

ОХЛАЖДЕНИЕ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОВЫХ ТУРБИН КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ ЭЖЕКТОРНЫМИ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИМИ МАШИНАМИ

Проаналізовано ефективність охолодження зовнішнього повітря на вході газових турбін ежекторною тепловикористовуючою машиною, яка утилізує тепло газів, що відходять. Зроблено порівняння ефективності газових турбін без охолодження зовнішнього повітря та з його охолодження тепловикористовуючою машиною.

***Ключові слова:** ефективність, газова турбіна, ежекторна тепловикористовуюча машина, утилізація, відхідні газы.*

Проанализирована эффективность охлаждения наружного воздуха на входе газовых турбин эжекторной теплоиспользующей машиной, утилизирующей теплоту уходящих газов. Выполнено сравнение эффективности газовых турбин без охлаждения наружного воздуха и с его охлаждением теплоиспользующей машиной.

***Ключевые слова:** эффективность, газовая турбина, эжекторная теплоиспользующая машина, утилизация, уходящие газы.*

Effectiveness of cooling of ambient air at the inlet of gas turbines by ejector waste heat recovery system utilizing a heat of exhaust gases has been analyzed. The efficiency of gas turbines without cooling of ambient air and with its cooling by waste heat recovery system was compared.

***Keywords:** effectiveness, gas turbines, ejector waste heat recovery system, utilizing, exhaust gases.*

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

На газоперекачивающих компрессорных станциях в качестве приводных двигателей в большинстве случаев применяются газотурбинные двигатели (ГТД). Эффективность ГТД с повышением температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ на входе компрессора ГТД резко снижается. Известно, что каждый 1 °С увеличения температуры $t_{\text{нв}}$ приводит к уменьшению мощности ГТД на 0,5...0,9 % и КПД на 0,05...0,09 % [1; 2]. При этом с повышением $t_{\text{нв}}$, к примеру на 25 °С, тепловые потери с уходящими газами также возрастают – примерно на 5 %, что свидетельствует о наличии резервов повышения эффективности ГТД утилизацией сбросной теплоты.

Улучшить показатели двигателей при повышенных температурах наружного воздуха можно за счет охлаждения наружного воздуха на входе в компрессор ГТД. Наибольшее распространение в ГТД получило испарительное охлаждение воздуха путем впрыскивания в

него воды, распыляемой форсунками [1; 3]. Потенциальная глубина охлаждения наружного воздуха при испарительном охлаждении ограничивается разностью его температур по сухому и мокрому термометрам, зависящей прежде всего от относительной влажности воздуха. В большинстве случаев разность температур не превышает 15 °С.

С целью более глубокого охлаждения наружного воздуха перед компрессором ГТД, а также в случае его повышенной влажности прибегают к поверхностному охлаждению воздуха с помощью холодильных машин. Поскольку с повышением температуры воздуха возрастает температура уходящих газов, то целесообразным представляется утилизировать теплоту уходящих газов ГТД с помощью теплоиспользующих холодильных машин (ТХМ), а выработанный в них холод использовать для снижения температуры наружного воздуха перед компрессором [4; 5]. Глубокую утилизацию можно обеспечить, используя в ТХМ низкокипящие рабочие тела (НРТ).

Цель настоящего исследования – оценка эффективности охлаждения наружного воздуха на входе компрессоров ГТД в теплоиспользующих холодильных машинах, утилизирующих теплоту уходящих газов.

2. Изложение результатов исследования

Конструктивной простотой и надежностью в эксплуатации отличаются эжекторные ТХМ (ЭТХМ), в которых эжектор выполняет функцию компрессора [4, 5]. Они и были рассмотрены в качестве объекта исследования. Схема ЭТХМ для охлаждения наружного воздуха на входе компрессора ГТД приведена на рис. 1. В качестве рабочего тела в ЭТХМ используется НРТ.

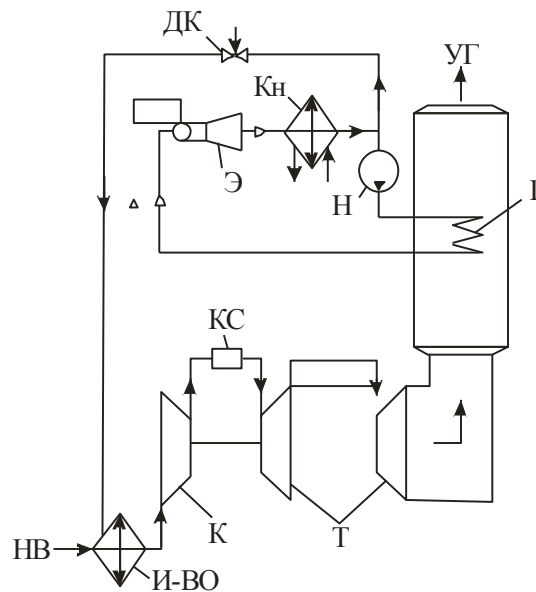


Рис. 1. Схема ЭТХМ, использующей теплоту уходящих газов для охлаждения наружного воздуха на входе компрессора ГТД:

