

УДК 621.438

## РАБОТА КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК СЛОЖНЫХ ЦИКЛОВ НА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

*Матвеевко В.Т.*

*профессор, доктор технических наук,  
ФГБНУ «Институт природно-технических систем», Севастополь*

*Дологлоян А.В.*

*доцент, кандидат технических наук,  
ФГБНУ «Институт природно-технических систем», Севастополь*

*Очеретяный В.А.*

*доцент, кандидат технических наук,  
ФГАОУВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь*

### **Аннотация**

Представлены результаты исследований и разработок когенерационных газотурбинных двигателей (ГТД) сложных циклов. Показано, что применение в ГТД турбины перерасширения (ТП) позволяет повысить экономичность двигателя наравне с применением регенерации теплоты (Р). Сочетание приведенных двух способов в ГТД с ТП и Р дает дальнейшее повышение экономичности двигателя. Установлено, что на частичных нагрузках каждая конструктивная схема имеет свои закономерности изменения теплотехнических характеристик, определяющие область применения когенерационных ГТД. Приводится пример возможности изменения рабочего процесса в двигателе позволяющего управлять потоками энергии в когенерационной энергоустановке.

Ключевые слова: когенерационный газотурбинный двигатель, турбина перерасширения, регенерация теплоты, управление потоками энергии, переменные режимы.

### **Введение**

Применение когенерационных технологий является одним из

результативных путей повышения эффективности использования тепловой энергии топлива на стадии генерирования энергии.

Газотурбинные установки (ГТУ) наиболее приспособлены для комбинированного производства энергии и в перспективе займут существенную нишу в производстве энергии [1].

Широкое применение когенерационных технологий в энергетике, то есть комбинированного производства тепловой и электрической энергии, принципиально возможно при децентрализации генерирующих мощностей для обеспечения энергией обособленных объектов промышленности, коммунального хозяйства и транспортных комплексов.

Степень использования энергии топлива в когенерационной ГТУ можно получить не менее 75...85% при приближении энергогенерирующей установки к потребителю энергии. Обычно производство электрической и тепловой энергии принципиально достигается в газотурбинных двигателях (ГТД) простого цикла с утилизацией теплоты выхлопных газов в паровых или водогрейных утилизационных котлах [2]. Такую тепловую схему можно считать базовой (рис. 1), в которой из 75...85% полезно использованной энергии топлива в электрическую превращается 25...35%.

Дальнейшее повышение энергоэффективности когенерационной установки видится в повышении доли вырабатываемой электрической энергии, при сохранении общего высокого уровня общей тепловой эффективности, и в управлении потоками энергии.

### **1. Направления повышения эффективности когенерационной ГТУ**

В соответствии с поставленной задачей повышения эффективности когенерационной ГТУ, которые могут быть как энергетические, так и приводные, необходимо повысить КПД двигателя. Такая задача решается в основном, при сохранении начальной температуры газа перед турбиной в двигателе, за счет применения сложных термодинамических циклов ГТД.

Усложнение ГТД простого цикла возможно произвести нетрадиционным способом посредством применения перерасширения газа на выходе из силовой

турбины (рис. 2), что позволит получить за вычетом энергии на дожимание газа дополнительную работу, которая повысит КПД и удельную мощность двигателя [3]. Конструктивно реализуется такой метод посредством присоединения к выхлопу двигателя турбокомпрессорного утилизатора (ТКУ). ТКУ состоит из турбины перерасширения (ТП), дожимающего компрессора (ДК) и охладителя газа между ними. Охладитель газа в ТКУ используется в качестве водогрейного котла-утилизатора.

