

ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОХЛАЖДЕНИЕМ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА В ЭЖЕКТОРНЫХ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИХ МАШИНАХ

Проаналізована ефективність використання ежекторної тепловикористовуючої машини, що утилізує теплоту відхідних газів для охолодження зовнішнього повітря на вході ГТД простого і когенераційного типу.

Ключові слова: ефективність, ежекторна тепловикористовуюча машина, утилізація теплоти, відхідні газу.

Проанализирована эффективность применения ежекторной теплоиспользующей машины, утилизирующей теплоту уходящих газов для охлаждения наружного воздуха на входе ГТД простого и когенерационного типов.

Ключевые слова: эффективность, ежекторная теплоиспользующая машина, утилизация теплоты, уходящие газы.

Effectiveness of application of ejector waste heat recovery refrigeration system, utilizing a heat of exhaust gases for cooling of ambient air at the inlet of gas turbines of simple and cogenerative types has been analyzed.

Keywords: effectiveness, waste heat recovery refrigeration system, utilizing heat, exhaust gases.

1. Анализ состояния проблемы, выделение нерешенных задач, постановка цели исследования

Эффективность газотурбинных двигателей (ГТД) в большей степени, чем других тепловых двигателей, зависит от параметров наружного воздуха на входе. О влиянии температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ на мощность N/N_{ISO} и тепловые потери с уходящими газами Q/Q_{ISO} в относительных величинах для конвертированных авиационных ГТД типа LM-6000 и тяжелых стационарных ГТД типа FR-7 можно судить по их зависимостям на рис. 1. При этом за базовые принимались значения указанных характеристик, соответствующие стандарту ISO 3977: $t_{\text{нв}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительная влажность $\phi = 40\%$.

Как видно, каждый $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличения температуры наружного воздуха приводит к уменьшению мощности тяжелых стационарных ГТД FR-7 на $0,5\text{...}0,9\%$. Для конвертированных авиационных ГТД типа LM-6000 повышение температуры $t_{\text{нв}}$ от 15 до $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызывает снижение мощности на 20% и возрастание тепловых потерь на 5% по сравнению с их величинами при $t_{\text{нв}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом с повышением $t_{\text{нв}}$, к примеру на $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, тепловые потери с уходящими газами возрастают – примерно на 5% , что свидетельствует о наличии резервов повышения эффективности ГТД утилизацией сбросной теплоты.

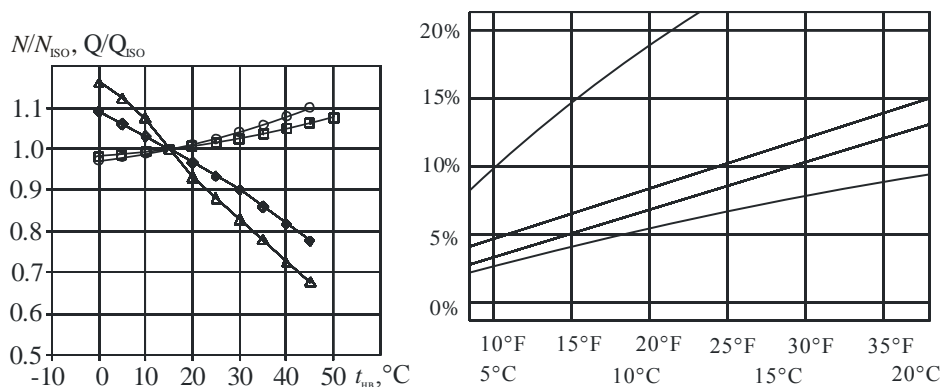


Рис. 1. Зависимость мощности N/N_{ISO} и тепловых потерь с уходящими газами Q/Q_{ISO} в относительных величинах от температуры t_{amb} наружного воздуха на вход для ГТД LM-6000 и FR-7: \diamond – N/N_{ISO} FR-7; \triangle – N/N_{ISO} LM-6000; \square – Q/Q_{ISO} FR-7; \circ – Q/Q_{ISO} LM-6000

