

УДК 621.436; 621.57

А.Н. РАДЧЕНКО

*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина***АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРИГЕНЕРАЦИИ
В КОМБИНИРОВАННЫХ ГАЗОПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ**

Проанализировано влияние температуры наружного воздуха на входе газопаротурбинных установок на эффективность входящих в их состав газовых и паровых турбин и выявлены резервы ее повышения за счет предварительного охлаждения наружного воздуха в теплоиспользующих холодильных машинах, утилизирующих теплоту уходящих газов. Показано, что предварительное охлаждение наружного воздуха на входе газопаротурбинных установок в эжекторных теплоиспользующих холодильных машинах обеспечивает значительное повышение мощности и коэффициента полезного действия двигателей.

Ключевые слова: газопаротурбинная установка, газотурбинный двигатель, паровая турбина, предварительное охлаждение воздуха, утилизация, уходящие газы, теплоиспользующая холодильная машина.

**1. Анализ проблемы
и постановка цели исследования**

Тепловые потери с уходящими газами в ГТД простого цикла составляют более 60 %, что обуславливает сравнительно низкую их эффективность. Один из путей сокращения этих потерь – использование теплоты уходящих газов в утилизационном пароводяном котле (УК), а вырабатываемого при этом пара – в паровой турбине (ПТ). Получение в ПТ дополнительной механической или электрической мощности обеспечивает высокие КПД таких комбинированных газопаротурбинных установок (ГПТУ). В ГПТУ вырабатывается тепловая энергия, которая используется в энергетических целях – для повышения механической или электрической мощности самой установки, но может быть задействована и для внешних потребителей тепла (теплофикационные, технологические нужды). Поэтому в общем случае ГПТУ являются установками когенерационного типа.

Эффективность ГПТУ, как и ГТД простого цикла, хотя и в меньшей степени, но все же зависит от температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ на входе компрессора [1–3]. Понизить температуру $t_{\text{нв}}$ и за счет этого повысить мощность и КПД ГПТУ можно с помощью машинного холода, который, в свою очередь, получать в теплоиспользующей холодильной машине (ТХМ), утилизирующей теплоту уходящих газов [4–8]. Очевидно, что целесообразность применения в когенерационной ГПТУ такой холодогенерирующей – тригенерационной – надстройки в виде ТХМ, зависит от располагаемого теплового потенциала газов и эффективности ТХМ как трансформа-

тора сбросной теплоты в холод. Эти два фактора взаимосвязаны, поскольку количество теплоты, потребляемой ТХМ, определяется эффективностью ее трансформации в ТХМ в процессе генерирования холода.

Цель исследования – оценка эффективности предварительного охлаждения наружного воздуха в комбинированных ГПТУ теплоиспользующими холодильными машинами, утилизирующими теплоту уходящих газов.

2. Изложение результатов исследования

В качестве объекта исследования выбрана ТХМ эжекторного типа (ЭХМ) как наиболее простая и надежная в эксплуатации, поскольку функцию компрессора в ней выполняет эжектор. При этом исходили также из того, что эффективность ЭХМ ниже, чем ТХМ других типов, в частности, абсорбционных (АХМ). Если использование ЭХМ в ГПТУ окажется целесообразным, то применение конструктивно более сложных тригенерационных контуров, например на базе АХМ, обеспечит еще большее приращение энергетических показателей ГПТУ.

Схема тригенерационного контура на базе ЭХМ, использующей теплоту уходящих газов для предварительного охлаждения наружного воздуха на входе ГПТУ, представлена на рис. 1.

В качестве рабочего тела в ЭХМ применяют низкокипящие рабочие тела (НРТ). Отвод теплоты от уходящих газов происходит в генераторе паров НРТ высокого давления, а охлаждение наружного воздуха на входе ГПТУ – в испарителе НРТ низкого

давления. Энергия паров НРТ высокого давления используется в эжекторе для поджатия паров НРТ низкого давления, всасываемых из испарителя-воздухоохладителя (И-ВО), до давления в конденсаторе.