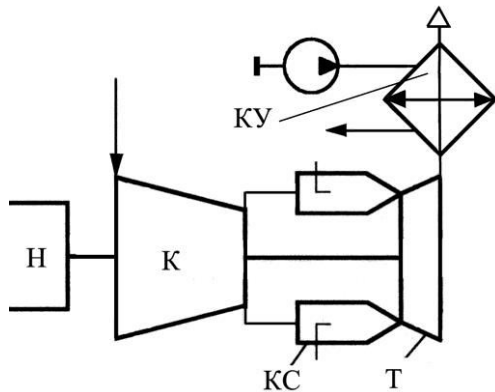


Рис. 1. Схема когенерационного ГТД

Н – нагрузка; К – компрессор;  
КС – камера сгорания; Т – турбина; КУ – котел-утилизатор

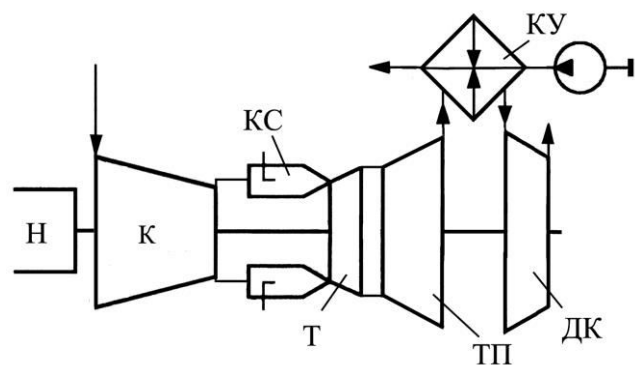


Рис. 2. Схема когенерационного ГТД с турбокомпрессорным утилизатором

Н – нагрузка; К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ТП – турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор; КУ – котел-утилизатор

На втором этапе усложнение когенерационного ГТД простого цикла традиционно проводится путем введения регенерации теплоты выхлопных газов двигателя для подогрева сжатого в компрессоре воздуха перед камерой сгорания (рис. 3). При применении регенерации теплоты растет КПД двигателя, в конструкции двигателя появляется дополнительный элемент – подогреватель воздуха (регенератор).

Дальнейшее повышение энергоэффективности когенерационного ГТД осуществляется посредством сочетания приведенных выше двух способов повышения экономичности ГТД [4]. Конструктивно эта схема реализуется встраиванием регенератора после турбины перерасширения в ТКУ, так как газ после турбины перерасширения обладает еще достаточным тепловым

потенциалом. Такая схема представлена на рис. 4.

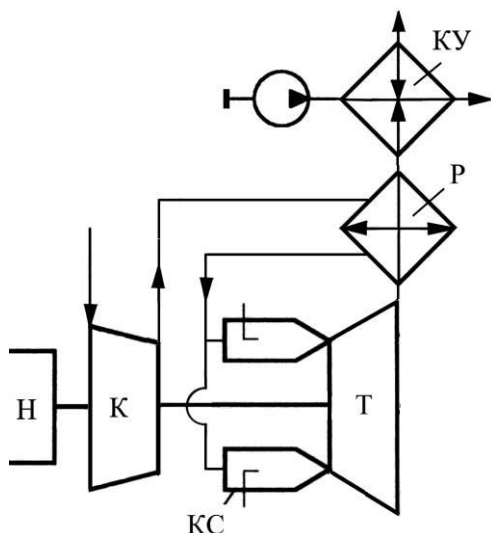


Рис.3. Схема когенерационного ГТД с регенерацией теплоты

Н – нагрузка; К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; Р – регенератор; КУ – котел-утилизатор