Столь значительное сокращение мощности ГТД с повышением температуры наружного воздуха остро ставит проблему охлаждения воздуха на входе. Наибольшее распространение в ГТД получило испарительное охлаждение воздуха, при котором вода под высоким давлением впрыскивается форсунками тонкого распыла в воздушный поток на входе компрессора ГТД [1; 3; 5; 6; 8]. Однако потенциальная глубина охлаждения наружного воздуха при испарительном способе ограничена температурой, соответствующей состоянию насыщения, т. е. температурой воздуха по мокрому термометру, зависящей, прежде всего, от относительной влажности воздуха. Практически путем испарительного охлаждения можно снизить температуру наружного воздуха на 10...15 °С. Для более глубокого охлаждения наружного воздуха, а также в случае повышенной влажности наружного воздуха или температур естественных хладоносителей, например, воды, прибегают к поверхностному охлаждению воздуха с помощью холодильных машин.

Поскольку с повышением температуры воздуха возрастает также температура уходящих газов, то целесообразным представляется утилизировать их теплоту с помощью теплоиспользующих холодильных машин (ТХМ), а выработанный в них холод использовать для снижения температуры наружного воздуха на входе [2]. В качестве рабочего тела в ТХМ используются низкокипящие рабочие тела (НРТ).

Эффективность применения ТХМ зависит, в первую очередь, от теплового потенциала уходящих газов. В когенерационных ГТД, вырабатывающих в дополнение к основному виду энергии (механической или электрической) еще и тепловую, температура газов после утилизационного котла (УК) сравнительно невысокая: около 180 °С, тогда как в ГТД простого типа она составляет 500...600 °С.

Цель настоящего исследования – оценка целесообразности применения в ГТД простого и когенерационного типов теплоиспользующих холодильных машин, утилизирующих теплоту уходящих газов для снижения температуры наружного воздуха на входе ГТД.

2. Изложение результатов исследования

В качестве примера выбрана ТХМ эжекторного типа (ЭТХМ) как конструктивно наиболее простая и надежная в эксплуатации [4; 5]. Схема ЭТХМ для охлаждения наружного воздуха на входе когенерационной ГТД приведена на рис. 2.

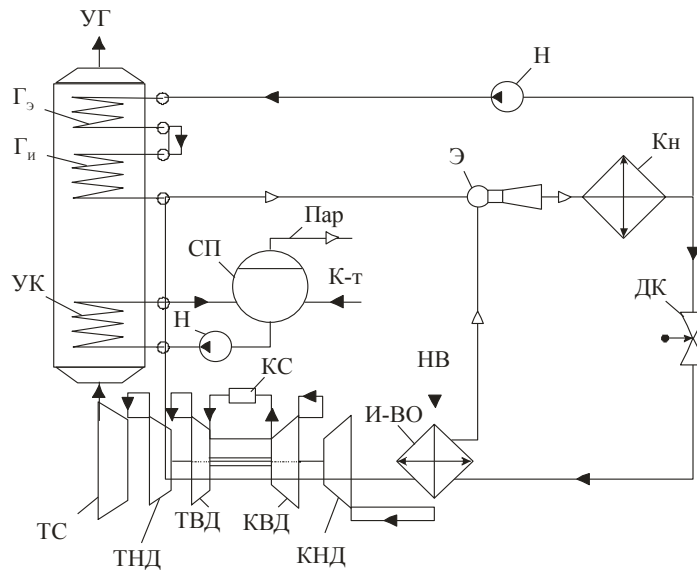


Рис. 1. Схема ЭТХМ, использующей теплоту уходящих газов ГТД

после утилизационного котла для охлаждения наружного воздуха на входе ГТД:
 КНД и КВД – компрессоры высокого и низкого давления; ТНД, ТВД и ТС – турбины низкого, высокого давления и силовая; КС – камера сгорания; УК – утилизационный котел пароводяной; СП – сепаратор пара; Γ_3 и $\Gamma_{и}$ – экономайзерная и испарительная секции генератора пара НРТ; Э – эжектор; И-ВО – испаритель НРТ-воздухоохладитель; Кн – конденсатор НРТ; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

