

УДК 621.438.13:621.57

Н. И. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, С. А. КАНТОР<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*<sup>2</sup> *ПАО "Завод "Экватор", Украина*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ С ОХЛАЖДЕНИЕМ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ

*Рассмотрена внутрицикловая утилизация (рекуперация) теплоты отработанных газов газотурбинных установок (ГТУ) с производством холода для охлаждения воздуха на входе. Проанализирована эффективность трансформации теплоты теплоиспользующими холодильными машинами разного типа с охлаждением циклового воздуха до разных температур. Оценка эффективности внутрициклового трансформации теплоты в холод производилась по экономии топлива с учетом изменения температуры наружного воздуха в конкретных климатических условиях эксплуатации ГТУ в течение года. Показано, что эффект от охлаждения воздуха на входе ГТУ в эжекторных хладоновых или водоаммиачных абсорбционных холодильных машинах намного больше, чем в бромистолитиевых холодильных машинах.*

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, теплоиспользующая холодильная машина, внутрицикловая утилизация, рекуперация, цикловой воздух, отработанные газы, экономия топлива.

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Топливная эффективность ГТУ зависит от температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  на входе. С повышением  $t_{нв}$  на входе эффективность ГТУ снижается: удельная работа сжатия компрессора возрастает, а полезная работа турбины уменьшается, поскольку уменьшаются плотность наружного воздуха на входе компрессора и, соответственно, его расход, следствием чего является снижение КПД, увеличение удельного расхода топлива  $b_e$ . Так, для ГТУ типа ДН и ДЖ производства ГП НПКГ "Зоря-Машпроект" с повышением  $t_{нв}$  на 10 °С КПД уменьшается в абсолютных величинах на 0,8...1,0 %, или в относительных – на 2,7...2,8 %. Удельный расход топлива ГТУ при этом возрастает на 7...8 г/(кВт·ч).

Сократить тепловые потери с отработанными газами при сжигании топлива в ГТУ при повышенных температурах наружного воздуха на входе  $t_{нв}$  можно путем утилизации их теплоты теплоиспользующими холодильными машинами (ТХМ). Полученный холод целесообразно задействовать для охлаждения циклового воздуха на входе ГТУ.

Поскольку такая утилизация теплоты осуществляется в рабочем цикле самой ГТУ (внутрицикловая) и воздействует на его параметры путем снижения нижней температуры в цикле (температуры воздуха на входе компрессора)  $t_b$ , то она представляет собой рекуперацию теплоты – по аналогии с

использованием теплоты отработанных газов для нагрева сжатого воздуха на входе в камеру сгорания в ГТУ рекуперативного типа. При этом повышается термодинамическая эффективность ГТУ: увеличивается КПД, соответственно уменьшается удельный расход топлива  $b_e$ , увеличивается эффективная мощность  $N_e$ , т.е. выработка механической энергии на привод газоперекачивающих компрессоров, причем при наиболее неблагоприятных в тепловом отношении условиях эксплуатации – при высоких температурах наружного воздуха на входе  $t_{нв}$ .

**Цель** исследования – оценка повышения эффективности ГТУ охлаждением циклового воздуха путем внутрициклового рекуперации теплоты отработанных газов в теплоиспользующих холодильных машинах с учетом климатических условий эксплуатации.

### 2. Результаты исследования

Эффект от охлаждения воздуха на входе ГТУ за период времени  $\tau$  зависит от снижения температуры  $\Delta t_b$  и его продолжительности  $\tau$ , т.е. климатических условий и типа ТХМ. При эксплуатации ГТУ имеют место как сезонные, так и суточные изменения климатических условий: температуры  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi$  наружного воздуха, что видно из данных для климатических условий эксплуатации ГТУ Южнобугской компрессорной станции (июль 2011 г., с. Любашевка, Николаевская обл.), приведенных на рис. 1.

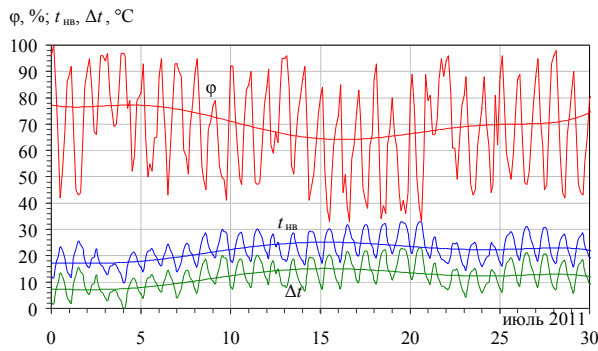


Рис. 1. Текущие значения температуры  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi_{нв}$  наружного воздуха и снижения температуры  $\Delta t$  воздуха на входе ГТУ от  $t_{нв}$  до  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  (в ВАХМ или ЭХМ)