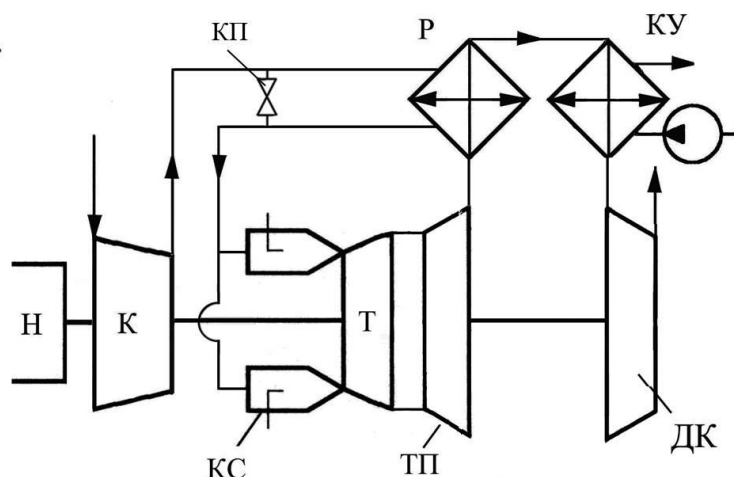


Рис.4. Схема ГТД с турбокомпрессорным утилизатором

Н – нагрузка; К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ТП – турбина перерасширения; Р – регенератор; КУ – котел-утилизатор; ДК – дожимающий компрессор; КП – клапан перепуска воздуха

## 2. Характеристики ГТД сложных циклов на номинальных режимах

Моделирование термодинамических процессов в циклах ГТД производилось на основе отработанных математических моделей для ГТД простого цикла, с турбиной перерасширения и регенерацией теплоты, разработанных по результатам теоретических и экспериментальных исследований [5, 6]. Математические модели циклов ГТД по своей структуре были унифицированы между собой.

С целью определения характеристик и основных особенностей цикла ГТД с турбиной перерасширения их можно представить в виде цикла Брайтона, последовательно усложненного применением силовой турбины перерасширения, в которой газ расширяется до давления меньше атмосферного, в охладителе газа охлаждается, и далее дожимающим компрессором выбрасывается в атмосферу (см. рис. 2). Далее в модель вводится регенерация теплоты, осуществляемая за турбиной перерасширения. При степени

повышения давления в ДК  $\pi_{\text{дк}}=1$  модель для сложного цикла становится пригодной для определения характеристик цикла ГТД с регенерацией теплоты, а при  $\pi_{\text{дк}}=1$  и степени регенерации  $\sigma = 0$  определяются характеристики простого цикла.

Программное обеспечение, используя универсальную математическую модель ГТД сложного цикла, позволило получить многослойное поле значений характеристик и определить области оптимальных значений параметров циклов.

На рис. 5 показаны зависимости эффективного КПД ( $\eta_e$ ) и удельной мощности ( $n_{\text{уд}}$ ) циклов ГТД с регенерацией теплоты ( $\sigma=0,85$ ), с турбиной перерасширения ( $\pi_{\text{дк}}=2,25$ ) и ГТД с ТП и Р (сложного цикла) от изменения величины степени повышения давления в компрессоре двигателя  $\pi_k$ . На рис. 5 для сравнения приведены параметры ГТД простого цикла (кривая П). Обозначения для ГТД с регенерацией теплоты принято (Р), для ГТД с турбиной перерасширения (ТП).

