

УДК 621.577

А.Н. РАДЧЕНКО

*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина*

## ТРИГЕНЕРАЦИЯ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПРОСТОГО ЦИКЛА

*Выполнен анализ теплового потенциала уходящих газов газотурбинных двигателей простого цикла и выявлены резервы повышения мощности и коэффициента полезного действия газотурбинных двигателей путем предварительного охлаждения наружного воздуха в эжекторных теплоиспользующих холодильных машинах, утилизирующих теплоту уходящих газов. Показано, что предварительное охлаждение наружного воздуха перед компрессором газотурбинных двигателей в эжекторных теплоиспользующих холодильных машинах обеспечивает значительное повышение мощности и коэффициента полезного действия двигателей.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, простой цикл, предварительное охлаждение воздуха, уходящие газы, низкокипящее рабочее тело, теплоиспользующая холодильная машина.

### 1. Состояние проблемы, постановка цели исследования

Эффективность ГТД простого (нерегенеративного) цикла существенно зависит от температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  на входе компрессора. Так, увеличение  $t_{нв}$  на 10 °С вызывает уменьшение мощности тяжелых стационарных ГТД типа FR-7 на 5...9 %, а мощность конвертированных авиационных ГТД типа LM-6000 с повышением температуры  $t_{нв}$  от 15 до 35 °С снижается на 20 % по сравнению с ее значениями при температуре  $t_{нв} = 15$  °С, соответствующей ISO 3977 [1].

Существенное ухудшение показателей ГТД (мощности, КПД, удельного расхода топлива) с повышением  $t_{нв}$  послужило толчком к поиску путей демпфирования отрицательного влияния неблагоприятных климатических условий, и прежде всего предварительным охлаждением наружного воздуха на входе в компрессор ГТД. Наибольшее распространение в ГТД получило испарительное охлаждение воздуха, при котором деминерализованная вода под высоким давлением впрыскивается форсунками тонкого распыла в воздушный поток на входе компрессора ГТД [1 – 3].

Потенциальная глубина предварительного, до входа в компрессор, охлаждения наружного воздуха при испарительном охлаждении определяется разностью его температур по сухому и мокрому термометрам, зависящей, прежде всего, от его относительной влажности. Так, например, при относительной влажности наружного воздуха 45 % и его температуре 40 °С воздух может быть охлажден всего лишь на 13 °С.

При необходимости более глубокого охлаждения наружного воздуха, а также в случае его повышенных влажности и температуры прибегают к поверхностному охлаждению воздуха с помощью холодильных машин, т.е. переходят на тригенерацию – производство холода в дополнение к механической (или электрической) и тепловой энергии. Поскольку в ГТД простого цикла тепловые потери с уходящими газами составляют более 60 % теплоты сгорания топлива, то целесообразно утилизировать сбросную теплоту газов в теплоиспользующих холодильных машинах (ТХМ), а полученный холод использовать для снижения температуры воздуха на входе ГТД [4 – 7].

**Цель** исследования – оценка эффективности предварительного охлаждения воздуха ГТД простого цикла в теплоиспользующих холодильных машинах, утилизирующих теплоту уходящих газов.

### 2. Изложение результатов исследования

Известны ТХМ абсорбционного [8, 9] и эжекторного [4–7] типов. В эжекторных ТХМ (ЭТХМ) эжектор выполняет функцию компрессора. Применение ЭТХМ не приведет к заметному усложнению системы воздухоподготовки ГТД, поэтому они и были объектом исследования. Схема ЭТХМ предварительного охлаждения наружного воздуха перед компрессором приведена на рис. 1. В ЭТХМ используется низкокипящее рабочее тело (НРТ).

Эжекторная ТХМ состоит из паросилового и холодильного контуров. Паросиловой контур служит для получения паров НРТ высокого давления, энергия которых используется в эжекторе для под-

жания паров НРТ низкого давления, всасываемых из испарителя-воздухоохладителя (И-ВО) холодильного контура, до давления в конденсаторе.