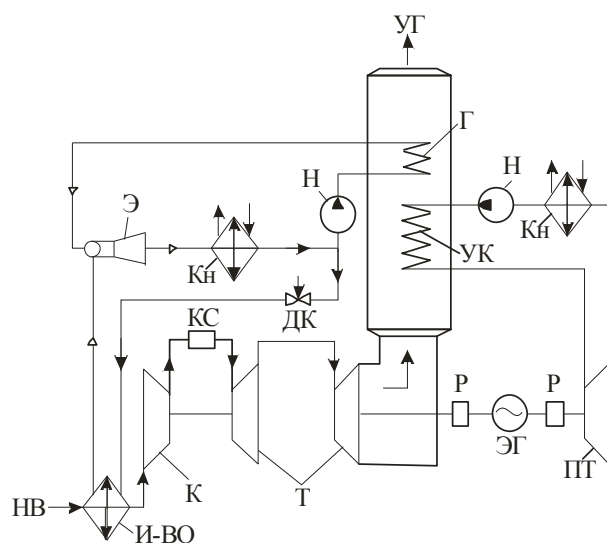


Рис. 1. Схема тригенерационного контура на базе ЭХМ с утилизацией теплоты уходящих газов для предварительного охлаждения наружного воздуха на входе ГПТУ:

К – компрессор; КС – камера сгорания;
Т – турбина газовая; УК – утилизационный котел; ПТ – паровая турбина утилизационная;
Кн – конденсатор; Н – насос; Р – редуктор;
НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

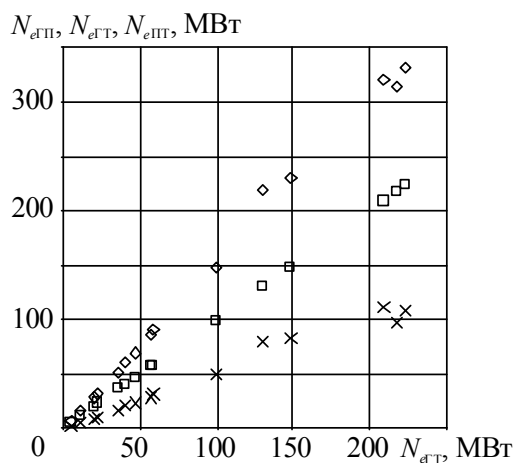


Рис. 2. Мощности ГПТУ $N_{eПТ}$, ГТД $N_{eГТ}$ и ПТ $N_{eПТ}$ в зависимости от мощности $N_{eГТ}$ базовых ГТД при $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$ [1]:
 $\diamond$ – $N_{eПТ}$; $\square$ – $N_{eГТ}$; $\times$ – $N_{eПТ}$

Проанализируем сначала доли мощности первичных ГТД и утилизационных ПТ в общей мощно-

сти базовых ГПТУ – без ЭХМ, влияние на них температуры наружного воздуха $t_{нв}$, а затем уже повышение мощности ГПТУ за счет предварительного охлаждения наружного воздуха на входе ГТД в ЭХМ как конечный результат применения тригенерации.

На рис. 2 приведены значения мощности ГПТУ $N_{eПТ}$, ГТД $N_{eГТ}$ и ПТ $N_{eПТ}$ в составе ГПТУ в зависимости от мощности базовых ГТД при температуре наружного воздуха на входе $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$ для массива из 15 двигателей, который 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 $t_3 < 1200^\circ\text{C}$; усовершенствованные стационарные ГТД с температурой газов $t_3 > 1200^\circ\text{C}$; конвертированные авиационные ГТД [1]. Как видно, при $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$ на долю ПТ, утилизирующей теплоту уходящих газов первичного ГТД, приходится около 30 % мощности ГПТУ.

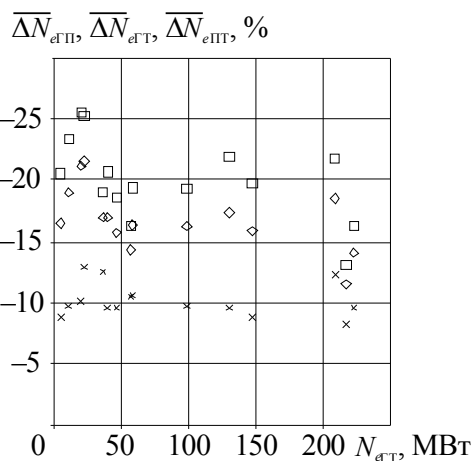


Рис. 3. Уменьшение мощности ГПТУ $\overline{\Delta N_{eПТ}}$, ГТД $\overline{\Delta N_{eГТ}}$ и ПТ $\overline{\Delta N_{eПТ}}$ в относительных величинах при повышении температуры $t_{нв}$ от 15 до 40°C для ряда мощностей $N_{eГТ}$ базовых ГТД при $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$ [1]:
 $\diamond$ – $\overline{\Delta N_{eПТ}}$; $\square$ – $\overline{\Delta N_{eГТ}}$; $\times$ – $\overline{\Delta N_{eПТ}}$

