителя, оценивают [3] коэффициентом полезного действия (КПД) цикла. В технической литературе его также называют полным [2] или энергетическим [4] КПД. Он представляет собой отношение работы на валу привода

к количеству теплоты, подведенной к 1 кг рабочего тела:

$$\eta_e = L_{\text{пр}} / q_r \quad (1)$$

Заменяя количество теплоты секундными расходами воздуха и топлива, с учетом теплотворной способности последнего получим [2, 4]:

$$\eta_e = (G_T + G_B) \cdot L_{\text{пр}} / G_T \cdot \text{Hu} = N_e / G_T \cdot \text{Hu} \quad (2)$$

Невозможность утилизации кинетической энергии потока на выходе из ГТД – следствие получения на валу механической работы, а неизбежность отвода теплоты в атмосферу – иллюстрация соблюдения второго закона термодинамики.

Поэтому, уменьшение энтальпии продуктов сгорания перед выбросом их в атмосферу представляется единственным и относительно легкодоступным способом повышения эффективности использования в ГТД топливного газа.

К настоящему времени известно несколько путей уменьшения выбрасываемой тепловой энергии [5-12], реализованных в реальных конструкциях или же предложенных в проектах. Концептуально они различаются методами “изъятия” этой энергии у продуктов сгорания и дальнейшего ее использования. В зависимости от схемы использования отбираемой тепловой энергии различают ее регенерацию и утилизацию. Главную роль при этом играет выбор теплоносителя,

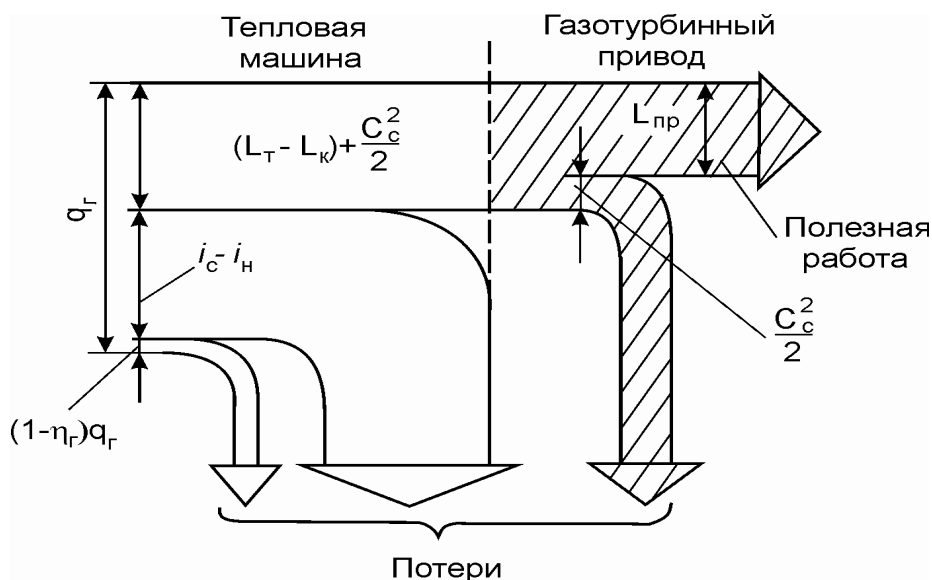


Рис. 1. Энергетический баланс ГТД.

который транспортирует отбираемую теплоту. Именно его свойства определяют возможности последующего преобразования тепловой энергии в другие виды, удобные для практического применения.

В украинской ГТС на компрессорных станциях (КС) достаточно широко (25% парка ГТП) применяется регенерация теплоты выходящих газов с помощью воздуха основного потока. При этом в теплосиловом газовом цикле ГТД сложной схемы воздух после компрессора, проходя через теплообменный аппарат (ТА), расположенный в газовом тракте за силовой турбиной, нагревается в нем и возвращается на вход камеры сгорания (регенеративный цикл двигателей ГТ-750-6, ГТК-10 и ГТНР-10). Отбор теплоты от выходящих газов и возврат ее в цикл ведет к экономии сжигаемого топлива. Однако использование циклового воздуха в качестве теплоносителя у современных ГТД ограничено опережающим ростом его температуры на выходе из компрессора по сравнению с температурой газового потока, который омывает ТА.

В случае же применения для отбора теплоты от выходящих газов воды вместо воздуха возникает гибридный ГТД и паротурбинный двигатель (ПТД) с общей турбиной, в котором реализуется монарный конденсационно-регенеративный цикл (установка «Водолей») [13]. При этом, наряду с воздухом и топливом в камеру сгорания установки подается пар из ТА котла-утилизатора, расположенного за турбиной. В отличие от классической схемы [3] газопаровой турбинной установки (ГПТУ), этот пар и пар, выделяемый в процессе горения, конденсируются в выходном контактном конденсаторе. Затем часть образовавшейся воды через систему подготовки возвращается в котел-утилизатор, а другая часть через внешний охладитель – в конденсатор. Таким образом, внутри открытого цикла ГТД как бы функционирует закрытый цикл ПТД, не требующий расходных запасов воды. Рабочим телом в такой установке со смешением рабочих тел вначале служит атмосферный воздух и вода, а на участке от камеры сгорания до конденсатора – газопаровая смесь. Эффект пароводяной регенерации состоит в использовании теплоты, отобранной у газопаровой смеси за силовой турбиной, для испаре-

ния воды и подогрева пара в ТА котла-утилизатора перед подачей его в камеру сгорания.