Снижение температуры воздуха  $\Delta t = t_{нв} - t_{в2}$  зависит помимо температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  еще и от температуры  $t_{в2}$  охлажденного в ТХМ воздуха, которая определяется температурой хладонотителя  $t_x$  (рабочего тела ТХМ), т.е. зависит от конкретного типа ТХМ [1–3]. Так, в эжекторных хладонных (ЭХМ) или водоаммиачных абсорбционных (ВАХМ) холодильных машинах воздух можно охладить до температуры  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  и ниже ( $t_x = 2 \dots 3^\circ\text{C}$  и ниже), а в абсорбционных бромистолитиевых (АБХМ) холодильных машинах – до  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  и выше ( $t_x \approx 7^\circ\text{C}$ ).

Как видно из рис. 1, текущие значения снижения температуры воздуха  $\Delta t$  от  $t_{нв}$  до  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  (в ВАХМ или ЭХМ) составляют  $\Delta t = 10 \dots 20^\circ\text{C}$ . Особенно значительный потенциал охлаждения воздуха на входе ГТУ в полуденные часы высоких температур наружного воздуха  $t_{нв}$ .

Схема системы трансформации теплоты уходящих газов ГТУ в ВАХМ в холод для охлаждения воздуха на входе ГТУ представлена на рис. 2.

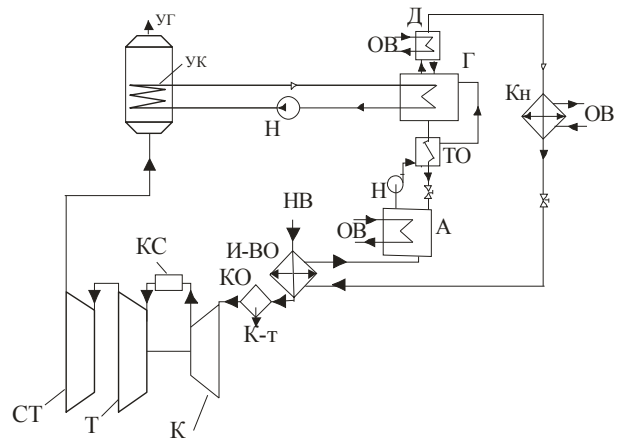


Рис. 2. Схема системы трансформации теплоты уходящих газов ГТУ в ВАХМ: К – компрессор; Т – турбина; СТ – силовая турбина; КС – камера сгорания; УК – утилизационный котел водяной; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; ВАХМ: Г – генератор; Д – дефлегматор; Н – насос; ТО – регенеративный теплообменник; А – абсорбер; КО – каплеотделитель; К-г – конденсат; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы; ОВ – охлаждающая вода

Для ГТУ ДН70, как и газотурбокомпрессорного агрегата ГТК-10-4 Южнобугской компрессорной станции (с. Любашевка, Николаевская обл.), при снижении температуры воздуха на входе на  $1^\circ\text{C}$  удельный расход топлива уменьшается на величину  $\Delta b_e = 0,7 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ . Текущие часовые значения уменьшения удельного расхода топлива  $\Delta b_{e10}$  за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ в ВАХМ или ЭХМ от  $t_{нв}$  до  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  на величину  $\Delta t_{10}$ , соответственно  $\Delta b_{e15}$  – за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ в АБХМ до  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  на величину  $\Delta t_{15}$  в течение июля 2011 г. (с. Любашевка, Николаевская обл.) приведены на рис. 3.

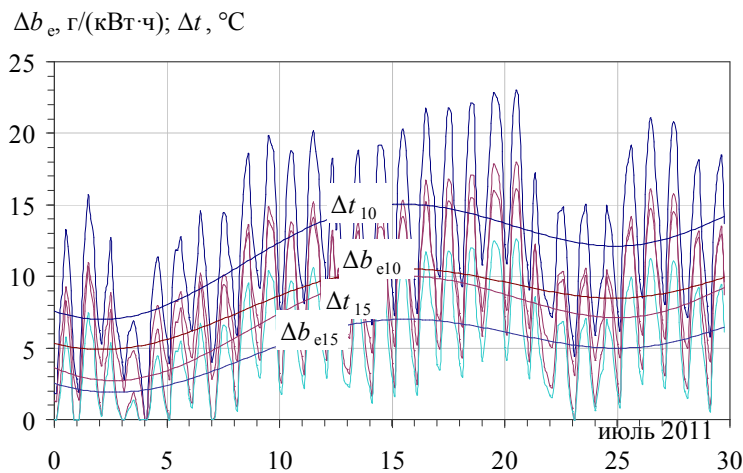


Рис. 3. Текущие значения снижения температуры воздуха  $\Delta t$  в результате его охлаждения от текущей наружной температуры  $t_{нв}$  до конечной  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  (в ВАХМ или ЭХМ) и до  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  (в АБХМ), а также соответствующие текущие значения уменьшения удельного расхода топлива  $\Delta b_{e10}$  и  $\Delta b_{e15}$

