

УДК 621.577

А.Н. РАДЧЕНКО*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина***ОХЛАЖДЕНИЕ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГТД ПРОСТОГО ЦИКЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ СТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Проанализирована эффективность применение теплоиспользующих холодильных машин с компрессором струйного типа, утилизирующих теплоту уходящих газов газотурбинных двигателей для предварительного охлаждения наружного воздуха на входе компрессора. Предложена технология совместного поверхностного охлаждения воздуха на входе компрессора в теплоиспользующей холодильной машине с компрессором струйного типа и испарительного охлаждения воздуха в процессе его сжатия в компрессоре, обеспечивающая повышение мощности газотурбинных двигателей на 30...40%.

Ключевые слова: *газотурбинный двигатель, струйная технология, поверхностное охлаждение воздуха, испарительное охлаждение, теплоиспользующая холодильная машина.*

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Эффективность работы ГТД в большей степени, чем других тепловых двигателей, зависит от параметров наружного воздуха, и прежде всего его температуры $t_{нв}$. Известно, что с повышением температуры $t_{нв}$ на 10 °С мощность ГТД снижается на 5...9% [1, 2]. Такое значительное сокращение мощности явилось толчком к развитию в газотурбостроении направления, связанного с охлаждением наружного воздуха на входе ГТД. Наибольшее применение в ГТД получило испарительное охлаждение воздуха, при котором вода под высоким давлением впрыскивается форсунками тонкого распыла в поток наружного воздуха на входе ГТД [1 – 3].

В зависимости от количества впрыскиваемой воды возможны два варианта испарительного охлаждения воздуха: предварительное охлаждение с испарением всей впрыскиваемой воды за счет теплоты, отводимой от наружного воздуха до его всасывания компрессором (увлажнение воздуха до состояния насыщения, т.е. относительной влажности $\phi = 100\%$) и внутреннее (при сжатии в компрессоре) испарительное охлаждение, когда избыточная, сверх насыщения, влага доиспаряется в процессе повышения давления и соответственно температуры воздуха в компрессоре.

Эффект от предварительного испарительного охлаждения состоит в снижении температуры воздуха перед компрессором до температуры по мокрому термометру в процессе его увлажнения до состояния насыщения. При внутреннем испарительном охлаждении воздуха в результате отвода от него

теплоты на испарение капельной влаги (с соответствующим снижением температуры воздуха) процесс повышения давления и температуры воздуха при его сжатии в компрессоре приближается к изотермическому, следствием чего является уменьшение удельной работы сжатия и увеличение полезной работы ГТД.

На рис. 1 приведены данные [1] по приращению мощности ΔN_e ГТД за счет предварительного охлаждения воздуха в ЭТХМ на 25 °С (от $t_{нв} = 40$ °С до 15 °С), предварительного испарительного охлаждения воздуха – до состояния насыщения ($OS = 0$); внутреннего (при сжатии в компрессоре) испарительного охлаждения воздуха при массовых долях впрыскиваемой воды 1 и 2 % ($OS = 1\%$ и $OS = 2\%$) в зависимости от удельной, приходящейся на единственный расход топлива ($N_{уд} = N_e / G_T$), мощности $N_{уд}$ двигателей, взятой при параметрах ISO: $t_{нв} = 15$ °С и относительной влажности $\phi = 40\%$.

При этом наружный воздух охлаждали при его исходных параметрах: $t_{нв} = 40$ °С и $\phi = 40\%$. Приращение мощности ΔN_e , %, рассчитывалось относительно ее значения при исходной температуре $t_{нв} = 40$ °С.

Данные на рис. 1 получены авторами работы [1] для массива из 67 ГТД ведущих фирм-изготовителей, включающего все три категории ГТД: традиционные стационарные ГТД с температурой газов на входе в турбину $t_3 < 1200$ °С; усовершенствованные стационарные ГТД с температурой газов $t_3 > 1200$ °С; конвертированные для стационарного применения авиационные ГТД [1].

Как видно, испарительное предварительное охлаждение воздуха от начальной температуры

$t_{нв} = 40\text{ }^\circ\text{C}$ до температуры, соответствующей состоянию его насыщения (температуры воздуха по мокрому термометру примерно $27\text{ }^\circ\text{C}$) позволяет увеличить мощность ГТД на 10...20%. За счет испарительного внутреннего охлаждения воздуха получают дополнительное приращение мощности ГТД

еще примерно на 10%, приходящееся на впрыск воды в воздух (непосредственно на входе компрессора) в количестве 1% от расхода воздуха. В результате мощность ГТД увеличивается на 20...30% при впрыске 1 % воды ($OS = 1\%$ на рис. 1) и 30...40% при впрыске 2% воды ($OS = 2\%$).