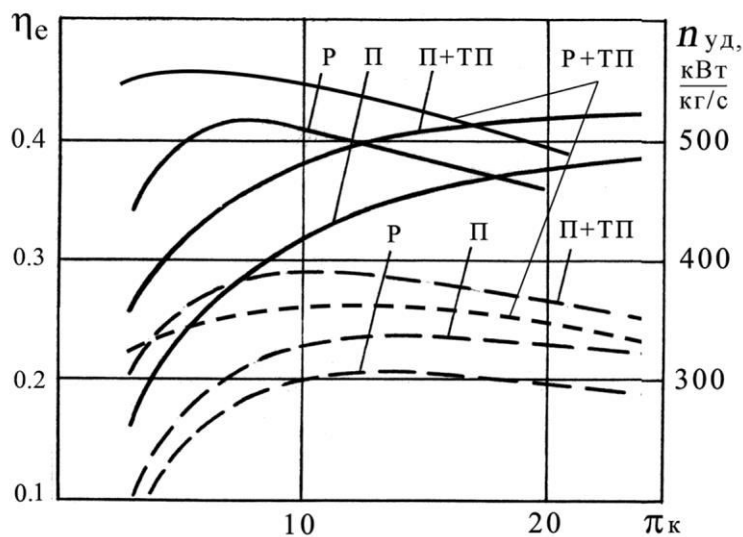


Рис. 5. Зависимости эффективного КПД  $\eta_e$  (сплошные линии), и удельной мощности  $n_{\text{уд}}$  (прерывистые линии) от  $\pi_k$  при  $T_3 = 1373 \text{ К}$ ,  $\sigma=0,85$  и  $\pi_{\text{дк}} = 2,25$

На представленных зависимостях на рис. 5 видно, что увеличение КПД ( $\eta_e$ ) для цикла ГТД с регенерацией теплоты по сравнению с циклом Брайтона относительно составляет 10...12 %. Удельная мощность ( $n_{\text{уд}}$ ) во всем диапазоне изменения  $\pi_k$  несколько меньше, чем в простом цикле.

Характеристики циклов ГТД с турбиной перерасширения определялись с учетом оптимального значения степени повышения давления в дожимающем компрессоре  $\pi_{\text{дк}}$ . В выполненных исследованиях [7] определены оптимальные значения  $\pi_{\text{дк}}$ , которые составляют от 2,0 до 2,5 в зависимости от температуры газа на выхлопе двигателя. Температура газа перед дожимающим компрессором была принята равной 323 К, при этом увеличение эффективного КПД ( $\eta_e$ ) и удельной мощности ( $n_{\text{уд}}$ ) для цикла ГТД с турбиной перерасширения относительно составило 10...15% по отношению к ГТД простого цикла.

Необходимо отметить, что оптимальные по КПД  $\pi_k$  для цикла ГТД с ТП и простого цикла практически совпадают, что обеспечивает совместную работу ГТД простого цикла и турбокомпрессорного утилизатора.

Сочетание двух способов повышения экономичности ГТД применено в цикле ГТД с турбиной перерасширения и регенерацией теплоты (ГТД с ТП и Р, рис. 4). Установлено (см. рис. 5), что увеличение эффективного КПД ( $\eta_e$ ) для цикла ГТД с ТП и Р относительно составляет 20...25 % по сравнению с простым циклом. Оптимальные по КПД  $\pi_k$  в цикле ГТД с ТП и Р даже несколько меньше, чем в цикле ГТД и Р и составляет значения от 4 до 6. Наибольшие значения удельной мощности в циклах ГТД с ТП и Р смещены в сторону меньших  $\pi_k$  и значительно превышают значения для ГТД и Р.

Таким образом, анализ характеристик ГТД показывает, что ГТД с ТП и Р может быть создан на базе унифицированного газогенератора ГТД с Р.

В Севастополе создан опытный газогенератор АИ-8 с турбокомпрессорным утилизатором (рис. 6). Испытания газотурбогенератора подтвердили достоверность теоретических разработок по турбокомпрессорной утилизации теплоты, установка обладает хорошими эксплуатационными качествами на всех режимах работы. Установлены уникальные свойства ГТД с ТКУ постоянно высокий теплотехнический (общий) КПД на всех режимах нагружения.

### **3. Работа когенерационных ГТУ на переменных режимах.**

Для когенерационных ГТУ, обеспечивающих энергией автономные коммунальные и промышленные объекты, характерна работа на частичных нагрузках, причем не только в пределах сезона, но и в течение суток [9]. Обычно при изменении электрической нагрузки, тепловая мощность часто должна быть более стабильной. Поэтому выбор оптимальной тепловой и конструктивной схемы установки для реализации гибких когенерационных технологий являются важным эксплуатационным фактором.