К – компрессор; Т – турбина; КС – камера сгорания; Г – генератор 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 включает паросиловый и холодильный контуры. В паросиловом контуре генерируется пар НРТ высокого давления, энергия которого используется в эжекторе для поджатия пара НРТ низкого давления, всасываемого из испарителя-воздухоохладителя (И-ВО) холодильного контура, до давления в конденсаторе. Жидкий НРТ после конденсатора делится на два потока: первый – подается насосом в генератор пара НРТ (Г), где он нагревается и испаряется при высоком давлении за счет теплоты, отводимой от уходящих газов ГТД. Второй поток жидкого НРТ 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 НРТ (Кн). Таким образом, 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).

Как отмечалось, в теплое время из-за высокой температуры уходящих газов t_{yt} и соответственно больших тепловых потерь с ними эффективность ГТД резко снижается. На рис. 2 приведены значения температуры уходящих газов t_{yt} при температуре наружного воздуха $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$ для 15 двигателей ведущих зарубежных фирм-изготовителей ГТД [2].

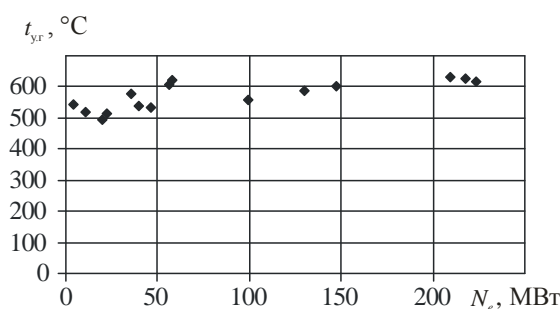


Рис. 2. Температура уходящих газов t_{yt} после ГТД при температуре наружного воздуха перед компрессором $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$ в зависимости от мощности ГТД N_e

Двигатели рассматриваемого ряда охватывают широкий диапазон мощностей, 5...250 МВт, и включают все три категории ГТД: традиционные стационарные ГТД с температурой газов на входе в турбину – после камеры сгорания $T_3 < 1200^\circ\text{C}$; усовершенствованные стационарные ГТД с температурой газов $T_3 > 1200^\circ\text{C}$; конвертированные авиационные ГТД [2].

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

На рис. 3 приведены значения холодильных мощностей Q_0 , требуемых для охлаждения наружного воздуха перед компрессором ГТД от $t_{нв} = 55^\circ\text{C}$ до $t_{нв} = 15^\circ\text{C}$, т. е. на 40°C , в зависимости от мощности ГТД N_e при $t_{нв} = 15^\circ\text{C}$. Результаты расчетов показывают, что располагаемый тепловой потенциал уходящих газов гораздо больше той величины, которая необходима для снижения температуры наружного воздуха на 40°C с помощью ЭТХМ.

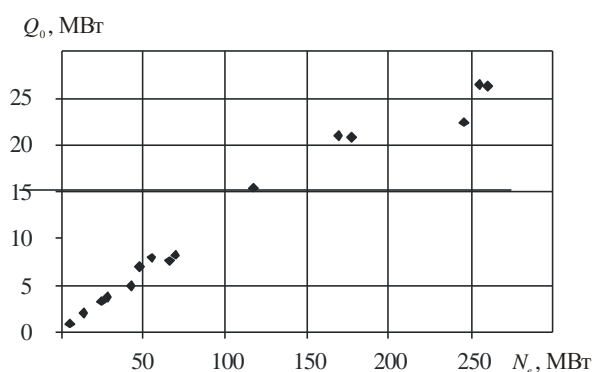


Рис. 3. Холодильные мощности Q_0 , требуемые для охлаждения наружного воздуха перед компрессором ГТД от $t_{нв} = 55^\circ\text{C}$ до $t_{нв} = 15^\circ\text{C}$, в зависимости от мощности ГТД N_e при $t_{нв} = 15^\circ\text{C}$

В результате охлаждения наружного воздуха и соответствующего возрастания его плотности увеличивается массовый расход воздуха через ГТД. Результаты расчетов на рис. 4, выполненных для ряда из 15 типовых ГТД [2] при охлаждении наружного воздуха перед компрессором от $t_{\text{нв}} = 55^\circ\text{C}$ до $t_{\text{нв}} = 15^\circ\text{C}$, свидетельствуют об увеличении его массового расхода G через ГТД на величину $\Delta G = 10\dots 15\%$.