Эжекторная ТХМ состоит из двух контуров: паросилового и холодильного. Паросилового контур служит для получения паров НРТ высокого давления, энергия которых используется в эжекторе Э для поджатия паров НРТ низкого давления, всасываемых из испарителя-воздухоохладителя (И-ВО) холодильного контура, до давления в конденсаторе Кн. Жидкий НРТ после конденсатора Кн делится на два потока: первый – подается насосом Н в генератор, где он нагревается (экономайзерная секция генератора Γ_3) и испаряется (испарительная секция $\Gamma_{и}$) при высоком давлении за счет теплоты, отводимой от уходящих газов ГТД, а второй – дросселируется в дроссельном клапане ДК и направляется в И-ВО, где испаряется при низком давлении и соответственно температуре, отводя теплоту от наружного воздуха на входе ГТД. Пары НРТ всасываются из И-ВО эжектором и подаются снова 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 камере смешения и диффузоре). В экономайзерной секции Γ_3 генератора НРТ нагревается от температуры конденсации t_k до температуры его испарения t_r , в испарительной секции $\Gamma_{и}$ жидкий НРТ испаряется при высоких давлении и температуре t_r .

Эффективность ЭТХМ характеризуется тепловым коэффициентом $\zeta = Q_0 / Q_r$, который представляет собой отношение холодопроизводительности Q_0 (количества теплоты, отведенной в испарителе от наружного воздуха на входе ГТД) к количеству теплоты Q_r , подведенной в генераторе к кипящему НРТ от уходящих газов ГТД.

Результаты оценки эффективности применения ЭТХМ для охлаждения воздуха на входе ГТД в случае утилизации теплоты уходящих газов после пароводяного УК (температура газов на входе генератора ЭТХМ $t_{гр1} = 180$ °С) приведены на рис. 3 в виде удельных (отнесенных к единичному расходу воздуха или уходящих газов) тепловых нагрузок на генератор \bar{q}_r (удельного количества теплоты, отведенной от уходящих газов) и испаритель-воздухоохладитель \bar{q}_0 (удельного количества теплоты, отведенной от наружного воздуха на

входе в ГТД, т. е. удельной холодопроизводительности ЭТХМ), снижения температуры Δt_b воздуха на входе в ГТД (в испарителе-воздухоохладителе) и тепловых коэффициентов ЭТХМ ζ в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе t_r при температурах кипения НРТ в испарителе $t_0 = 0^\circ\text{C}$; конденсации $t_k = 35^\circ\text{C}$; уходящих газов после генератора ЭТХМ $t_{yr2} = 100^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что соотношение удельных тепловых нагрузок на испарительную и экономайзерную секции генератора равно соотношению удельных значений теплоты фазового перехода НРТ, r , при температуре кипения t_r и теплоты, требуемой для нагрева конденсата НРТ от t_k до t_r , т. е. $c_{ж}(t_r - t_k)$, где $c_{ж}$ – теплоемкость жидкого НРТ. Это соотношение между r и $c_{ж}(t_r - t_k)$ вместе с отмеченным выше ограничением (по t_k и разности температур между t_{yr2} и t_k) лимитируют снижение температуры уходящих газов t_{yr2} .

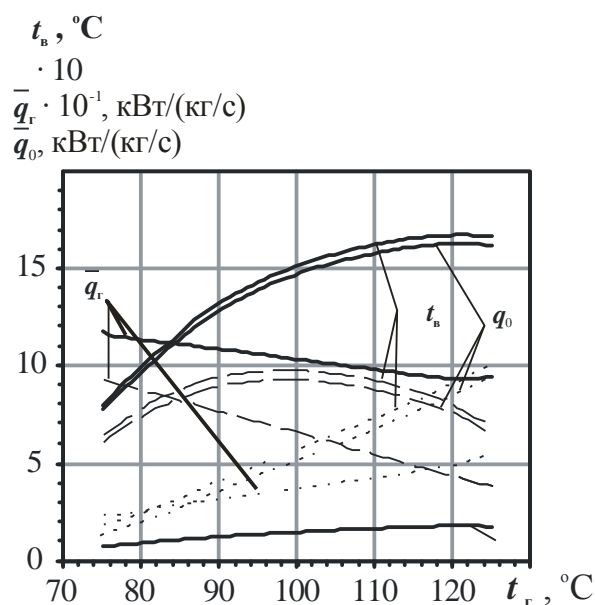


Рис. 3. Удельные тепловые нагрузки на генератор \bar{q}_r и испаритель \bar{q}_0 , тепловые коэффициенты ЭТХМ ζ и снижение температуры Δt_b воздуха в испарителе (на входе в ГТД) в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе t_r при температуре кипения в испарителе $t_0 = 0^\circ\text{C}$; конденсации $t_k = 35^\circ\text{C}$, уходящих газов ГТД на входе испарительной секции генератора (после УК) $t_{r1} = 180^\circ\text{C}$