Результаты расчетов показали, что с повышением температуры $t_{нв}$ эта доля увеличивается вследствие большей чувствительности ГТД к отрицательному влиянию повышения $t_{нв}$ по сравнению с ПТ. Последнее видно из рис. 3, на котором падения мощности ГПТУ, ГТД и ПТ с увеличением температуры $t_{нв}$ от 15 до 40°C приведены в относительном виде, будучи отнесенными к значениям их мощности при $t_{нв}=40^\circ\text{C}$: $\overline{\Delta N_{eПТ}} = (N_{eПТ}(40) - N_{eПТ}(15))/N_{eПТ}(40)$ и так же для ГТД $\overline{\Delta N_{eГТ}}$ и ПТ $\overline{\Delta N_{eПТ}}$.

Значения падения мощности ГПТУ $\overline{\Delta N_e}_{\text{ГП}}$, ГТД $\overline{\Delta N_e}_{\text{ГТ}}$ и ПТ $\overline{\Delta N_e}_{\text{ПТ}}$ приведены в зависимости от мощности $N_{\text{ГТ}}$ ряда базовых ГТД, взятой при $t_{\text{нв}} = 40^\circ\text{C}$. При этом использованы данные по характеристикам ГПТУ при разных температурах $t_{\text{нв}}$, заимствованные из [1].

Как видно, наиболее резко снижается мощность базовых ГТД: примерно на 20 %, тогда как утилизационных ПТ – на 10 %, результатом чего является уменьшение мощности ГПТУ примерно на 15 %. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что влияние температуры наиболее сильно скажется на двигателях сравнительно малой мощности – до 50 МВт.

Очевидно, что единственным способом сокращения отрицательного воздействия повышенных температур наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ на показатели ГТД является его охлаждение.

Эффективность применения ТХМ во многом зависит от располагаемого теплового потенциала уходящих газов. Если для ГТД простого цикла он довольно большой, благодаря высоким температурам уходящих газов: $t_{\text{уг}} = 500 \dots 600^\circ\text{C}$, то в комбинированных ГПТУ температура $t_{\text{уг}}$ гораздо ниже: $t_{\text{уг}} = 100 \dots 200^\circ\text{C}$. Поэтому при оценке целесообразности охлаждения наружного воздуха на входе ГПТУ с помощью ТХМ надо исходить из располагаемого теплового потенциала уходящих газов и эффективности самих ТХМ, характеризуемой тепловым коэффициентом $\zeta = Q_0 / Q_r$, который представляет собой отношение холодопроизводительности Q_0 (количества теплоты, отведенной от наружного воздуха на входе ГТД) к количеству теплоты Q_r , подведенной к ТХМ от уходящих газов.

Значения ζ в зависимости от типа и режимных параметров ТХМ могут изменяться от 0,2..0,4 для конструктивно наиболее простых ЭХМ, до 0,6 для АХМ и даже выше для турбокомпрессорных ТХМ на НРТ.

На рис. 4 приведены значения мощности ГПТУ без ЭХМ и с ЭХМ, а также сами приращения мощности ГПТУ за счет охлаждения в ЭХМ наружного воздуха на 25 и 40°C в зависимости от мощности базовых ГТД при температуре наружного воздуха на входе компрессора ГТД $t_{\text{нв}} = 40^\circ\text{C}$ [1]. При этом значение теплового коэффициента ζ принималось равным 0,25, т.е. соответствующим тепловой эффективности ЭХМ.

Как видно, применение ЭХМ в ГПТУ может обеспечивать приращение мощности $\Delta N_{\text{ГП}}$ на 15...20 %.

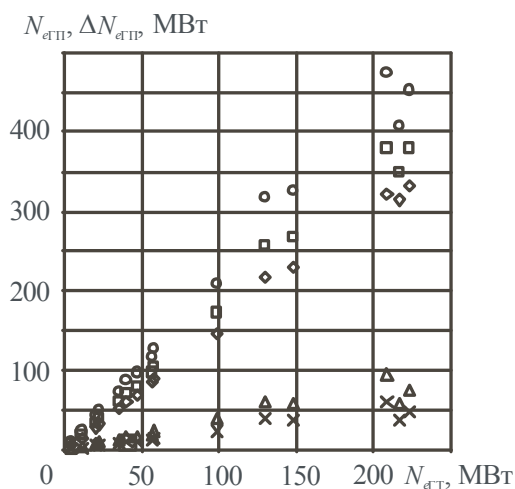


Рис. 4. Мощности ГПТУ с ЭХМ, $N_{\text{ГП}25}$ и $N_{\text{ГП}40}$, без ЭХМ, $N_{\text{ГП}}$, а также их приращения, $\Delta N_{\text{ГП}25}$ и $\Delta N_{\text{ГП}40}$, за счет охлаждения наружного воздуха в ЭХМ на величину $\Delta t_{\text{нв}} = 25$ и 40°C