Суммируя текущие часовые значения уменьшения удельного расхода топлива  $\Delta b_{e10}$  или  $\Delta b_{e15}$  за год, получают удельную, приходящуюся на 1 кВт мощности ГТУ, годовую экономию топлива  $V_{т.1кВт}$ , кг/кВт, а также общую экономию топлива

$V_t$  за год для ГТУ мощностью, например 10 МВт, в результате охлаждения воздуха на входе от текущей наружной температуры  $t_{нв}$  до разных конечных температур  $t_{в2}$ :  $V_{т.10} = V_{т.1кВт} \cdot N_e$  (рис. 4).

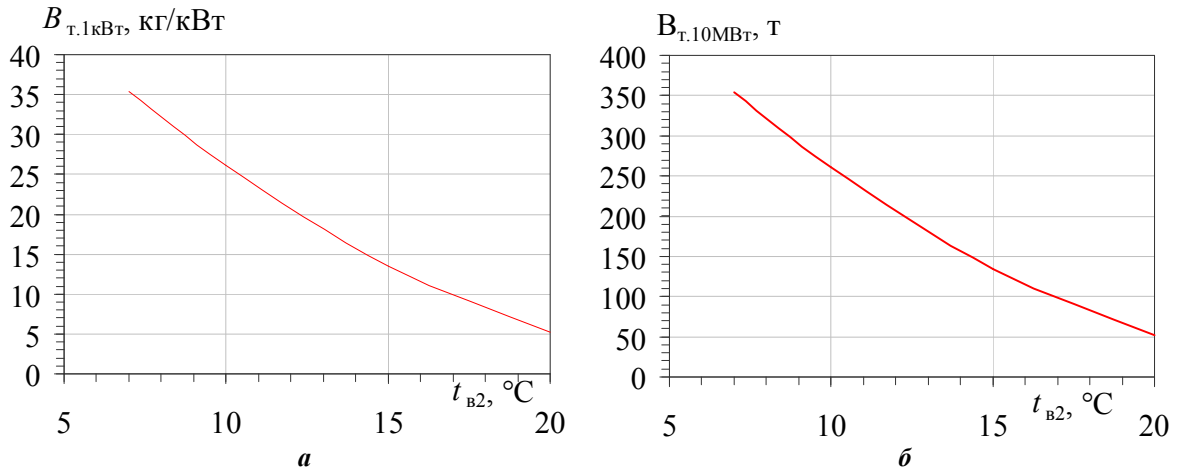


Рис. 4. Значения удельной ( $N_e = 1$  кВт) экономии топлива  $V_{т.1кВт}$  за год (а) и экономии топлива  $V_{т.10МВт}$  для ГТУ мощностью 10 МВт (б) в результате охлаждения воздуха на входе ГТУ от текущей наружной температуры  $t_{нв}$  до разных конечных температур  $t_{в2}$ :  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  – в ВАХМ или ЭХМ;  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  – в АБХМ (июль 2011 г., с. Любашевка, Николаевская обл.)

О динамике изменения эффекта от охлаждения воздуха на входе ГТУ в виде экономии топлива  $V_t$  на протяжении года можно судить по ежемесячной и суммарной годовой (по нарастающей) экономии топлива  $V_t$  для ГТУ мощностью 10 МВт в результате охлаждения воздуха на входе от текущей наружной температуры  $t_{нв}$  до конечных  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  (ВАХМ или ЭХМ) и  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  (АБХМ) соответственно на рис. 5.

Как видно из рис. 5, более глубокое охлаждение (на  $5^\circ\text{C}$  ниже) в ВАХМ или ЭХМ ( $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ ) по сравнению с АБХМ ( $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ ) обеспечивает практически в два раза большую экономию топлива: 260 т против 130 т для ГТУ мощностью 10 МВт.

Максимальные значения ежемесячной экономии топлива  $V_t$  за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ приходится на самые теплые июль-август месяцы. Наибольшим значениям ежемесячной экономии топлива  $V_t$  соответствуют и максимальные темпы наращивания суммарной годовой экономии топлива – наиболее крутой характер графической зависимости  $V_t = f(\tau, \text{мес})$ .