Как видно, из-за сравнительно низкой температуры уходящих газов перед генератором ТХМ (после УК) $t_{r1} = 180^\circ\text{C}$ снижение температуры воздуха на входе ГТД составляет $\Delta t_b = 15 \dots 17^\circ\text{C}$. Соответствующее повышение мощности ГТД определяем по графикам на рис. 1. Как видно из рис. 1, снижение температуры воздуха на входе ГТД, например от $t_{hb} = 30^\circ\text{C}$ до $t_{hb} = 15^\circ\text{C}$ обеспечивает приращение мощности ГТД тяжелых стационарных ГТД типа FR-7 на 10 %, а конвертированных авиационных ГТД типа LM-6000 – почти 20 %. Таким образом, применение ТХМ, использующей теплоту уходящих газов с низкой температурой после УК, для охлаждения воздуха на входе тяжелых стационарных ГТД типа FR-7 нецелесообразно.

Проанализируем эффективность применения ЭТХМ для случая более высоких температур уходящих газов, например 300°C , когда срабатываемый в генераторе ЭТХМ теплоперепад определяется разностью температур по уходящим газам примерно в 200°C , т. е. для ГТД простой схемы (рис. 4).

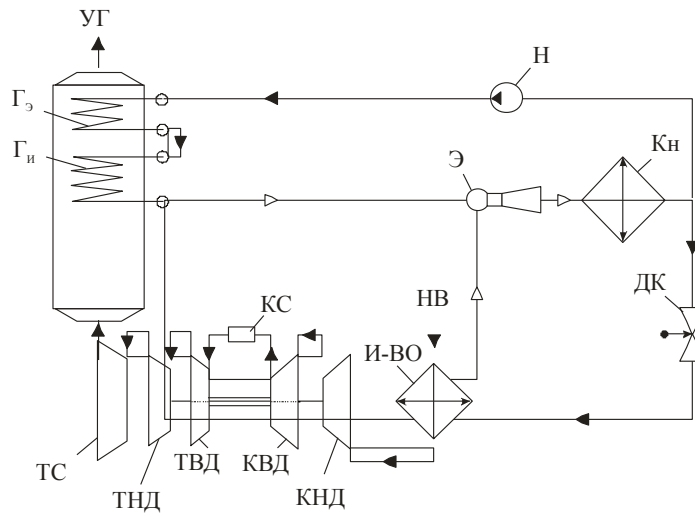


Рис. 1. Схема ЭТХМ, использующей теплоту уходящих газов ГТД простого типа для охлаждения наружного воздуха на входе:

КНД и КВД – компрессоры высокого и низкого давления; ТНД, ТВД и ТС – турбины низкого, высокого давления и силовая; КС – камера сгорания; $\Gamma_э$ и $\Gamma_и$ – экономайзерная и испарительная секции генератора пара НРТ; Э – эжектор; И-ВО – испаритель НРТ-воздухоохладитель; Кн – конденсатор НРТ; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

Результаты аналогичных расчетов показателей ЭТХМ, использующей для охлаждения воздуха на входе ГТД теплоту уходящих газов с температурой $t_{г1} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, приведены на рис. 5.