Анализ парка украинских ГТП показывает, что достаточно сложное, по конструкции и технологии, использование рабочего тела цикла (воздуха или воды) в качестве теплоносителей в настоящее время по ряду причин ограничено.

Следовательно, вполне логично обратиться к термодинамическим процессам, происходящим вне цикла ГТД, и поэтому непосредственно не влияющим на работу последнего. Это процессы утилизации теплоты выбрасываемых из ГТД продуктов сгорания, температура которых обычно составляет 600...800 К.

Безусловно, в этом случае речь идет уже не о ГТД, с которым ранее отождествлялся ГТП, а о комбинированной установке на базе ГТД, где реализуется несколько циклов с термодинамической связью между ними. На практике чаще всего наблюдается комбинация двух циклов, так называемый бинарный цикл.

В бинарном цикле для утилизации теплоты газов на выходе из основного теплосилового газового цикла используется дополнительное рабочее тело: вода, низкокипящее рабочее тело (НРТ), воздух (теплоутилизационный цикл, теплосилового паровой или воздушный циклы). Анализ возможностей применения различных теплоносителей в условиях работы ГТС показал существенное эксплуатационное преимущество атмосферного воздуха [1].

Для комбинированных установок такого типа различают энергетический КПД привода, который оценивает степень преобразования теплоты, полученной при сгорании топлива, в механическую работу на выходном валу ГТД и коэффициент использования теплоты (КИТ) всей установки. Последний учитывает дополнительный эффект преобразования выбрасываемой из двигателя в атмосферу теплоты в другие виды энергии, т. е. ее утилизацию.

Анализ литературы не позволяет, хотя бы в первом приближении, определиться с выбором направления малозатратной модернизации ГТП украинской ГТС, обеспечивающей более экономное использование расходного топливного газа. Поэтому целью данного исследования является оценка реальных возможностей и перспектив

использования теплоты выходящих газов в условиях современного состояния и тенденций развития ГТД, эксплуатируемых украинской ГТС.

Для этого необходимо:

1. Провести анализ параметров рабочего процесса ГТД, установленных в ГТС Украины, и оценить эффективность использования подведенной в них теплоты.

2. Определить потенциал тепловой энергии, выбрасываемой с выходящими газами.

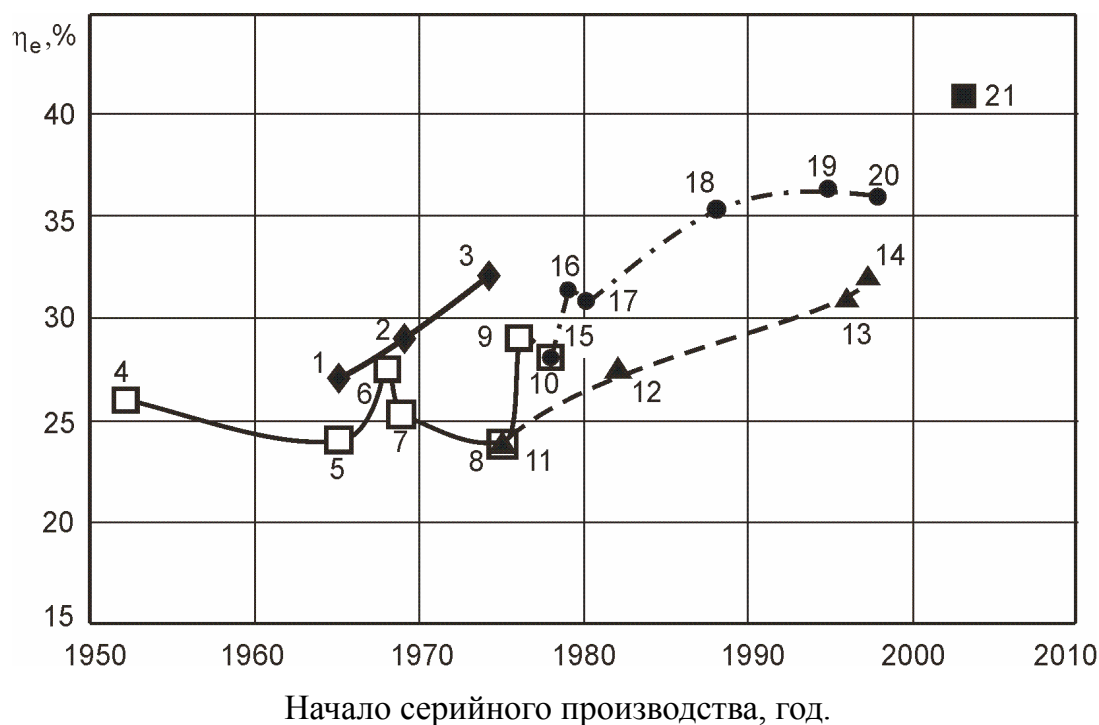
3. Обосновать малозатратный для украинской ГТС способ снижения выбросов теплоты в атмосферу.