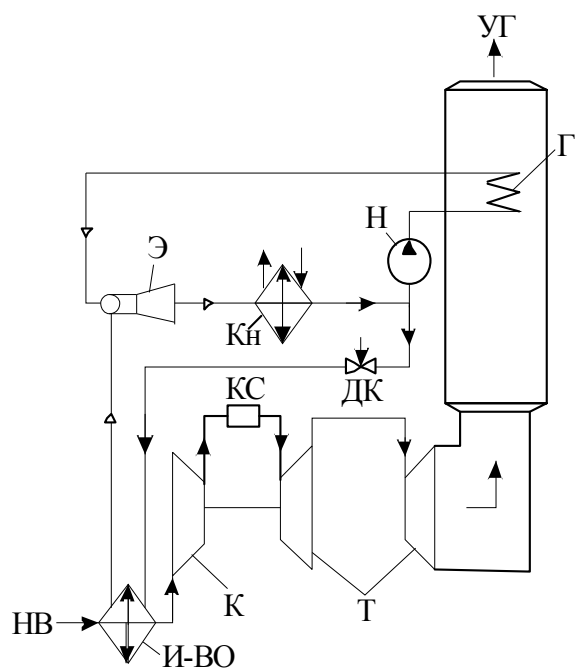


Рис. 1. Схема эжекторной ТХМ, использующей теплоту уходящих газов для охлаждения воздуха на входе компрессора ГТД:  
 К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина;  
 И-ВО – испаритель-воздухоохладитель;  
 Г – генератор пара НРТ;  
 Э – эжектор; Кн – конденсатор НРТ;  
 Н – насос; ДК – дроссельный клапан;  
 НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

Жидкий НРТ после конденсатора делится на два потока: первый – подается насосом в генератор, где он нагревается и испаряется при высоком давлении за счет теплоты, отводимой от уходящих газов, а второй – дросселируется в дроссельном клапане и направляется в И-ВО, где испаряется при низком давлении и соответственно температуре, отводя теплоту от наружного воздуха на входе компрессора ГТД. Пары НРТ всасываются из И-ВО эжектором и подаются в конденсатор. Эжектор совмещает функции детандера паросилового контура (расширение пара НРТ происходит в его сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления пара НРТ, всасываемого из И-ВО, происходит в его камере смешения и диффузоре). В генераторе НРТ нагревается от температуры конденсации  $t_k$  до температуры его испарения  $t_r$  (экономайзерная секция) и испаряется при  $t_r$  (испарительная секция).

Основной причиной сравнительно низкой эффективности ГТД, особенно простого цикла, являются значительные тепловые потери с уходящими газами. На рис. 2 приведены значения температуры

уходящих газов при температурах наружного воздуха  $t_{нв} = 15\text{ }^\circ\text{C}$  (ISO 3977) и  $t_{нв} = 40\text{ }^\circ\text{C}$  для 15 двигателей, которые охватывают диапазон мощностей 5...260 МВт и включают все три категории ГТД: традиционные стационарные ГТД с температурой газов на входе в турбину – после камеры сгорания  $t_3 < 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ; усовершенствованные стационарные ГТД с температурой газов  $t_3 > 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ; конвертированные авиационные ГТД [2].

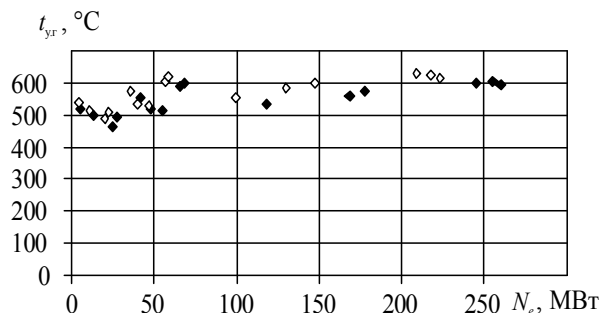


Рис. 2. Значения температуры уходящих газов  $t_{уг}$  в зависимости от мощности ГТД  $N_e$  при температурах наружного воздуха  $t_{нв}$ :  
 ◆ –  $t_{нв} = 15\text{ }^\circ\text{C}$ ; ◊ –  $t_{нв} = 40\text{ }^\circ\text{C}$

Как видно, во всем диапазоне мощностей уходящие газы имеют высокую температуру:  $t_{уг} = 500\text{...}600\text{ }^\circ\text{C}$ , что свидетельствует о значительных тепловых потерях. Тепловые потери с уходящими газами представляют собой тепловой потенциал, который может быть реализован в ЭТХМ для производства холода, а тот, в свою очередь, – для охлаждения наружного воздуха на входе ГТД.