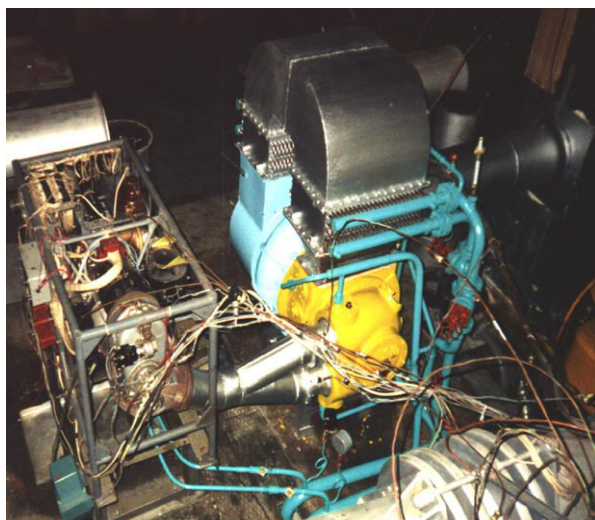


Рис. 6. Газотурбогенератор с турбокомпрессорным утилизатором мощностью до 60 кВт

Расчеты характеристик ГТД сложных циклов на переменных режимах производились по методикам, предложенным в работах [7, 8].

При обеспечении электрической энергией некоторых промышленных объектов требуется более лучшая приемистость ГТД, при этом предпочтительна схема когенерационного ГТД с заблокированной силовой турбиной (рис.1).

Вал газогенератора с заблокированной силовой турбиной воспринимает генераторную нагрузку, при которой обороты турбины на всех режимах нагружения поддерживаются постоянными.

В схеме ГТД с турбиной перерасширения ТКУ присоединяем к выхлопу ГТД, т.е. механически не связан с силовой турбиной. Степень повышения давления в дожимающем компрессоре  $\pi_{\text{дк}}$  определяется из баланса мощностей между ТП и ДК.

На рис. 7 показаны зависимости характеристик ГТД с блокированной силовой турбиной (СТ) и ТКУ (схема 1Б+ТП) от относительной эффективной мощности  $\bar{N}_e$ . На рис. 7 показаны также для сравнения характеристики на частичных нагрузках ГТД с блокированной СТ (схема 1Б).

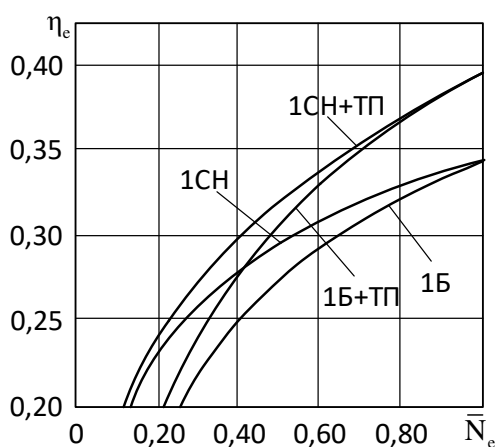


Рис. 7. Характеристики циклов ГТД с ТКУ (схемы 1Б+ТП и 1СН+ТП) на частичных генераторных нагрузках при  $T_3 = 1373 \text{ К}$ ,  $\pi_k = 18$ ;  $\pi_{dk} = 2,25$

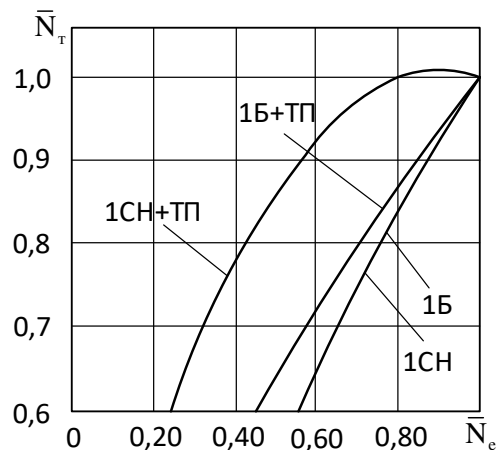


Рис. 8. Теплотехнические характеристики ГТД с ТКУ (схема 1Б+ТП и 1СН+ТП) на частичных генераторных нагрузках при  $T_3 = 1373 \text{ К}$ ,  $\pi_k = 18$ ;  $\pi_{dk} = 2,25$