### **Эффективность использования топлива в ГТД украинской ГТС**

Анализ парка ГТУ украинской ГТС [14] свидетельствует о его разнообразии, как по началу серийного производства и, следовательно, проектирования, так и по технологиям изготовления (рис. 2). Существенной особенностью является

эксплуатация некоторого количества устарелых (50...60 лет) ГТУ.

Начальный этап создания ГТС Украины характеризуется применением промышленных ГТУ простой схемы (4). Ввиду низких параметров рабочего процесса, обусловленных уровнем развития науки и технологии в то время, их энергетический КПД составлял от 24% в СССР (5) до 26...28 % в США (4, 6). Лишь в конце 70-х годов XX в. КПД ГТУ советского производства за счет некоторого повышения параметров рабочего процесса достиг уровня 28...29 % (9, 10). Применение регенеративного цикла позволило увеличить эффективность использования энергии топливного газа по сравнению с ГТУ простого цикла на 3...4 % (1, 2), а к середине 70-х годов – даже на 8% (3). Однако, на рубеже 70-х – 80-х годов в связи с интенсификацией газотранспортного строительства возникла необходимость расширения производства ГТД на основе существующих мощностей авиационного и



**Рис. 2. Зависимость энергетического КПД от типа ГТД и начала его серийного производства: 1 – 3 и 4 – 10 – промышленного типа соответственно с регенерацией (ГТ-750-6; ГТК-10, ГТНР-10) и без нее (MS3002, ГТД-6-750, MS5002, Центавр-3002, ГТН-6, ГТН-16, ГПА25/76); 11 – 14 – авиационного типа (НК-12СТ, НК-16СТ, Д-336-2, Д336-1-8); 15-20 – судового типа (ДР-59Л, ДТ-71П, ДЖ-59Л, ДГ-90, ДН-80Л, ДН-70); 21 – установка моноцикла – ГПУ-16К «Водолей».**

судового двигателестроения (конвертированные ГТД). Использование хорошо освоенных в оборонной промышленности технологий позволило в кратчайший срок (2...3 года) выйти на достаточно высокий уровень эффективности использования подводимой в рабочем процессе теплоты.

Так в установках авиационного типа, он стал соответствовать промышленным ГТУ не только простой схемы (11, 12), но даже и регенеративной (13, 14). Для установок судового исполнения эта тенденция сохраняется (15, 16, 17) и даже усиливается (18, 19, 20). В течение 80-х – 90-х годов XX в. КПД установок судового типа растут эквидистантно авиационным с превышением их на 4...6 %. При этом была достигнута технологическая и эксплуатационная возможность обеспечения длительной и надежной работы ГТУ этих двух типов в системе транспортировки газа.

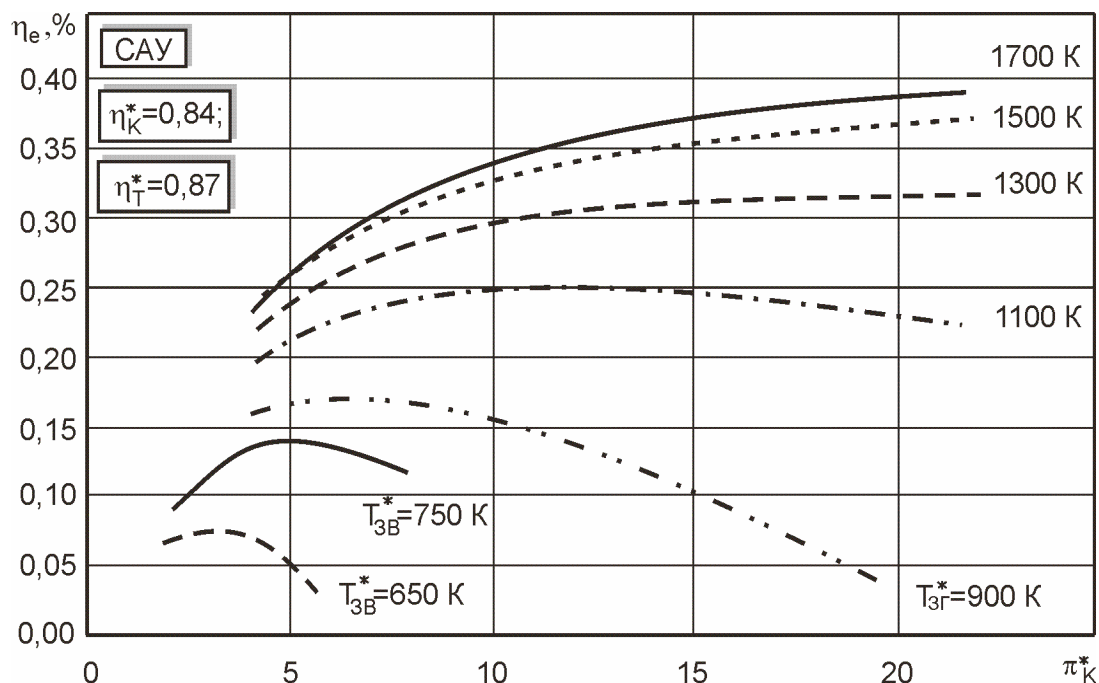
Одним из решений проблемы экономии топливного газа явилось создание и ввод (2003 г.) в опытно-промышленную эксплуатацию на одной из компрессорных станций (КС) Украины установки монарного цикла «Водолей» (21). Экономичность контактной газопаровой установки КГПУ-16 (ГПУ-16К) «Водолей» составляет по разным источникам 40,4...43 %, что позволяет

снизить расход топливного газа на 1500 м<sup>3</sup> в час [15]. Учитывая представленную в рекламном проспекте предприятия «Зоря» – «Машпроект» цену продажи установки \$6,5 млн. и ориентировочные эксплуатационные расходы, можно определиться со сроками ее окупаемости.

