

УДК 621.577

Д.В. КОНОВАЛОВ, А.Н. РАДЧЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

## ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПРОСТОГО ЦИКЛА С ТУРБИНОЙ ПЕРЕРАСШИРЕНИЯ И ТЕРМОПРЕССОРОМ

Выполнена оценка эффективности применения в газотурбинном двигателе простого цикла турбины перерасширения и бустерного термопрессора, установленных в газовыпускном тракте двигателя. Показана возможность существенного приращения мощности газотурбинного двигателя за счет использования турбины перерасширения и термопрессора. Установлены значения температуры выпускных газов на входе в турбину перерасширения и, соответственно, в термопрессоре, а также разности температур выпускных газов, срабатываемой в термопрессоре, при которых можно обойтись без поджимающего компрессора.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, простой цикл, выпускные газы, турбина перерасширения, поджимающий компрессор, термопрессор, впрыск воды, испарение.

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Одним из способов повышения эффективности ГТД является дополнительное расширение выпускных газов ниже атмосферного давления во вспомогательной турбине перерасширения, устанавливаемой после основной (силовой) турбины (рис. 1). Получаемая в турбине перерасширения мощность расходуется на поджатие отработавших газов до атмосферного давления компрессором, а избыточная мощность (сверх потребляемой компрессором) может передаваться на гребной вал или использоваться для привода электрогенератора [1]. Для уменьшения работы сжатия в компрессоре газы перед подачей их в компрессор охлаждают в холодильнике.

Уменьшить работу сжатия можно с помощью струйного аппарата – термопрессора, в котором увеличение полного давления газа происходит за счет отвода от него теплоты на испарение жидкости, впрыскиваемой в ускоренный газовый поток [2]. Хотя возможность протекания процесса испарительного охлаждения газа с повышением полного давления была доказана Л. А. Вулисом еще в 1946 году [3], однако применение термопрессора для повышения эффективности ГТД не исследовалось.

**Целью исследования** является оценка эффективности применения термопрессора в ГТД простого цикла с турбиной перерасширения.

### 2. Анализ результатов исследования

Сократить затраты мощности на привод поджимающего компрессора и за счет этого увеличить по-

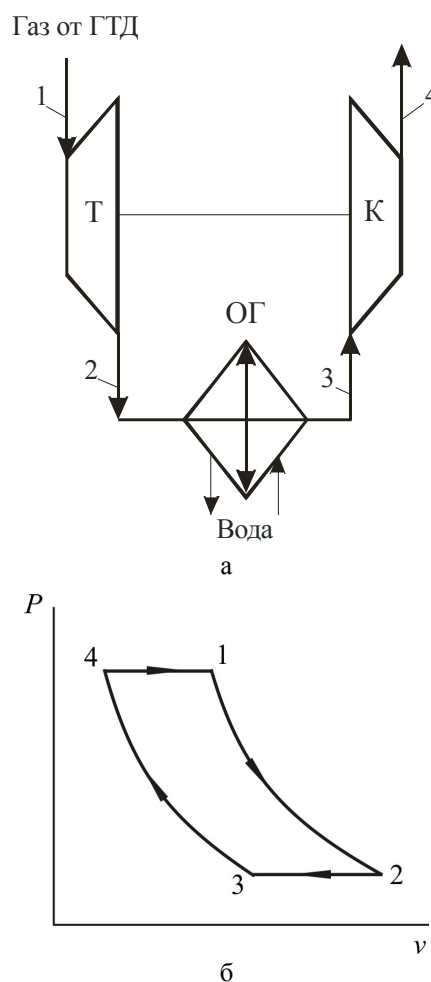


Рис. 1. Схема дополнительного контура ГТД с турбиной перерасширения, поджимающим компрессором и водяным охладителем газов (а) и цикл ГТД (б): Т – турбина перерасширения; К – компрессор; ОГ – охладитель газов водяной

лезную мощность, получаемую в турбине перерасширения и в газотурбинной установке в целом, можно, повышая давление на всасывании компрессора термопрессором (рис. 2, а).