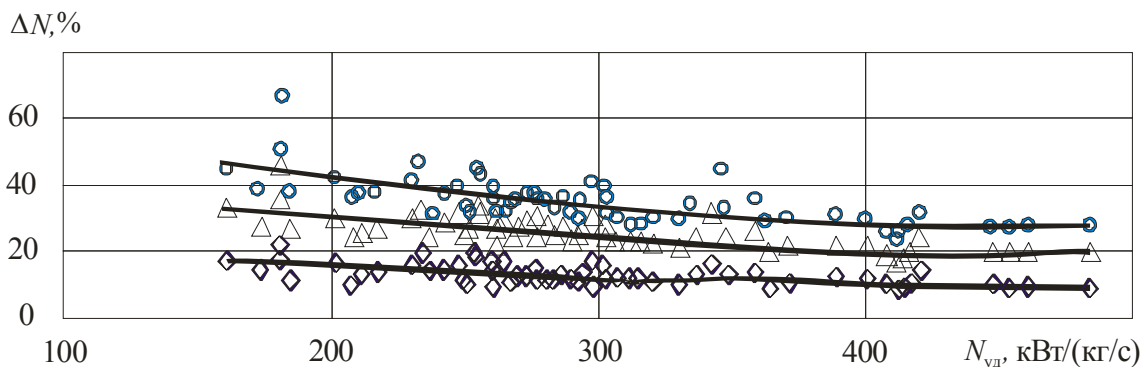


Рис. 1. Приращение мощности ΔN_e ГТД за счет испарительного предварительного и внутреннего охлаждения воздуха в зависимости от удельной мощности ГТД $N_{уд}$:
 \diamond — OS = 0%; Δ — OS = 1%; \circ — OS = 2% [1]

Испарительное охлаждение воздуха с целью повышения мощности ГТД стало применяться особенно широко последние 15 – 20 лет, что объясняется, прежде всего, простотой технологии, требующей минимума дополнительного оборудования (насосы высокого давления и распыляющие форсунки) и, следовательно, минимальных капиталовложений. В то же время с увеличением количества воды, впрыскиваемой в воздушный поток на входе компрессора при испарительном внутреннем охлаждении, повышается опасность повреждения компрессорных лопаток из-за соударения с ними капель воды. Потенциальная же глубина предварительного охлаждения наружного воздуха путем испарения в нем впрыскиваемой воды ($OS = 0$) определяется разностью температур по сухому и мокрому термометрам, зависящей, прежде всего, от его относительной влажности и в большинстве случаев лежащей в диапазоне значений 5...15 $^\circ\text{C}$.

Очевидно, что для более глубокого охлаждения воздуха по сравнению с испарительным предварительным охлаждением, особенно в случае повышенной влажности наружного воздуха, а также с целью обеспечения надежной эксплуатации компрессора, исключающей повреждение лопаток из-за соударения с ними капель воды при испарительном внутреннем охлаждении, целесообразно прибегать к поверхностному охлаждению воздуха с помощью холодильных машин. Поскольку температура уходящих газов в ГТД простого цикла весьма высокая и составляет 500...600 $^\circ\text{C}$, что свидетельствует о большом их тепловом потенциале, то вполне логичным было бы утилизировать теплоту уходящих га-

зов в теплоиспользующих холодильных машинах (ТХМ), а произведенный ими холод использовать для снижения температуры наружного воздуха перед компрессором ГТД.

Конструктивно наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются ТХМ с компрессором струйного типа – эжектором (ЭТХМ). Струйные ТХМ могут применяться как самостоятельно, так и в комбинации со струйными методами испарительного охлаждения путем впрыскивания воды в воздушный поток [1, 2]. Использование таких струйных технологий машинного (с применением холодильной машины) и безмашинного (с использованием воды как природного холодильного агента) охлаждения обеспечивало бы максимальное увеличение мощности ГТД за счет глубокого предварительного охлаждения наружного воздуха перед компрессором ГТД (машинное охлаждение) при минимальном, гарантирующем надежную эксплуатацию компрессора, количестве воды, впрыскиваемой в воздушный поток на входе компрессора (безмашинное охлаждение).