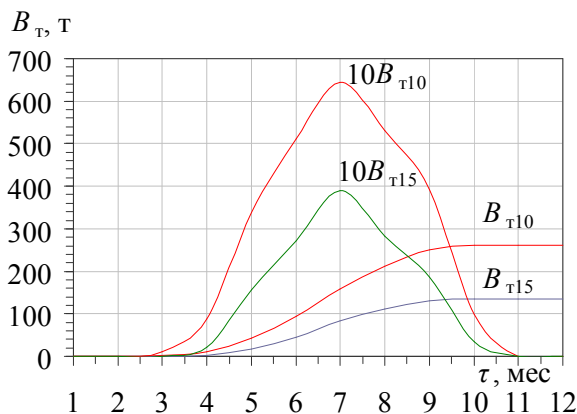


Рис. 5. Значения экономии топлива  $V_t$  ежемесячной и суммарной по нарастающей для ГТУ мощностью 10 МВт в результате охлаждения воздуха на входе от текущей наружной температуры  $t_{нв}$  до конечных  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  (в ВАХМ или ЭХМ) и  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  (в АБХМ):  $V_{т10}$  – при  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  (ВАХМ или ЭХМ);  $V_{т15}$  – при  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  (АБХМ)

### Выводы

Проанализирована эффективность внутрицикловой утилизации (рекуперации) теплоты отработанных газов ГТУ в ТХМ с охлаждением воздуха на входе до разных температур с учетом изменения температуры наружного воздуха в течение года. Показано, что при охлаждении воздуха на входе ГТУ в ВАХМ или ЭХМ годовая экономия природного газа почти в два раза больше, чем в АБХМ.

## Литература

1. Радченко, А. Н. *Методология технико-экономического обоснования эффективности применения тригенерации в газотурбинных установках [Текст] / А. Н. Радченко, А. С. Морозова // Газотурбинные технологии. – Рыбинск, Россия. – 2013. – № 3 (114). – С. 42–45.*

2. Radchenko, N. *Trigeneration plant for combined energy supply [Text] / N. Radchenko, S. Ryzkov,*

*S. Forduy // Proceedings of the 14 International Symposium on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy: HTRSE-2012. – Szczecin, Poland, 2012. – P. 503–508.*

3. Bortmany, J. N. *Assesment of aqua-ammonia refrigeration for pre-cooling gas turbine inlet air [Text] / J. N. Bortmany // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2002-30657. – 12 p.*

*Поступила в редакцию 29.05.2014, рассмотрена на редколлегии 10.09.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор М. Г. Хмельнюк, Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В. С. Мартьяновского Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса.

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК РЕКУПЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ З ОХОЛОДЖЕННЯМ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ

*М. І. Радченко, С. А. Кантор*

Розглянуто внутрішньоциклову утилізацію (рекуперацію) теплоти відпрацьованих газів газотурбінних установок (ГТУ) з виробництвом холоду для охолодження повітря на вході. Проаналізовано ефективність трансформації теплоти тепловикористовуючими холодильними машинами різного типу з охолодженням циклового повітря до різних температур. Оцінка ефективності внутрішньоциклової трансформації теплоти в холод проводилась за економією палива з урахуванням зміни температури навколишнього повітря в конкретних кліматичних умовах експлуатації ГТУ протягом року. Показано, що ефект від охолодження повітря на вході ГТУ в ежекторних хладонових або водоаміачних абсорбційних холодильних машинах набагато більше ніж в бромистолітєвих холодильних машинах.

**Ключові слова:** газотурбінна установка, тепловикористовуюча холодильна машина, внутрішньоциклова утилізація, рекуперація, циклове повітря, відпрацьовані гази, економія палива.

## INCREASING THE EFFICIENCY OF GAS TURBINE UNITES BY HEAT RECUPERATION WITH INTAKE AIR COOLING

*N. I. Radchenko, S. A. Kantor*

The in-cyclic utilization (recuperation) of the heat of gas turbine unites (GTU) exhaust gases to produce a cold for intake air cooling was considered. The efficiency of heat transforming by waste heat recovery cooling machines of different types with cooling of the cyclic air to different temperatures has been analyzed. The efficiency of in-cyclic transforming of the exhaust gases heat into a cold was evaluated by fuel saving with taking into account the ambient air temperature variations during year in concrete climatic conditions of GTU performance. It was shown that the effect due to GTU intake air cooling by refrigerant ejector cooling machines or absorption aqua-ammonia cooling machines is much more as compared with absorption bromide-lithium cooling machines.

**Key words:** gas turbine unit, waste heat recovery cooling machine, in-cyclic utilization, recuperation, cyclic air, exhaust gas, fuel saving.

**Радченко Николай Иванович** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой кондиционирования и рефрижерации, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Кантор Сергей Анатольевич** – инженер-механик, ПАО "Завод "Экватор", Николаев, Украина, e-mail: s\_kantor@mail.ru.