Значения приращения мощности  $\Delta N_e$  ГТД за счет предварительного охлаждения наружного воздуха перед компрессором в ЭТХМ в диапазоне мощностей ГТД  $N_e = 5\text{...}260$  МВт представлены на рис. 3. Расчеты выполнены для массива, включающего 15 двигателей и охватывающего все три вышеуказанные категории ГТД [2].

Приращения КПД ГТД  $\Delta \eta_e$  за счет предварительного охлаждения наружного воздуха перед компрессором в ЭТХМ для рассматриваемого ряда ГТД приведены на рис. 4.

Из рис. 3, а и 4, а видно, что применение ЭТХМ для предварительного охлаждения наружного воздуха перед компрессором от  $t_{нв} = 40\text{ }^\circ\text{C}$  до  $15\text{ }^\circ\text{C}$ , т.е. на величину  $\Delta t_{нв} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , обеспечивает повышение мощности ГТД на 15...20% и их КПД на 4...7%, причем для большинства ГТД  $\Delta \eta_e = 5\text{...}7\text{ }%$ .

При охлаждении наружного воздуха на величину  $\Delta t_{нв} = 40\text{ }^\circ\text{C}$  (от  $t_{нв} = 55\text{ }^\circ\text{C}$  до  $15\text{ }^\circ\text{C}$ ) приращение показателей возрастают практически в 1,5 раза и составляют для мощности ГТД:  $\Delta N_e = 20\text{...}30\text{ }%$  (для большинства ГТД  $\Delta N_e \approx 25\text{ }%$ ), а для КПД:  $\Delta \eta_e = 8\text{...}12\text{ }%$  (рис. 3, б и 4, б).

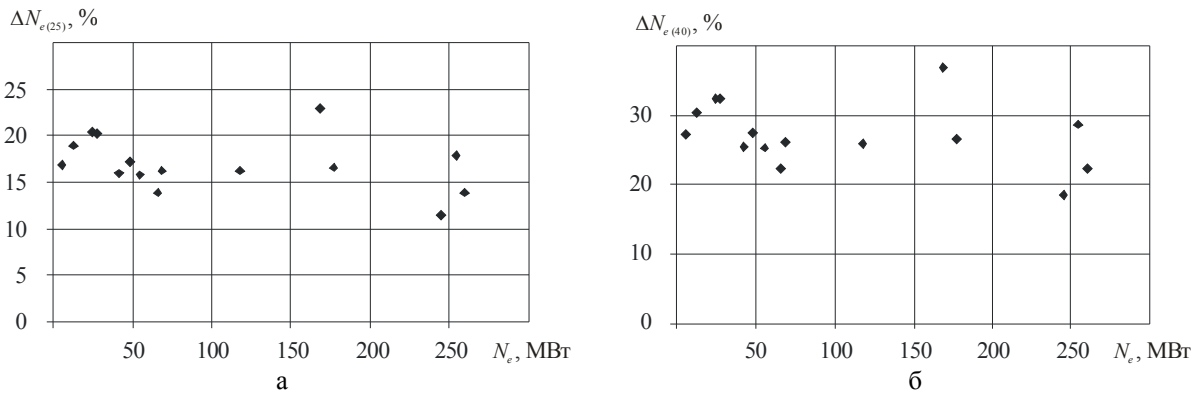


Рис. 3. Приращение мощности  $\Delta N_e$  ГТД за счет предварительного охлаждения наружного воздуха перед компрессором в ЭТХМ при разных мощностях ГТД  $N_e$ :  
 а – снижение температуры воздуха в ЭТХМ на величину  $\Delta t_{нв} = 25^\circ\text{C}$ :  
 от  $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$  до  $15^\circ\text{C}$ ; б –  $\Delta t_{нв} = 40^\circ\text{C}$ : от  $t_{нв} = 55^\circ\text{C}$  до  $15^\circ\text{C}$