При всех значениях относительной мощности  $\bar{N}_e$  эффективный КПД  $\eta_e$  в схеме ГТД с ТКУ (схема 1Б+ТП) выше, чем в ГТД простого цикла (1Б).

На практике возможно применение ГТД со свободной силовой турбиной (схема 1СН), к выхлопу которой можно присоединить свободный ТКУ (схема 1СН+ТП). Расчеты показывают, что ГТД со свободной СТ имеют более высокий КПД на частичных нагрузках, чем ГТД с блокированной СТ.

Когенерационная установка должна обладать высокой общей энергоэффективностью на всех эксплуатационных режимах. Для оценки теплотехнических характеристик газотурбинных установок, имеющих в своем составе устройство для внешней поставки теплоты, применим удельный показатель: теплотехнический (общий) КПД  $\eta_{тт}$ , который определяется по формуле:

$$\eta_{тт} = (H_e + Q_T) / Q,$$



где  $H_e$  – удельная эффективная работа в цикле;  $Q_t$  – удельная полезная теплота;  $Q$  – теплота, подведенная в цикл.

Результаты расчетов теплотехнических характеристик ГТД с ТКУ на частичных генераторных нагрузках показывают, что каждая схема имеет свои закономерности изменения теплотехнических характеристик (рис. 8). Если в ГТД с блокированной СТ относительная теплотехническая мощность  $\bar{N}_{\text{ТТ}}$  изменяется пропорционально  $\bar{N}_e$ , то в ГТД со свободной СТ и ТКУ на эксплуатационных режимах при  $\bar{N}_e = 0,6 \dots 1,0$  остается практически стабильной. Указанное свойство предпочтительно для когенерационных ГТУ обеспечивающих энергией предприятия городского хозяйства, особенно в зимний период.

Отдельно стоит вопрос определения характеристик когенерационных ГТД с регенерацией теплоты на переменных режимах. Для обеспечения энергией локальных объектов (здания, сооружения) применяются микрогазотурбинные установки, которые, как правило, в рабочем цикле содержат регенерацию теплоты.

На рис. 9 и 10 показаны зависимости характеристик ГТД сложных циклов с регенерацией теплоты от изменения относительной эффективной мощности  $\bar{N}_e$ . Для сравнения определялись характеристики на частичных нагрузках одновального ГТД (схема 1Б) при  $\pi_k = 18$ . На рис. 9 и 10 представлены характеристики ГТД с Р (схема 1Б/Р), а также ГТД с ТП и Р (схема 1Б/Р+ТП). Во всех схемах вал генератора сблокирован с силовой турбиной.

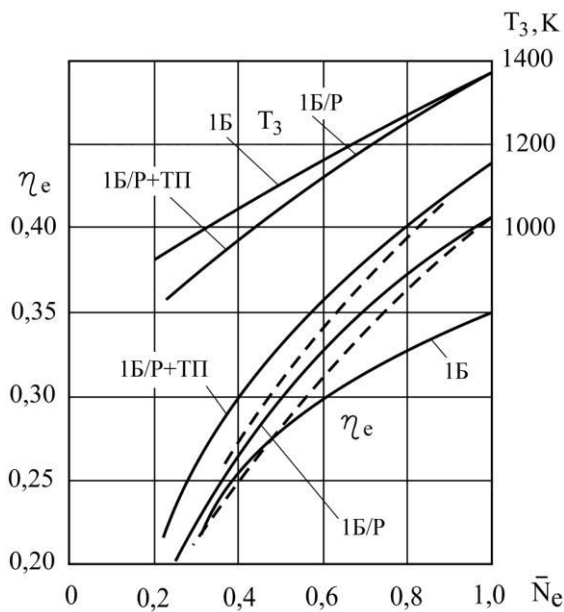


Рис. 9. Характеристики циклов ГТД с регенерацией теплоты на частичных (генераторных) нагрузках при  $T_3=1373\text{K}$ ,  $\pi_k=5-6$ ,  $\pi_{\text{дк}}=2,0$  и  $\sigma = 0,85$