Здесь и далее рассмотрены наименьшие значения энергетического КПД приводов, представленные в опубликованных источниках. Незначительный разброс этих данных (0,8...1,8 %) обусловлен некоторой последующей модернизацией двигателей или же приведением к номинальным условиям по международному стандарту ИСО 2314 и на результаты данного исследования не влияет.

#### *Проблемы, связанные с применением регенерации теплоты выходящих газов*

Рост энергетического КПД ГТУ авиационного и судового типа несомненно является следствием роста параметров рабочего процесса. Это подтверждают результаты исследования, выполненного авторами согласно известной методике [4], но для стандартных атмосферных условий (САУ) и с учетом переменной теплоемкости рабочего тела в процессах сжатия и расширения (рис. 3).



**Рис. 3.** Влияние параметров цикла ГТТ на его энергетический КПД.

Так увеличение максимальной температуры рабочего процесса при любой степени повышения давления в цикле вызывает рост энергетического КПД. Однако, чем больше температура цикла, тем меньше этот рост. В то же время характер изменения КПД при неизменной температуре цикла имеет максимум, четко выраженный при более низких температурах. С ее увеличением он сдвигается в сторону больших степеней повышения давления воздуха и становится более пологим на ниспадающей ветви. При температурах цикла более 1300 К максимум КПД находится за диапазоном достигнутых промышленностью значений степеней повышения давления и поэтому рост последних существенно увеличивает КПД на восходящей ветви. Однако предельный уровень температуры рабочего процесса ограничен свойствами материала элементов горячего тракта и возможностью их охлаждения.

Пологий характер изменения энергетического КПД в районе максимума позволяет в некотором диапазоне температур (1200...1400 К) снизить расчетную степень повышения давления воздуха в компрессоре, что существенно облегчает проектирование ГТД. Для температуры 1300 К

и среднем уровне гидравлических потерь в лопаточных машинах такое снижение составляет 20...25 %.

Однако мощность ГТП при этом снижается из-за падения расхода воздуха через него (пропорционально напорности компрессора) и уменьшения работы свободной турбины (влияние степени расширения газа). Теоретически это означает удаление расчетной степени повышения давления воздуха в цикле как от его оптимального, так и экономического значения. При этом сохранение прежней мощности ГТП возможно лишь за счет повышения расхода воздуха, что сопровождается увеличением тепловой энергии, выбрасываемой в атмосферу.

Таким образом, основной причиной улучшения использования теплоты в рабочем процессе ГТД простой схемы является одновременное увеличение температуры цикла и степени повышения давления воздуха в компрессоре.

Немаловажную роль играет снижение гидравлических потерь в процессах сжатия и расширения. Так увеличение КПД турбины и компрессора приводит к росту энергетического КПД, особенно при низких температурах цикла (рис. 4).

Его максимум становится более пологим и

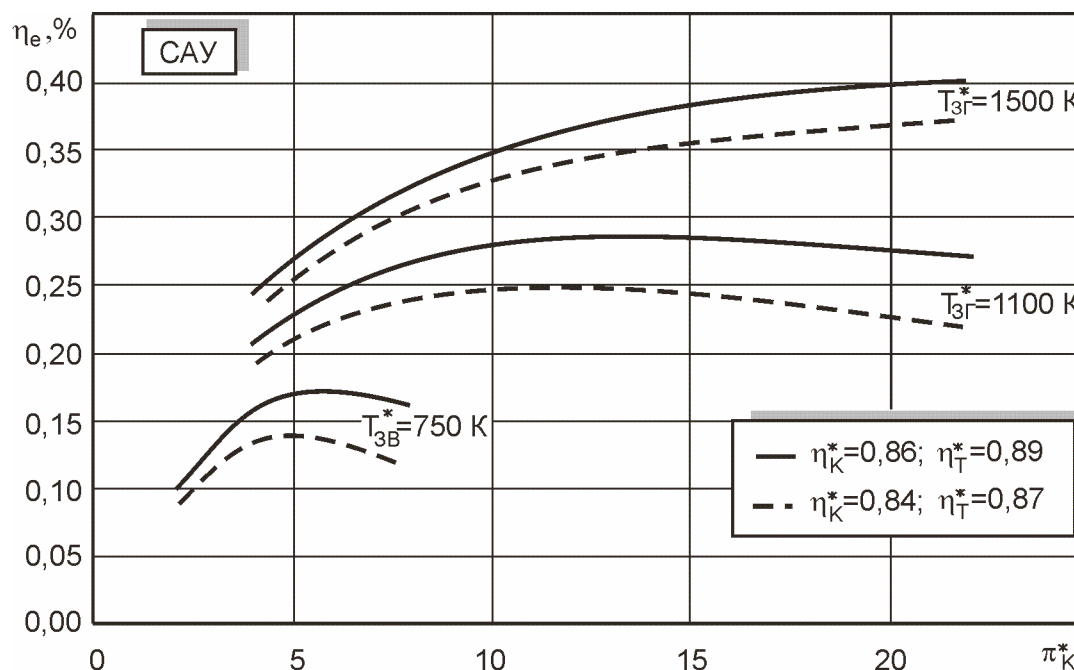


Рис. 4. Влияние гидравлических потерь в компрессоре и турбине ГТП на его энергетический КПД.