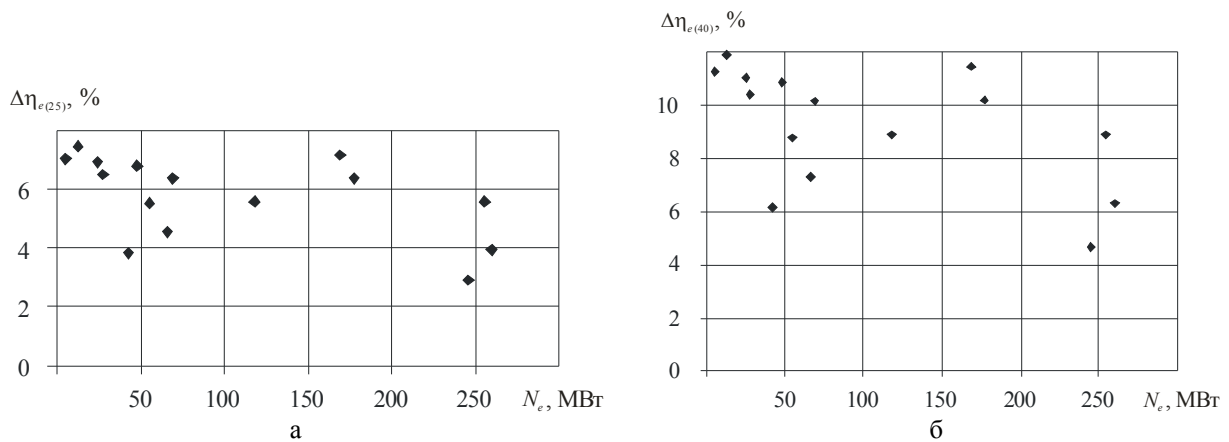


Рис. 4. Приращение КПД ГТД  $\Delta \eta_e$  за счет предварительного охлаждения наружного воздуха перед компрессором в ЭТХМ при разных мощностях ГТД  $N_e$ :  
 а – снижение температуры воздуха в ЭТХМ на величину  $\Delta t_{нв} = 25^\circ\text{C}$ :  
 от  $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$  до  $15^\circ\text{C}$ ; б –  $\Delta t_{нв} = 40^\circ\text{C}$ : от  $t_{нв} = 55^\circ\text{C}$  до  $15^\circ\text{C}$

На рис. 5 приведены значения располагаемого теплового потенциала уходящих газов  $Q_T$  и холодопроизводительности  $Q_0$ , полученной путем его пол-

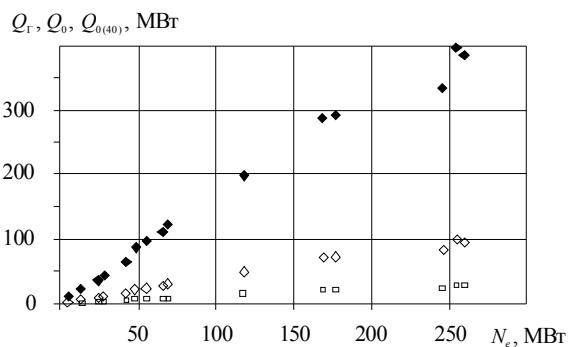


Рис. 5. Располагаемые тепловой потенциал уходящих газов  $Q_T$  и холодопроизводительности  $Q_0$ , полученные путем его полной реализации в ЭТХМ, а также холодопроизводительности  $Q_{0(40)}$ , необходимые для охлаждения наружного воздуха перед ГТД на  $40^\circ\text{C}$  в зависимости от мощности ГТД  $N_e$ :  $\blacklozenge$  –  $Q_T$ ;  $\diamond$  –  $Q_0$ ;  $\square$  –  $Q_{0(40)}$

ной реализации в ЭТХМ, а также ее величины  $Q_{0(40)}$ , необходимой для охлаждения воздуха перед ГТД на  $40^\circ\text{C}$ : от  $t_{нв} = 55^\circ\text{C}$  до  $15^\circ\text{C}$ , в зависимости от мощности ГТД  $N_e$  при температуре наружного воздуха  $t_{нв} = 15^\circ\text{C}$  (ISO 3977).