в зависимости от мощности $N_{\text{ГТ}}$ базовых ГТД при $t_{\text{нв}} = 40^\circ\text{C}$:

- ◇ – $N_{\text{ГП}}$ (без ЭХМ);
- – $N_{\text{ГП}25}$ при $\Delta t_{\text{нв}} = 25^\circ\text{C}$;
- – $N_{\text{ГП}40}$ при $\Delta t_{\text{нв}} = 40^\circ\text{C}$;
- х – $\Delta N_{\text{ГП}25}$; Δ – $\Delta N_{\text{ГП}40}$

При этом необходимо, чтобы располагаемый тепловой потенциал уходящих газов был достаточный, а соответствующая разность температур уходящих газов, срабатываемая в ЭХМ, была не менее $100 \dots 150^\circ\text{C}$.

Выводы

1. Проанализировано влияние температуры наружного воздуха на мощность ГПТУ и входящих в их состав первичных газотурбинных и утилизационных паротурбинных двигателей.

2. Показано, что предварительное охлаждение наружного воздуха на входе ГТД в ЭХМ обеспечивает приращение мощности ГПТУ на 15...20 % при условии, что разность температур уходящих газов, срабатываемая в ЭХМ и определяющая располагаемый тепловой потенциал уходящих газов, не менее $100 \dots 150^\circ\text{C}$.

Литература

1. 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.*

2. 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.*

3. Chaker M. Inlet Fogging of Gas Turbine Engines-Part A: Fog Droplet Thermodynamics, Heat Transfer and Practical Considerations / M. Chaker, C.B. Meher-Homji, T.R. Mee III // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2002. – Paper GT-2002-30562. – 16 p.*

4. Билека Б.Д. Эффективность применения тепло-использующих холодильных машин в газоперекачивающих агрегатах / Б.Д. Билека, А.Н. Радченко, Н.И. Радченко // *Матеріали I Міжнарод. н.-т. конф. "Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерасії", ч. II. – Миколаїв: НУК. – 2008. – С. 85-94.*

5. Билека Б.Д. Многоцелевые теплоиспользующие контуры ГТУ газоперекачивающих станций /

Б.Д. Билека, Н.И. Радченко, А.А. Сирота // *Перша міжнар. конф. "Когенерація в промисловості та комунальній енергетиці". – К., 2004. – С. 165-167.*

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

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

8. Билека Б.Д. Тригенерационные технологии охлаждения циклового воздуха судовых ГТД / Б.Д. Билека, Н.И. Радченко, А.А. Сирота, Д.В. Коновалов // *Двигатели внутреннего сгорания. – Х.: НТУ "ХПИ", 2007. – № 2. – С. 101-104.*

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 30.04.2009

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

АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТРИГЕНЕРАЦІЇ В КОМБІНОВАНИХ ГАЗОПАРОТУРБІННИХ УСТАНОВКАХ

А.М. Радченко

Проаналізовано вплив температури зовнішнього повітря на вході газопаротурбінних установок на ефективність газових і парових турбін, що входять до її складу, та виявлено резерви її підвищення завдяки попереднього охолодження зовнішнього повітря в тепловикористовуючих холодильних машинах, які утилізують теплоту відхідних газів. Показано, що попереднє охолодження зовнішнього повітря на вході газопаротурбінних установок в ежекторних тепловикористовуючих холодильних машинах забезпечує значне підвищення потужності та коефіцієнта корисної дії двигунів.

Ключові слова: газопаротурбінна установка, газотурбінний двигун, парова турбіна, попереднє охолодження повітря, утилізація, відхідні газы, тепловикористовуюча холодильна машина.

ESTIMATION OF APPLICATION OF TRIGENERATION IN COMBINED GAS STEAM TURBINE UNITS

A.N. Radchenko

The influence of ambient air temperature at the inlet of gas steam turbine engines upon the efficiency of their gas and steam turbines was estimated and the reserves of its increase by precooling of ambient air in waste heat recovery refrigeration machines utilizing a heat of exhaust gases have been revealed. It was shown that precooling of ambient air at the inlet of gas steam turbine engines by ejector waste heat recovery refrigeration machines provides a considerable increase in power and efficiency of engines.

Key words: gas steam turbine unit, gas turbine engine, steam turbine, precooling of air, utilization, exhaust gases, 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.