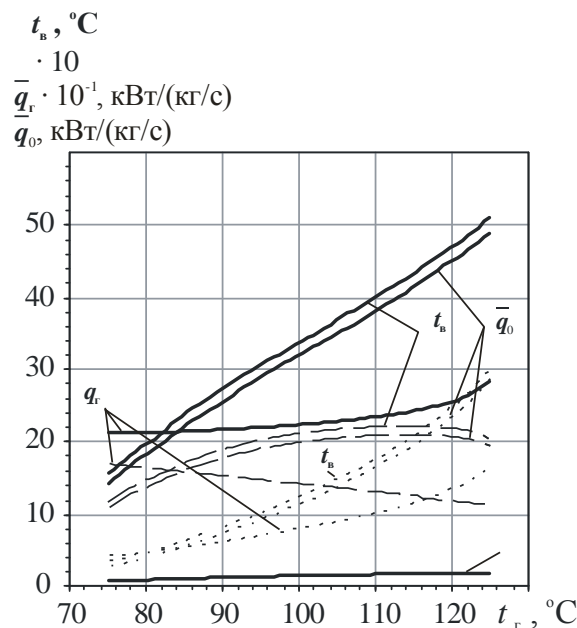


Рис. 5. Удельные тепловые нагрузки на генератор \bar{q}_r и испаритель \bar{q}_0 , тепловые коэффициенты ЭТХМ ζ и снижение температуры Δt_b воздуха в испарителе (на входе в ГТД) в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе t_r при температуре кипения в испарителе $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; конденсации $t_k = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, уходящих газов ГТД на входе испарительной секции генератора (после УК) $t_{г1} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$

Как видно, срабатывание в генераторе ЭТХМ большего теплоперепада, определяемого разностью температур по уходящим газам примерно в $200 \text{ }^\circ\text{C}$, обеспечивает снижение

температури воздуха на входе ГТД $Dt_b = 40...45$ °С. Соответствующие приращения мощности ГТД согласно графикам на рис. 1 составляют для тяжелых стационарных ГТД типа FR-7 примерно 30 %, а конвертированных авиационных ГТД типа LM-6000 – почти 40 %. Следует отметить, что тепловой потенциал уходящих газов ГТД простой схемы значительно больше, реализуемого в ТХМ для охлаждения воздуха на входе на $Dt_b = 40...45$ °С.

Применение ТХМ целесообразно и в ГТД когенерационного типа – с уже имеющимся утилизационным пароводяным котлом, используемым для теплофикационных нужд и, как правило, не задействованным в теплое время. В этом случае генератор паров НРТ высокого давления можно встраивать в уже существующий пароводяной контур УК, не вторгаясь в газовыпускной тракт ГТД, что не приведет к заметному усложнению когенерационной установки и в то же время повысит коэффициент ее использования.

3. Выводы

1. Использование в ЭТХМ теплоты уходящих газов когенерационных ГТД после УК со сравнительно низкой температурой (около 180 °С) позволяет снизить температуру воздуха на входе ГТД примерно на 15 °С. При этом соответствующее повышение мощности ГТД составляет 10...20 % (меньшая величина соответствует тяжелым стационарным ГТД типа FR-7, а большая – конвертированным авиационным ГТД типа LM-6000).

2. Особенно эффективно применение ЭТХМ в ГТД простой схемы, обеспечивая за счет снижения температуры воздуха на входе на 40...45 °С приращение мощности тяжелых стационарных ГТД типа FR-7 примерно 30 %, а конвертированных авиационных ГТД типа LM-6000 – почти 40 %. При этом в ЭТХМ используется только часть теплового потенциала уходящих газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романовський Г.Ф., Сербін С.І., Патлайчук В.М. Сучасні газотурбінні агрегати: Т.2: Агрегати виробництва країн Західної Європи, Америки та Азії. – Миколаїв: НУК, 2008. – 420 с.
2. Bhargava R., Meher-Homji C.B. Parametric analysis of existing gas turbines with inlet evaporative and overspray fogging // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2002-30560. – 15 p.
3. Bhargava R., Bianchi M., Melino F., Peretto A. Parametric analysis of combined cycles equipped with inlet fogging // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2003-38187. – 12 p.
4. Радченко А.Н. Тригенерація в газотурбінних установках газоперекачиваючих станцій // Техногенна безпека: Наукові праці МДГУ ім. Петра Могили.– Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2008. – Т. 77. – Вип. 64. – С. 11-18.
5. Сирота А.А., Радченко Н.И., Коновалов Д.В. Основные направления тригенерационных технологий в судовой энергетике // Техногенна безпека: Наукові праці МДГУ ім. Петра Могили.– Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2007. – Т. 73. – Вип. 60. – С. 100-105.

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).

Рецензенти: д.т.н., професор Білека Б.Д.,
к.т.н., доцент Тарасенко А.

© Радченко А.Н., Радченко Н.И., Бойко А.В.,
Карасев С.А., 2009

Стаття надійшла до редколегії 17.05.09