Цель работы – оценка эффективности струйных технологий машинного и безмашинного охлаждения наружного воздуха на входе ГТД простого цикла.

2. Изложение результатов исследования

Схема ЭТХМ для предварительного охлаждения наружного воздуха перед компрессором ГТД приведена на рис. 2. В качестве рабочего тела в ЭТХМ применяются низкокипящие рабочие тела (НРТ).

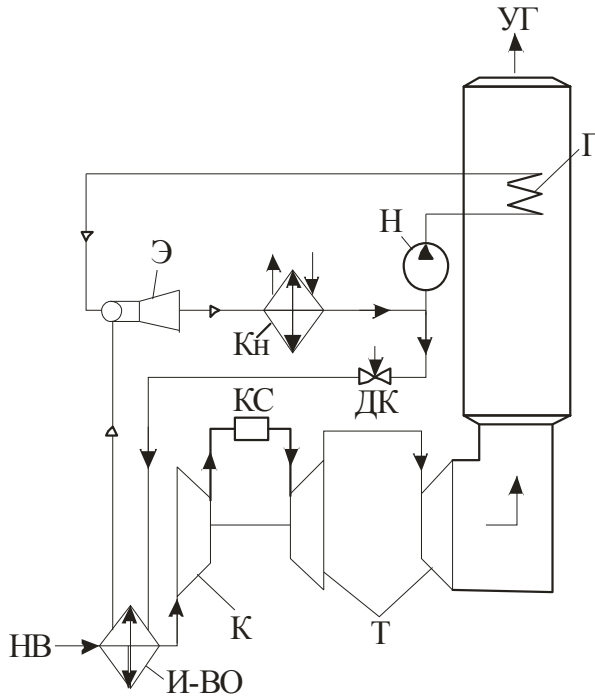


Рис. 2. Схема ЭТХМ, использующей теплоту уходящих газов для охлаждения наружного воздуха на входе компрессора ГТД:

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

Эжекторная ТХМ состоит из паросилового и холодильного контуров. Паросилового контур служит для получения паров НРТ высокого давления, энергия которых используется в эжекторе для поджатия паров НРТ низкого давления, всасываемых из испарителя-воздухоохладителя (И-ВО) холодильного контура, до давления в конденсаторе. Эжектор совмещает функции детандера паросилового контура (расширение пара происходит в его сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления пара, всасываемого из И-ВО, происходит в его камере смешения и диффузоре).

Эффективность ЭТХМ характеризуется тепловым коэффициентом $\zeta = Q_0 / Q_r$, который представляет собой отношение холодопроизводительности Q_0 (количества теплоты, отведенной от наружного воздуха в испарителе И-ВО) к количеству теплоты Q_r , подведенной в генераторе к НРТ от уходящих газов. Тепловой коэффициент ζ возрастает с повышением температур кипения в генераторе t_r и испарителе t_0 и снижением температуры конденсации t_k . Для экологически безопасных хладонов R142B и R600 (н-бутан), которые обеспечивают повышенные

величины ζ , максимальная температура t_r , допускаемая с точки зрения термической стойкости хладонов, составляет около 120 °С.

Удельные (отнесенные к расходу воздуха через ГТД) холодопроизводительность \bar{q}_0 и тепловая нагрузка на генератор \bar{q}_r , тепловой коэффициент ζ и снижение температуры Δt_b воздуха в испарителе ЭТХМ в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе t_r при температурах кипения в испарителе $t_0 = 0$ °С; конденсации $t_k = 45$ °С, уходящих газов перед ЭТХМ $t_{r1} = 500$ и 600 °С и после ЭТХМ $t_{r2} = 100$ °С приведены на рис. 3. В качестве НРТ применен озонобезопасный хладон R142B.