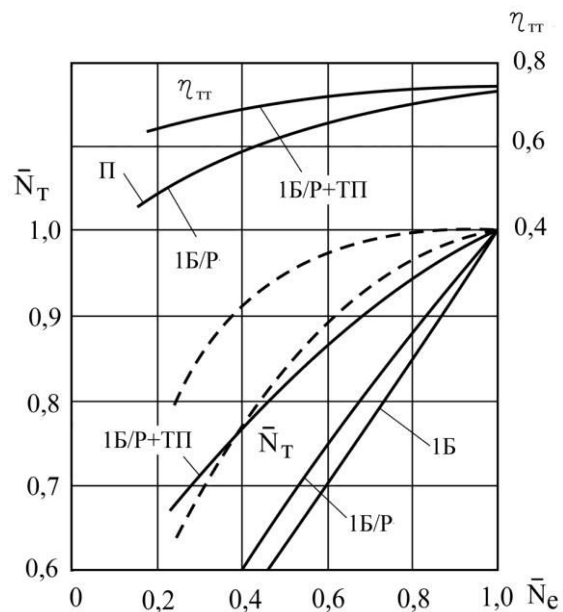


Рис. 10. Теплотехнические характеристики ГТД с регенерацией теплоты на частичных (генераторных) нагрузках при  $T_3=1373\text{K}$ ,  $\pi_k=5-6$ ,  $\pi_{\text{дк}}=2,0$  и  $\sigma = 0,85$

Анализ характеристик ГТД установил, что КПД ( $\eta_e$ ) ГТД с ТП и Р и ГТД с Р выше, чем в ГТД простого цикла как на номинальной нагрузке, так и частичном нагружении при всех значениях относительной мощности  $\bar{N}_e$ . Преимущество ГТД с ТП и Р особенно ощутимо при уменьшении нагружения двигателя.

Когенерационная установка должна обладать высокой общей энергоэффективностью на всех эксплуатационных режимах. Для оценки теплотехнических характеристик газотурбинных установок, имеющих в своем составе устройство для внешней поставки теплоты, применим удельный показатель: теплотехнический (общий) КПД  $\eta_{\text{тт}}$ , который определяется по формуле:

$$\eta_{\text{тт}} = (H_e + Q_T) / Q,$$

где  $H_e$  – удельная эффективная работа в цикле;  $Q_T$  – удельная теплота теплофикации;  $Q$  – теплота, подведенная в цикл.

В целом теплотехнический КПД показывает степень использования

располагаемой теплоты сгорания топлива на выработку механической и тепловой энергии.

На рис. 10 представлены теплотехнические характеристики когенерационных ГТД при генераторном нагружении на частичных режимах работы. Теплотехнический КПД ГТД с ТП и Р на частичных нагрузках более высокий, чем в ГТД с Р. Это объясняется тем, что в ТКУ относительная тепловая мощность  $\bar{N}_T$  на частичных нагрузках более высокая, чем в утилизационных котлах ГТД с Р и ГТД простого цикла.

Увеличить тепловую мощность когенерационного ГТД с ТП и Р на частичных нагрузках можно посредством перепуска циклового воздуха мимо регенератора. Такой способ позволяет перераспределить тепловой поток за турбиной перерасширения между регенератором и охладителем газа – утилизационным котлом [10].