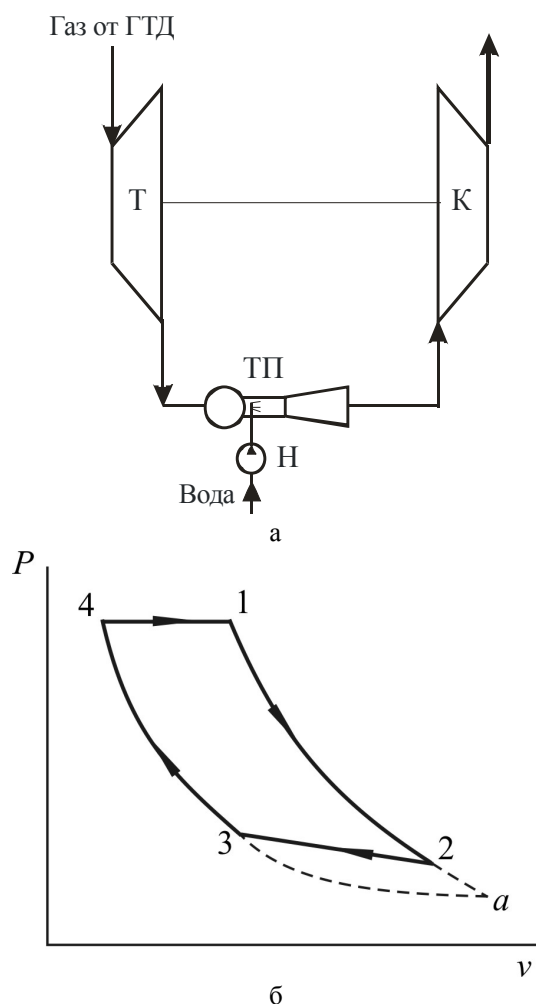


Рис. 2. Схема дополнительного контура ГТД с турбиной перерасширения, поджимающими термопрессором и компрессором (а) и цикл ГТД (б): Т – турбина перерасширения; К – компрессор; ТП – термопрессор; Н – насос

Термопрессор представляет собой компрессор струйного типа, в котором потенциальная энергия газа сначала превращается (в сопле термопрессора) в кинетическую энергию с увеличением скорости газа на выходе из сопла до чисел Маха, близких 1. В ускоренный газовый поток на выходе из сопла впрыскивают форсункой тонкого распыла воду, и за счет мгновенного испарения капель происходит интенсивное охлаждение газа с повышением его давления сначала в камере смешения, а затем и диффузоре термопрессора. При определенном сочетании параметров газа и расходов впрыскиваемой воды давление газа на выходе из термопрессора оказывается выше, чем на его входе, т.е. термо-

прессор выполняет функцию компрессора, причем без затрат механической энергии.

В термопрессионной установке с турбиной перерасширения газ после основного ГТД поступает в турбину перерасширения, где адиабатно расширяется до давления  $P_2$  (процесс 1–2 на рис. 2, б).

В сопле термопрессора газ адиабатно расширяется до давления  $P_a$  ниже атмосферного (процесс 2–а) и политропно сжимается в его диффузоре до давления  $P_3 > P_2$  (процесс а–3). Линия 2–3 отображает условный процесс сжатия газового потока в термопрессоре. При этом общий расход газа возрастает на величину, равную количеству впрыскиваемой в термопрессор воды. Затем газ адиабатно сжимается в турбокомпрессоре до давления, несколько выше атмосферного.

Результаты расчетов показывают, что при температуре выпускных газов за ГТД, т.е. на входе в турбину перерасширения,  $t_1 = 450...550$  °С температура газов за турбиной перерасширения (на входе в термопрессор) составляет  $t_2 = 300...400$  °С. При срабатывании в термопрессоре большого перепада температур по газу  $\Delta t$  – от температуры газов  $t_2 = 300...400$  °С на входе в термопрессор до температуры газов 50 °С на выходе из него – в термопрессоре можно получить заметное увеличение давления (рис. 3). При этом характеристики термопрессора рассчитывали по известной методике [2]. Значение температуры газов на выходе из термопрессора принималось 50 °С, т.е. равным их температуре за водяным охладителем газов в установке с турбиной перерасширения и (схема на рис. 1).

Из рис. 3, а видно, что при давлении выпускных газов на входе в термопрессор (за турбиной перерасширения)  $P_2 = 0,8 \cdot 10^5$  Па и разности температур газов в термопрессоре больше 300 °С термопрессор в состоянии повысить давление газа от  $P_2$  до атмосферного и даже выше, т.е. можно обойтись без поджимающего компрессора (схема на рис. 4).

При этом относительное приращение давления выпускных газов в термопрессоре  $\Delta P$  составит 15...20 % (рис. 3, б). Возможность повышения давления отработавших газов ГТД в термопрессоре на 10...25 % подтверждена экспериментально в работе [2].

Результаты расчета относительного приращения полезной мощности ГТД  $\Delta N$  за счет применения турбины перерасширения с компрессором и термопрессором в зависимости от давления на выходе из турбины перерасширения  $P$  при температурах газа на входе в турбину перерасширения  $t_1 = 460$  и 550 °С приведены на рис. 5.