сдвигается в сторону больших степеней повышения давления, что заметно проявляется при высокой температуре цикла. В то же время известно [4], что применение открытой системы воздушного охлаждения элементов высокотемпературных турбин снижает их КПД и ведет к сдвигу этого максимума в противоположном направлении.

Успешное освоение высоких параметров рабочего процесса в ГТД простой схемы привело в конце 70-х годов XX в. к утрате возможности применения в них воздушной регенерации теплоты выходящих газов. Для эксплуатируемых в Украине ГТП авиационного и судового типа это наглядно демонстрируется (рис. 5) характером изменения температуры тепловоспринимающего и теплоотдающего теплоносителей. Обращает на себя внимание не только активный рост температуры воздуха за компрессором, но и температуры выходящих газов. Последнее означает, что, несмотря на относительное улучшение использования подводимой теплоты в цикле высокотемпературных ГТД (рост их КПД), энтальпия газов, выбрасываемых в атмосферу, увеличивается, что подчеркивает актуальность рассматриваемой проблемы. Небезынтересно при этом, что характер изменения температуры воздуха за

компрессором ГТД практически соответствует изменению эффективности использования топлива в рабочем процессе ГТД простой схемы (т.е. изменению энергетического КПД) (рис. 2).

Расчеты показывают (рис.6), что реализация регенеративного цикла возможна лишь при существенном (237...288 К) превышении температуры выходящих газов над тепловоспринимающим воздухом (1, 2, 3). По мере развития газотурбостроения, которое сопровождалось ростом параметров рабочего процесса, этот температурный потенциал постепенно снижался от 266...54 К в ГТУ промышленного типа (4...10) до 44...5 К и даже отрицательных значений для конвертированных установок авиационного (11...14) и судового (15...20) типа.

Приведенные результаты подтверждают несомненную утрату термодинамических возможностей воздушной регенерации теплоты в открытом цикле современных ГТД украинской ГТС и этим объясняется ослабление интереса промышленности к проектированию установок регенеративного типа на базе ГТД простой схемы.

В то же время, длительная эксплуатация в украинской ГТС опытного экземпляра установки ГПУ-16К ("Водолей") подтверждает возможность и эффективность регенерации теплоты вы-

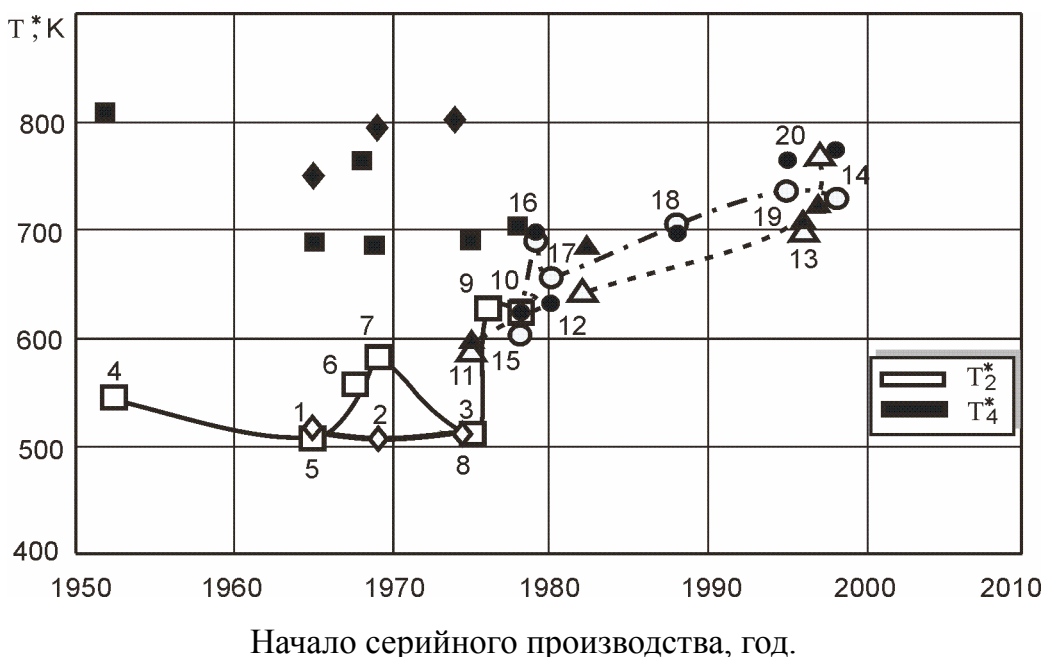
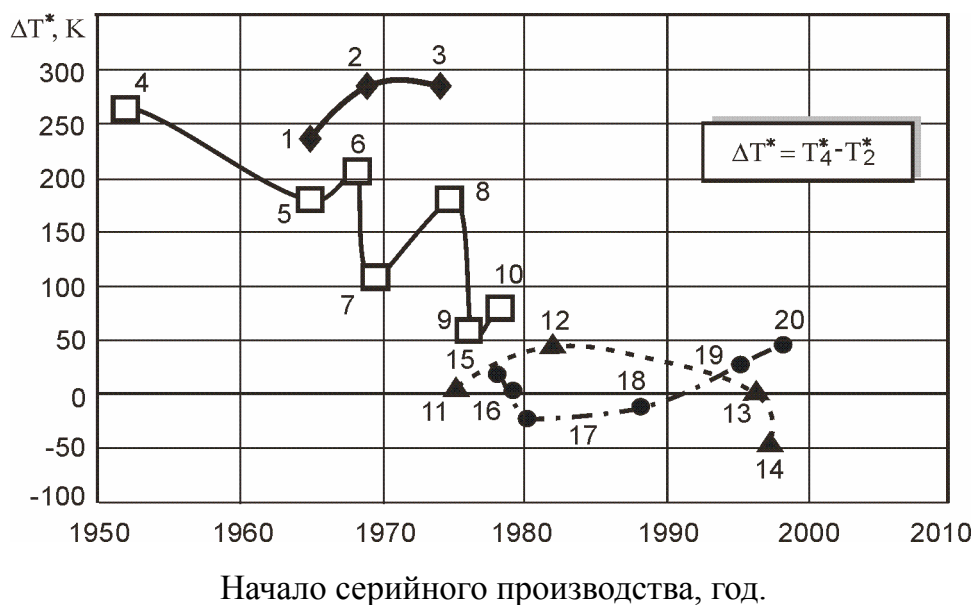