Как видно, располагаемый тепловой потенциал уходящих газов гораздо больше той величины, которая необходима для снижения температуры наружного воздуха перед компрессором ГТД на  $40^\circ\text{C}$  с помощью эжекторных ТХМ.

## Выводы

1. Выполнен анализ теплового потенциала уходящих газов для ГТД простого цикла и выявлены резервы повышения мощности и КПД ГТД путем предварительного охлаждения наружного воздуха перед компрессором ГТД в эжекторных ТХМ.

2. Предварительное охлаждение воздуха перед компрессором ГТД в эжекторных ТХМ обеспечива-

ет повышение мощности двигателей на 15...30 % и КПД на 5...12 %.

3. Для предварительного охлаждения воздуха в эжекторной ТХМ расходуется менее 50 % располагаемого теплового потенциала уходящих газов.

### Литература

1. Bhargava R. Parametric analysis of existing gas turbines with inlet evaporative and overspray fogging / R. Bhargava, C.B. Meher-Homji // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*. – Paper GT-2002-30560. – 15 p.

2. Bhargava R. Parametric analysis of combined cycles equipped with inlet fogging / R. Bhargava, M. Bianchi, F. Melino, A. Peretto // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*. – Paper GT-2003-38187. – 12 p.

3. Радченко А.Н. Тригенерація в газотурбінних установках газоперекачуючих станцій / А.Н. Радченко // *Техногенна безпека: Наукові праці МДГУ ім. П.Могили*. – Миколаїв: МДГУ, 2008. – Т. 77, Вип. 64. – С. 11-18.

4. Билека Б.Д. Высокоэффективные теплоутилизационные контуры на низкоккипящих рабочих телах для ГПТУ / Б.Д. Билека, Н.И. Радченко, А.А. Сирота // *Вестник двигателестроения*. – 2004. – №2. – С. 8-12.

5. Bortmany J.N. Assessment of aqua-ammonia refrigeration for pre-cooling gas turbine inlet air / J.N. Bortmany // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*. – Paper GT-2002-30657. – 12 p.

6. Arai M. Development of Future Marine Gas Turbine in Japan (Super Marine Gas Turbine) / M. Arai, T. Sugimoto, H. Miyaji // *SMGT, Tokyo, 2002*.

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. А.Е. Лагутин, Одесская государственная академия холода, Одесса.

### ТРИГЕНЕРАЦІЯ В ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНАХ ПРОСТОГО ЦИКЛУ

*А.М. Радченко*

Виконано аналіз теплового потенціалу відхідних газів газотурбінних двигунів простого циклу і виявлено резерви підвищення потужності та коефіцієнта корисної дії газотурбінних двигунів шляхом попереднього охолодження зовнішнього повітря в ежекторних тепловикористовуючих холодильних машинах, що утилізують теплоту відхідних газів. Показано, що попереднє охолодження зовнішнього повітря перед компресором газотурбінних двигунів в ежекторних тепловикористовуючих холодильних машинах забезпечує значне підвищення потужності та коефіцієнта корисної дії двигунів.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, простий цикл, попереднє охолодження повітря, відхідні гази, низькокипляче робоче тіло, тепловикористовуюча холодильна машина.

### TRIGENERATION IN GAS TURBINE ENGINES OF SIMPLE CYCLE

*A.N. Radchenko*

The heat potential of exhaust gases in gas turbine engines of simple cycle was analyzed and reserves of increase in power and efficiency of gas turbine engines by precooling of ambient air in ejector waste heat recovery refrigeration machines utilizing a heat of exhaust gases have been revealed. It was shown that precooling of ambient air before the compressor of gas turbine engines in ejector waste heat recovery refrigeration machines provides a considerable increase in power and efficiency of engines.

**Key words:** gas turbine engine, simple cycle, air precooling, exhaust gases, low boiling working fluid, waste heat recovery refrigeration machine.

**Радченко Андрей Николаевич** – канд. техн. наук, ст. научн. сотр., старший научный сотрудник Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.