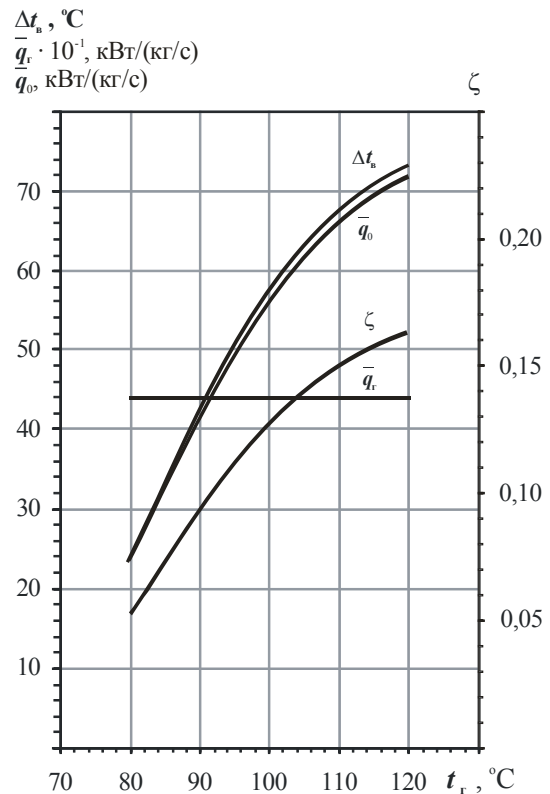


Рис. 3. Удельные холодопроизводительность \bar{q}_0 , тепловой коэффициент ζ и снижение температуры Δt_b воздуха в испарителе-воздухоохладителе в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе t_r

Как видно, использование в ЭТХМ теплоты уходящих газов обеспечивает значительное охлаждение циклового воздуха ГТД в испарителе: $\Delta t_b \approx 70$ °С. Таким образом, для снижения температуры воздуха на входе компрессора ГТД от 40 °С до 15 °С (ISO 3977) расходуется около производимого 30% холода.

Результаты расчетов показали, что охлаждение наружного воздуха в ЭТХМ от 40 до 15 °С

($\Delta t_b = 25^\circ\text{C}$) обеспечивает приращение мощности ГТД на 20...30%, что в абсолютных величинах на 10% больше ее повышения за счет предварительного испарительного охлаждения наружного воздуха до состояния насыщения ($\Delta N_e = 10...20\%$ при $OS = 0$ на рис. 1) и практически совпадает с приращением мощности ГТД за счет испарительного внутреннего охлаждения воздуха при массовой доле воды 1% ($OS = 1\%$ на рис. 1).

Поскольку с увеличением количества воды, впрыскиваемой в воздушный поток на входе компрессора, повышается вероятность соударения капель воды с лопатками компрессора и опасность их повреждения, то представляется целесообразным совместное применение обоих способов охлаждения циклового воздуха ГТД – поверхностного в ЭТХМ и испарительного внутреннего при сжатии в компрессоре, когда воду впрыскивают в воздушный поток непосредственно на входе компрессора, причем примерно при вдвое меньших количествах, исключая опасность повреждения лопаток компрессора.

Результаты сравнения приращения мощности ΔN_e ГТД за счет предварительного испарительного

охлаждения воздуха – до состояния насыщения ($OS = 0$) и внутреннего (при сжатии в компрессоре) испарительного охлаждения воздуха при массовой доле впрыскиваемой воды 2% ($OS = 2\%$), предварительного поверхностного охлаждения воздуха в ЭТХМ на 25°C (от $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$ до 15°C), а также совместного поверхностного охлаждения воздуха в ЭТХМ и испарительного его охлаждения (при сжатии в компрессоре) при впрыскивании воды на входе компрессора в количестве 1% ($OS = 1\%$) в зависимости от удельной, приходящейся на единичный расход топлива, мощности $N_{уд}$ двигателей, взятой при параметрах ISO, приведены на рис. 4. При этом холодопроизводительность Q_0 (количество теплоты, отведенной от наружного воздуха в ЭТХМ), снижение температуры воздуха Δt_b в ЭТХМ и теплопотребление ЭТХМ Q_r , т.е. затраты теплоты на работу ЭТХМ (теплоты, отводимой от уходящих газов ГТД), рассчитывались по разработанным авторами методикам (рис. 3), а оценка их влияния на показатели ГТД производилась с использованием данных по характеристикам ГТД, приведенным в работах [1, 2].