Рис. 5. Зависимость температуры потока за компрессором и турбиной от типа привода и начала его серийного производства. Обозначения – на рис. 2.



**Рис. 6. Зависимость температурного потенциала воздушной регенерации от типа привода и начала его серийного производства: 1 – 3 – промышленного типа с регенерацией; 4 – 10 – промышленного типа без регенерации; 11 – 14 – авиационного типа; 15 – 20 – судового типа. Остальные обозначения – на рис. 2.**

ходящих газов с помощью пароводяного рабочего тела. При этом, несмотря на идентичность физических процессов воздушной и пароводяной регенерации, наличие в цикле двух рабочих тел вносит свои особенности.

Исключительно благоприятные для отбора теплоты физические характеристики воды и пара, а также наличие фазового перехода между ними позволяют существенно снизить температуру выбрасываемых газов. Кроме того, применение пара для подвода отобранной теплоты в район камеры сгорания устраняют жесткую зависимость эффективности регенерации от температуры воздуха за компрессором.

Можно отметить несколько факторов, обеспечивающих, при прочих равных условиях, экономию топлива по сравнению с ГТД простой схемы. Согласно выражению (2), это увеличение массы рабочего тела, проходящего через силовую турбину, и ее работы. Последнее возможно, если более высокое значение удельной теплоты пара не обесценится низкой его температурой на входе в камеру сгорания по сравнению с температурой воздуха за компрессором. В противном случае, подмешивание более холодного, чем воздух, пара, при прочих равных

условиях ( $T_3^* = \text{const}$ ), приведет к дополнительному расходу топлива. Это снизит позитивный вклад в экономию топлива не только удельной теплоты пара, но и дополнительного подвода его массы. Следовательно, существует некоторый диапазон температур за турбиной ( $T_4^* \leq T_2^*$ ), где негативное влияние высокой температуры за компрессором компенсируется более высокой, чем у воздуха, удельной теплотой пара и его расходом. В итоге это означает распространение принципа пароводяной регенерации на область высоких параметров рабочего процесса современных ГТД простой схемы с более высоким начальным КПД (рис. 3, 4).

Несмотря на подтвержденный в процессе эксплуатации опытного экземпляра установки ГПУ-16К, способ экономии топливного газа с помощью пароводяной смеси дальнейшего развития по ряду причин не получил. И, вероятно, в первую очередь из-за применения воды в качестве теплоносителя, что сопровождается необходимостью создания дополнительного производства по ее подготовке, химической очистке и использованию. Кроме того, существенный рост капитальных затрат и объективные эксплуатационные трудности, особенно в зимнее время и



в маловодной местности, также пока являются сдерживающими факторами [1].

Таким образом, представленный анализ показывает, что в реальном исполнении потенциальные возможности снижения отвода тепловой энергии с выходящими газами ГТД при использовании воздушной регенерации теплоты цикла практически исчерпаны. Даже в обозримой перспективе, несмотря на все конструктивные и технологические достижения, энергетический КПД газотурбинных двигателей простой и сложной схемы не превысит 40...45 % [3, 4]. Поэтому возникает проблема утилизации выбрасываемой в атмосферу теплоты, которая может быть реализована только в комбинированных установках.

### **Выбор способа утилизации выбросной теплоты для ГТП**

В Украине в настоящее время утилизация теплоты продуктов сгорания ГТД перекачивающих агрегатов не применяется. Тем не менее, в мире существуют установки и их проекты, которые реализуют бинарные циклы с дополнительным силовым воздушным циклом, паровым циклом Ренкина, низкотемпературным (органическим) циклом Ренкина или же теплофикационным циклом, а также предлагаются тригенерационные технологии утилизации теплоты выходящих из ГТД газов.