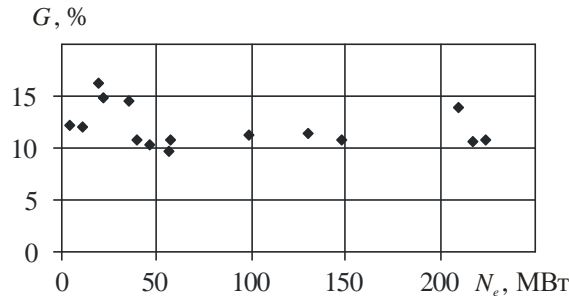


Рис. 4. Увеличение массового расхода воздуха ΔG через ГТД при его охлаждении перед компрессором ГТД в ЭТХМ от $t_{\text{нв}} = 40^\circ\text{C}$ до $t_{\text{нв}} = 15^\circ\text{C}$ в зависимости от мощности ГТД N_e при $t_{\text{нв}} = 40^\circ\text{C}$

В свою очередь, возрастание массового расхода воздуха через ГТД приводит к увеличению мощности ГТД. Значения приращения мощности ГТД $\Delta N_{e(40)}$ в результате охлаждения наружного воздуха перед компрессором в ЭТХМ на 40°C представлены на рис. 5. Расчеты выполнены для указанного выше ряда из 15 ГТД.

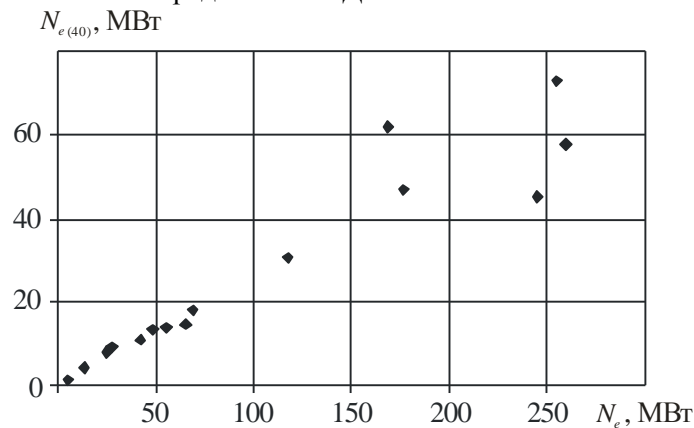


Рис. 5. Приращение мощности ГТД $\Delta N_{e(40)}$ в результате охлаждения наружного воздуха перед компрессором в ЭТХМ на 40°C в зависимости от мощности ГТД N_e при $t_{\text{нв}} = 15^\circ\text{C}$

Из рис. 5 видно, что применение ЭТХМ для охлаждения наружного воздуха перед компрессором от $t_{\text{нв}} = 55^\circ\text{C}$ до 15°C обеспечивает повышение мощности рассматриваемого ряда двигателей на $25\dots 30\%$.

Применение ТХМ особенно целесообразно в ГТД когенерационного типа – с уже имеющимся утилизационным пароводяным котлом (УК), 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 газоразделительный тракт ГТД, что не приведет к заметному усложнению когенерационной установки и в то же время повысит коэффициент ее использования, что особенно важно в летнее время, когда падение эффективности ГТД сопровождается значительными объемами сбросной теплоты.

3. Выводы

1. Проанализирован тепловой потенциал уходящих газов для ряда ГТД, включающего все типы двигателей крупнейших зарубежных фирм-производителей ГТД, и выявлены резервы повышения их мощности путем охлаждения наружного воздуха перед компрессором ГТД в эжекторных теплоиспользующих холодильных машинах.

2. Показано, что применение эжекторных теплоиспользующих холодильных машин для охлаждения наружного воздуха перед компрессором ГТД обеспечивает повышение мощности ГТД на 25...30 %. При этом располагаемый тепловой потенциал уходящих газов значительно превышает его величину, требуемую для работы теплоиспользующих холодильных машин.

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., доцент Ткач М.Р.,
к.т.н., доцент Єршов В.В.

© Радченко А.Н., 2009

Стаття надійшла до редколегії 06.05.09.