На рис. 10 пунктирной линией показаны значения относительной тепловой мощности  $\bar{N}_{TT}$  при равномерном увеличении перепуска воздуха мимо регенератора в ГТД с ТП и Р и ГТД с Р. Хотя эффективный КПД при этом несколько падает, но на режиме от  $\bar{N}_e=1$  до  $\bar{N}_e=0,6$  в ГТД с ТП и Р тепловая мощность практически постоянная. Увеличив долю перепуска воздуха, можно поддержать постоянство  $\bar{N}_{TT}$  на режимах меньшей нагрузки.

### **Заключение**

1. Когенерационные ГТД сложного цикла более экономичны по сравнению с когенерационным ГТД простого цикла как на номинальных, так и на частичных нагрузках.

2. Тепловые и конструктивные схемы ГТД с турбиной перерасширения и регенератором приспособлены к изменению рабочего процесса в двигателе и позволяют реализовать гибкие когенерационные технологии, то есть создать когенерационные установки с управляемыми потоками энергии.

3. ГТД с турбокомпрессорным утилизатором могут быть созданы на базе газогенераторов ГТД простого цикла, выпускаемых в настоящее время

промышленностью.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18–48-920005.*

### Список литературы

1. Фаворский О.Н. Эффективные технологии производства электрической и тепловой энергии с использованием органического топлива/ О.Н. Фаворский, А.И. Леонтьев, В.А. Федоров, О.О. Мильман. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 16 с.

2. Шелковский Б.И., Пашотченко А.С., Захаров В.П. Утилизация и использование вторичных энергоресурсов компрессорных станций/ Б.И. Шелковский, А.С. Пашотченко, В.П. Захаров – М.: Недра, 1991.–160 с.

3. Матвеевко В.Т. Энергетические и приводные газотурбинные двигатели с блокированной силовой турбиной /В.Т.Матвеевко, В.А. Очеретяный, А.Г. Андриец // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2013. – Вып. 3/12(63). – С. 33-37.

4. Матвеевко В.Т., Очеретяный В.А., Андриец А.Г. Перспективы повышения эффективности ГТД с регенерацией теплоты усложнением цикла// Вестник СевНТУ. Сб. научн. трудов. – Севастополь, 2010.–Вып. 106.–С. 120-123.

5. Матвеевко В.Т. Методика расчета энергетического ГТД с турбиной перерасширения на переменных режимах / В.Т. Матвеевко, Л.И. Слободянюк, В.А. Очеретяный // Энергетика (Изв. высших учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. - № 6. – С. 51-56.

6. Котляр И.В. Частичные и переходные режимы работы судовых газотурбинных установок/ И.В.Котляр. – Л.Судостроение, 1966. – 290 с.

7. Matviienko V., Ocheretuaniiy V. Variable regimes operation of cogenerative gas-turbine engines with overexpansion turbine //Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT 2010-22029.

8. Матвеевко В.Т. Теплотехнические характеристики когенерационных газотурбогенераторов с регенерацией теплоты при переменном режиме работы // Авіаційно-космічна техніка і технологія; Зб. наук.праць – Харків: НАУ «ХАІ», 2001. Вип. 23. – С. 95-98.

9. Матвеевко В.Т. Газотурбинные двигатели сложных циклов для морских нефтегазовых сооружений/ В.Т. Матвеевко, В.А. Очеретяный// Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017.–№ 9.–С.17-21.

10. Матвеевко В.Т. Гибкие когенерационные технологии в газотурбинной установке сложного цикла с турбиной перерасширения/ В.Т. Матвеевко, В.А. Очеретяный // Промышленная теплотехника. –2007. – Т.29. –№ 7. – С. 97-101.

11. Matviienko V., Ocheretuaniiy V., Andriets O., Riznik S. Working Process Control in a ship gas turbine of complex cycle//Proceedings of ASME Turbo Expo 2016, June 13-17, Seoul, South Korea, GT 2016-56073.