Анализ особенностей их применения, показывает [1, 13], что одним из практических по организации рабочего процесса, капитальным и эксплуатационным затратам методом утилизации выбросной теплоты является модернизация ГТП путем применения дополнительной воздушной турбинной теплоутилизационной установки (ВТТУ) [11, 12]. Эта установка представляет собой ГТД, в котором подвод теплоты к рабочему телу (атмосферному воздуху) происходит в выхлопном ТА привода. Доступность и экологичность атмосферного воздуха, неисчерпаемость его ресурсов и универсальность использования в различных условиях эксплуатации представляют собой, по сравнению с другими теплоносителями, несомненные достоинства, которые можно реализовать в открытом цикле Брайтона ВТТУ.

По расчетам в таком цикле при оптимальных режимных параметрах можно утилизировать до 17 % выбрасываемой в атмосферу теплоты

(рис. 3, 4), а при дальнейшем совершенствовании метода и больше. При этом положительный эффект от снижения гидравлического сопротивления воздушного тракта ВТТУ и подогрева в нем воздуха проявляется сильнее, чем у ГТД привода. Характеристика КПД ВТТУ в этих условиях протекает “круче”, а его максимум сдвигается в область больших степеней повышения давления (рис. 3, 4)

Таким образом, КИТ комбинированной установки воздушного бинарного цикла с учетом представленного выше КПД утилизации теплоты в ВТТУ может составлять: 41,9 % при энергетическом КПД основного ГТД 30 %, а при КПД 36 % – 47 %. Характерно, что при одном и том же КПД теплоутилизационной установки положительный эффект утилизации при улучшении экономичности основного ГТД проявляется слабее.

Мощность с выходного вала ВТТУ может быть передана на вал генератора электрической энергии или же через редуктор на вал ГТП. В последнем случае КИТ комбинированной установки соответствует ее КПД.

### **Выводы**

Анализ состояния и исследование потенциальных возможностей уменьшения выброса теплоты с выходящими продуктами сгорания ГТП украинской ГТС показал:

- увеличение степени повышения давления при росте максимальной температуры цикла у современных ГТД простой схемы приводит к росту количества теплоты, выбрасываемой в атмосферу, и трудностям в использовании воздуха основного потока для регенерации;

- применение воды для регенерации теплоты в монарном цикле со смешением рабочих тел сопровождается значительными производственными и технологическими проблемами, затрудняющими работу ГТП в системе транспортировки газа;

- утилизация сбросной теплоты для современных ГТП является наиболее эффективным способом получения дополнительной полезной мощности;

- доступным и малозатратным методом использования теплоты выходящих газов у современных ГТД является ее воздушная утилизация

в бинарном цикле комбинированной установки;  
– применение воздушной утилизации позволяет существенно (на 14...17 %) уменьшить количество теплоты, выбрасываемой из ГТД, что позволяет для установок на базе современных ГТД простой схемы получить КИТ 42...47 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Халатов А.А., Северин С.Д., Коваленко А.С., Бурлака В.В. Анализ воздушного цикла утилизации теплоты горячих газов за газотурбинными приводами ГТС Украины // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 6, №4. – С. 18 – 25.
2. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных двигателей. Ч.2. – М.: «Машиностроение», 1978. – 513 с.
3. Костюк А.Г., Шерстюк А.Н. Газотурбинные установки: Учеб. пособие для вузов. – М.: «Высшая школа», 1979. – 254 с.
4. Курзон А.Г., Маслов Л.А. Силовые турбинные установки. – Л.: «Судостроение», 1991. – 152 с.
5. Low Cost “Air Bottoming Cycle” for Gas Turbines. Gas Turbine World, vol. 21, № 3, 1991, p.61
6. Пятничко В.А., Крушиневич Т.К., Пятничко А.И. Утилизация низкопотенциального тепла для производства электроэнергии с использованием пентана в качестве рабочего тела // Экология и ресурсосбережение. – 2003. – №4. – С. 3-6.
7. Дикий Н.А., Пятничко А.И., Карп И.Н. Производство электрической энергии по газопаровому циклу на комбинированном угольном и газовом топливе // Экология и ресурсосбережение. – 2006. – № 2. – С. 3 – 7.
8. Билека Б.Д. Комбинированные энергохолодильные установки для повышения эффективности работы газотранспортных систем // Про-

мышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С.132 – 138.

9. Любчик Г.М., Резраги А., Литвинова Ю.Р., Рельях Ю.Р. Перспективы производства электрической и тепловой энергии на базе газотурбинных и комбинированных установок // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2008. – № 2. – С. 44 – 48.

10. Мовчан С.Н., Бочкарев Ю.В., Соломонюк Д.Н. Этапы развития стационарных и судовых ГТУ с регенерацией теплоты // Газотурбинные технологии. – 2008. – № 8. – С. 8 – 10.

11. Кузнецова С.А., Избаш В.И., Кучеренко О.С. Турботехнологии для энергосбережения на газокompрессорных станциях ГТС Украины // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №3/3(45). – С. 37 – 40.

12. Romanov V.V., Chobenko V.N., Kuznetsov V.V., Movchan S.N., Kucherenko O.S, Shevtsov A.P. Performances and Application Perspectives of Air heat Recovery Turbine Units // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, GT 2010, June 14 – 18, 2010, Glasgow, UK.