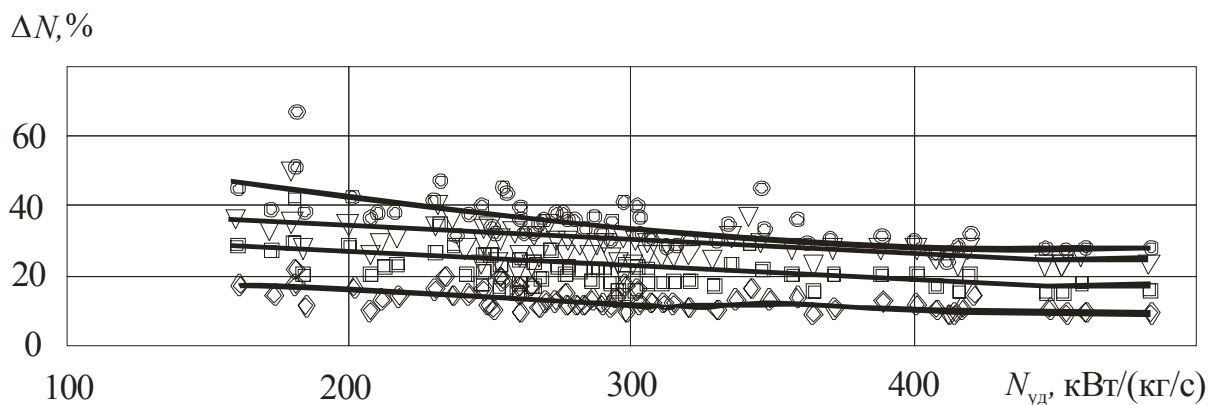


Рис. 4. Приращение мощности ΔN_e ГТД за счет испарительного предварительного и внутреннего охлаждения воздуха, предварительного охлаждения воздуха в ЭТХМ и их комбинации в зависимости от удельной мощности ГТД $N_{уд}$:

□ – ЭТХМ на 25°C ; ◇ – $OS = 0\%$; ○ – $OS = 2\%$; ▼ – ЭТХМ и $OS = 1\%$

Из рис. 4 видно, что применение ЭТХМ для предварительного охлаждения воздуха ГТД от $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$ до 15°C обеспечивает повышение мощности двигателей на 20...30%, а в комбинации с испарительным внутренним охлаждением воздуха в процессе его сжатия в компрессоре при массовой доле воды, впрыскиваемой в воздух на входе компрессора, равной 1% – на 30...40%, что всего лишь на 5% по абсолютному приращению мощности ΔN_e уступает испарительному внутреннему охлаждению воздуха при массовой доле впрыскиваемой воды 2%, зато обеспечивает безопасную эксплуатацию компрессора ГТД.

Выводы

1. Охлаждение наружного воздуха на входе компрессора ГТД в ТХМ с компрессором струйного типа, утилизирующей теплоту уходящих газов ГТД, на 25°C обеспечивает повышение мощности ГТД на 20...30%.
2. Комбинированная технология охлаждения воздуха на входе компрессора ГТД в ТХМ струйного типа и испарительного охлаждения воздуха при сжатии в компрессоре обеспечивает повышение мощности ГТД на 30...40%.

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. *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.

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 редакцію 22.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Е. Лагутин, Одесская государственная академия холода, Одесса.

**ОХОЛОДЖЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГТД ПРОСТОГО ЦИКЛУ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СТРУМЕНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

А.М. Радченко

Проаналізована ефективність застосування тепловикористовуючих холодильних машин із компресором струменевого типу, що утилізують теплоту відхідних газів газотурбінних двигунів для попереднього охолодження зовнішнього повітря на вході компресора. Запропонована технологія сумісного поверхневого охолодження повітря на вході компресора в тепловикористовуючій холодильній машині з компресором струменевого типу та випарувального охолодження повітря у процесі його стискування в компресорі, що забезпечує підвищення потужності газотурбінних двигунів на 30...40%.

Ключові слова: газотурбінний двигун, струменева технологія, поверхневе охолодження повітря, випарувальне охолодження, тепловикористовуюча холодильна машина.

**COOLING OF AMBIENT AIR AT THE INLET OF GTE OF SIMPLE CYCLE
BY APPLYING JET TECHNOLOGIES**

A.N. Radchenko

The effectiveness of application of waste heat recovery refrigeration machines with compressor of jet type, utilizing a heat of exhaust gases of gas turbine engine for precooling of ambient air at the compressor inlet, have been analyzed. The technology of combined surface cooling of air at the compressor inlet by waste heat recovery refrigeration machine with a compressor of jet type and evaporative cooling of air during its compressing in the compressor that provides an increase in the power of *gas turbine engines* by 30...40%.

Key words: gas turbine engine, jet technology, surface air cooling, evaporative cooling, waste heat recovery refrigeration machine.

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