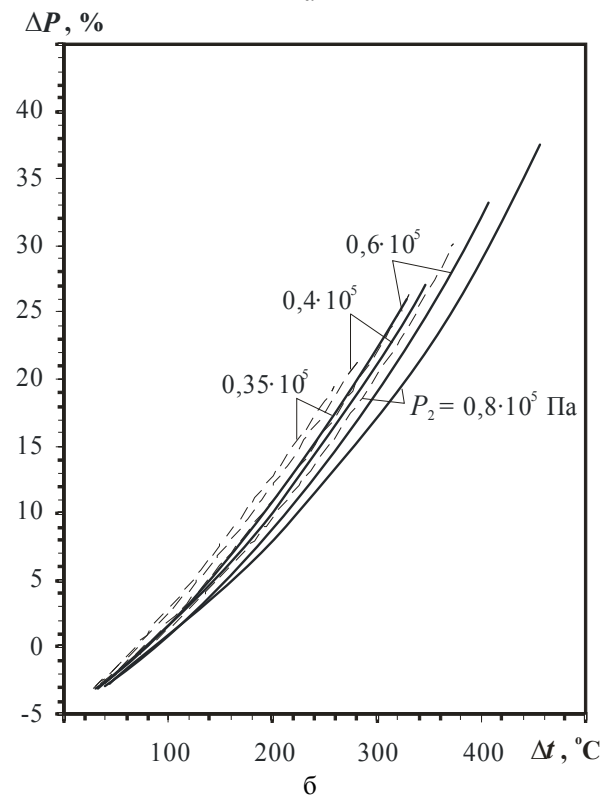
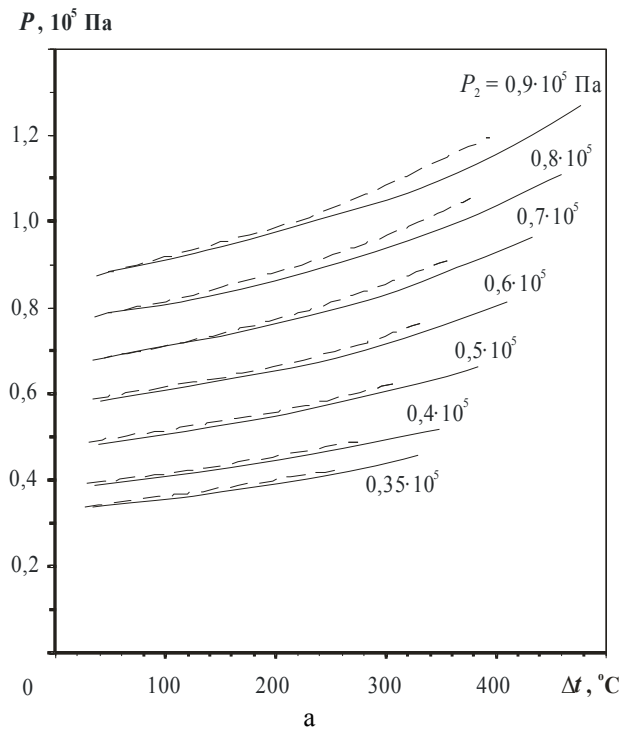


Рис. 3. Давление выпускных газов на выходе из термопрессора  $P$  (а) и относительные приращения давления газов  $\Delta P$  в термопрессоре (б) в зависимости от разности температур выпускных газов  $\Delta t$  в термопрессоре при разном давлении  $P_2$  газов на входе в термопрессор (после турбины перерасширения) и температурах газов перед турбиной перерасширения  $t_1$ :  
 — — — —  $t_1 = 450^\circ\text{C}$ ;  
 - - - - -  $t_1 = 550^\circ\text{C}$

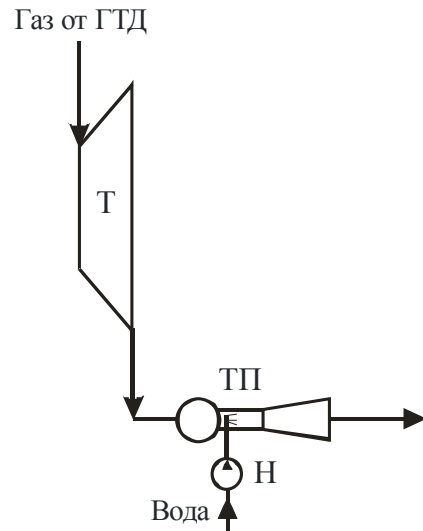


Рис. 4. Схема контура ГТД с турбиной перерасширения и термопрессором без поджимающего компрессора