13. Энергетика: история, настоящее и будущее. Т. 3. Развитие тепловой и атомной энергетики. Под ред. Плачкова И. В. К.: 2008. – 528 с.

14. Методика визначення виробничо-технологічних витрат природного газу на його видобування, транспортування магістральними газопроводами та експлуатацію підземних сховищ. К.: 2008. [mpe.kmu.gov.ua/fuel/doccatalog/document?id=134907](http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/doccatalog/document?id=134907).

15. Когенерационная газопаротурбинная установка «Водролей-16». [Ukrainemade.com/ru/tehnologies/261](http://Ukrainemade.com/ru/tehnologies/261).

## PROSPECTS OF REDUCING EMISSIONS OF HEAT BEHIND GAS TURBINE DRIVES OF UKRAINIAN GAS TRANSPORTATION SYSTEM

**Khalatov A.A., Kovalenko A.S.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova, 2a, Kiev, 03680, Ukraine.

The state and prospects of using the heat of gases from gas turbine engines of the Ukrainian gas transportation network are analyzed in the paper. The purpose of the study is to assess the possibilities and prospects of reducing the heat of gases emitted to the atmosphere. For this purpose: the parameters of the working process of the engines and the efficiency of using heat supplied to them are analyzed; the possible potential of the thermal energy of exhaust gases and methods of its realization are determined; the least resource method of reducing heat emissions to the atmosphere is justified. The analysis of statistical data and calculations have shown that the heat recovery of exhaust gases of modern engines of gas turbine drives of the Ukraine gas transportation network has exhausted its possibilities. The only way of reducing the heat energy emitted the atmosphere remains only its recovery. The analysis of various methods of waste heat recovery has shown the availability and the operational advantage of air waste heat recovery of exhaust gases through the implementation of a binary cycle. References 15, figures 6.

**Key words:** gas turbine drive, exhaust gases, heat recovery, waste heat recovery, heat-transfer agent.

1. *Khalatov A.A., Severin S.D., Kovalenko A.S., Burlaka V.V.* The analysis of air cycle of waste heat recovery after industrial gas turbines drive plants for Ukrainian gas transport system // *Promyshlennaja teplotehnika*. – 2014. – V.36, №4. – P. 18 – 25.

2. *Netschaev Ju.N., Fedorov R.M.* Theory of aviation engines. P.2. – M.: "Mashinostroenie", 1978. – 513 p.

3. *Kurzon A.G., Maslov L.A.* Power turbine installations. – L.: "Sudostroenie", 1991. – 152 p.

4. *Kostiuk A.G., Sherstiuk A.M.* Gas turbine installations: Study guide for institutions of higher

learning. – M.: "Vysshaja shkola", 1979, – 254 p.

5. *Low Cost "Air Bottoming Cycle" for Gas Turbines.* *Gas Turbine World*, V.21, № 3, 1991. – 61 p.

6. *Piatnichko V.A., Krushnevich T.K., Piatnichko A.I.* Utilization of low-grade heat to produce electric power using pentane as working body // *Ekologija i resursosbtrtzhenie*. – 2003. – №4. – P. 3 – 6.

7. *Diky N.A., Piatnichko A.I., Karp I.N.* Electric power production at gas-steam cycle on combined coal and gas fuel // *Ekologija i resursozhberizhenie*. – 2006. – №2. – P. 3 – 7.

8. *Bileka B.D.* Combined power cooling plants for increasing to efficiency of operation of gas transport systems // *Promyshlennaja teplotehnika*. – 2006. – V.28, №2. – P. 132 – 138.

9. *Liubchik G.M., Reragi a., Litvinova Ju. R., Rep'jah Ju. R.* Prospects of production of electric and thermal energy production on base of gas turbine and combined plants // *Energetica: ekonomika, tehnologii, ekologija*. – 2008. – №8. – P. 44 – 48.

10. *Movchan S.N., Bochkarev Ju.V., Solomoniuk D.N.* Stages of development of stationary and ship plants with waste heat recovery // *Gasoturbinnije tehnologii*. – 2008. – №8. – P. 8 – 10.

11. *Kuznitsova S.A., Izbash V.I., Kucherenko O.S.* Turbo technology for energy saving at gas compressor stations of gas turbine stations of Ukraine // *Vostochno-evropejsky zhurnal peredovyh tehnology*. – 2010. – №3/3(45). – P. 37 – 40.

12. *V.V. Romanov, V.N. Chobenko, V.V. Kuznetsov, S.N.Movchan, O.S. Kucherenko, A.P. Shevtsov.* Performances and Application Perspectives of Air heat Recovery Turbine Units // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, GT 2010, June 14 – 18, 2010, Glasgow, UK.*

13. *Power engineering: history, present and future.* V. 3. Development of thermal and nuclear power. Edited by Plachkov I.V. K.: 2008. – 528 p.

14. *Procedure of determining production and technological costs of natural gas for its production transportation and operation of underground storage.* – K.: 2008. [mpe.kmu.gov.ua/fuel/doccatalog/document?id=134907s](http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/doccatalog/document?id=134907s).

15. *Cogeneration gas-stream-turbine plant "Vodolei – 16".* [Ukrainemade.com/ru/technologies/261](http://Ukrainemade.com/ru/technologies/261).

Получено 30.12.2014

Received 30.12.2014