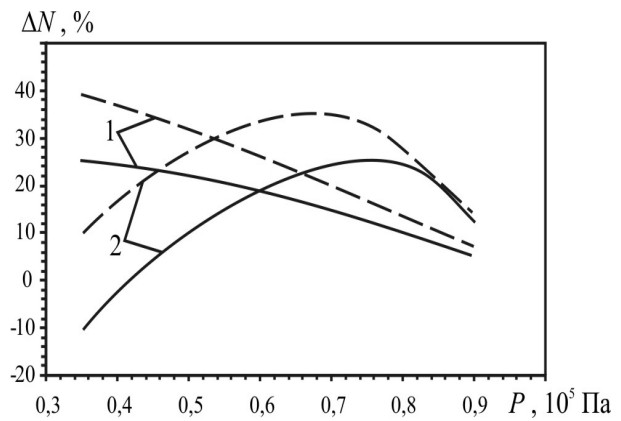


Рис. 5. Зависимость относительного приращения мощности ГТД  $\Delta N$  от давления на выходе из турбины перерасширения  $P$ :  
 1 – без термопрессора; 2 – с термопрессором;  
 — — — —  $t_1 = 460^\circ\text{C}$ ; - - - - -  $t_1 = 550^\circ\text{C}$

**Анализ приращений полезной мощности ГТД с турбиной перерасширения, компрессором и термопрессором по сравнению с базовым ГТД (без турбины перерасширения) в относительном виде.** Как видно из рис. 5, при температуре газа на входе в турбину перерасширения  $t_1 = 550^\circ\text{C}$  максимальное приращение мощности ГТД ( $\Delta N = 35\%$ ) получают при давлении газа на входе в термопрессор (выходе из турбины перерасширения)  $P = 0,66 \cdot 10^5$  Па, а в случае температуры  $t_1 = 450^\circ\text{C}$  максимальное приращение мощности ГТД ( $\Delta N = 25\%$ ) получают при  $P = 0,76 \cdot 10^5$  Па. При этом срабатываемый в термопрессоре перепад температур  $\Delta t$  по газу должен быть не менее  $300^\circ\text{C}$ , а массовая доля впрыскиваемой в термопрессор воды –  $0,7...0,8$ .

## Выводы

1. Применение в ГТД турбины перерасширения, использующей энергию расширения выпускных газов с температурой 450...550 °С до давления ниже атмосферного, с последующим повышением их давления в бустерных термопрессоре и компрессоре обеспечивает приращение мощности ГТД на 25...35 % по сравнению с базовым вариантом без турбины перерасширения.

2. При температурах выпускных газов на входе в турбину перерасширения выше 450 °С и разностях их температур, срабатываемых в термопрессоре, не менее 300 °С, возможна работа установки без компрессора.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента Украины (Розпорядження Президента України про призначення грантів Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених на 2009 рік від 16.12.2008 р. № 336/2008-рп).

Поступила в редакцию 12.02.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Живица, Одесская национальная морская академия, Одесса, Украина.

## ГАЗОТУРБИННИЙ ДВИГУН ПРОСТОГО ЦИКЛУ З ТУРБИНОЮ ПЕРЕРОЗШИРЕННЯ ТА ТЕРМОПРЕССОРОМ

*Д.В. Коновалов, А.М. Радченко*

Виконана оцінка ефективності застосування в газотурбінному двигуні простого циклу турбіни перерозширення та бустерного термопрессора, встановлених у газовипускному тракті двигуна. Показана можливість суттєвого приросту потужності газотурбінного двигуна за рахунок використання турбіни перерозширення та термопрессора. Встановлені значення температури випускних газів на вході в турбину перерозширення і, відповідно, в термопрессор, а також різниці температур випускних газів, що спрацьовуються в термопрессорі і за яких можна обійтись без підтискуючого компрессора.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, простий цикл, випускні гази, турбіна перерозширення, підтискуючий компрессор, термопрессор, упорскування води, випаровування.

## THE GAS TURBINE ENGINE OF A SIMPLE CYCLE WITH OVER EXPANSION TURBINE AND THERMOPRESSOR

*D.V. Kononov, A.N. Radchenko*

The effectiveness of application in the gas turbine engine of a simple cycle the over expansion turbine and buster thermopressor, placed in the exhaust gas piping, was estimated. The possibility of achievement of significant increase in the gas turbine engine power due to the use of over expansion turbine and thermopressor was shown. The values of temperature of exhaust gases at the inlet of the over expansion turbine and the thermopressor respectively and the temperature difference of exhaust gases in the thermopressor allowing to avoid the booster compressor were evaluated.

**Key words:** gas turbine engine, simple cycle, exhaust gases, over expansion turbine, buster compressor, thermopressor, water injection, evaporation.

**Коновалов Дмитрий Викторович** – канд. техн. наук, доцент Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: dimitriy\_ko@mail.ru.

**Радченко Андрей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.