

УДК 621.57

Р.Н. РАДЧЕНКО, Н.И. РАДЧЕНКО

*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина***ЭНЕРГОРЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩАЯ ВНУТРИЦИКЛОВАЯ ТРИГЕНЕРАЦИЯ  
В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ**

*Проанализировано целесообразность применения внутрициклового тригенерации в газотурбинных установках (ГТУ) компрессорных станций, когда холод, производимый эжекторной теплоиспользующей холодильной машиной, утилизирующей теплоту уходящих газов ГТУ, используется для предварительного охлаждения циклового воздуха, т.е. в термодинамическом цикле самих ГТУ. Охлаждение воздуха на входе ГТУ обеспечивает сокращение удельного расхода топливного газа. Определены значения снижения температуры воздуха на входе ГТУ и экономия газа для конкретных климатических условий эксплуатации компрессорных станций.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, компрессорная станция, охлаждение воздуха, уходящие газы, теплоиспользующая холодильная машина

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

Газотранспортная система является важнейшей составляющей топливно – энергетического комплекса Украины. Почти 5 % транспортируемого газа сжигается в газотурбинных установках (ГТУ) компрессорных станций (КС). При этом больше половины его теплоты сбрасывается в окружающую среду с уходящими газами. Удаленность КС от населенных пунктов и промышленных объектов ограничивает возможности традиционной утилизации сбросной теплоты на теплофикационные и технологические нужды.

Термодинамическая эффективность ГТУ зависит от температуры наружного воздуха  $t_n$  на входе компрессора. Так, с повышением температуры  $t_n$  на 10 °С КПД ГТУ производства ГП НПКГ "Зоря – Машпроект" уменьшается в абсолютных величинах на 0,825...1,025 %. При этом меньшая величина соответствует двигателю ДЖ59 ( $\eta_e = 30,7\%$  при  $t_n = 15\text{ °C}$ ), а большая – ДН70 ( $\eta_e = 35,9\%$ ) на рис. 1, а) или 2,7...2,8 % в относительных величинах. Удельный расход топлива ГТУ при этом возрастает на 7...8 г/(кВт·ч), где меньшая величина соответствует ДН70, а большая – ДЖ59 (рис. 1, б), т.е. примерно на 3 %.

Решение проблемы сокращения тепловых потерь при сжигании топливного газа в ГТУ и, соответственно, его расхода при повышенных температурах наружного воздуха возможно путем применения тригенерационных технологий – дополнительным (к механической и тепловой энергии) произ-

водством холода теплоиспользующими холодильными машинами (ТХМ), утилизирующими теплоту уходящих газов ГТУ.

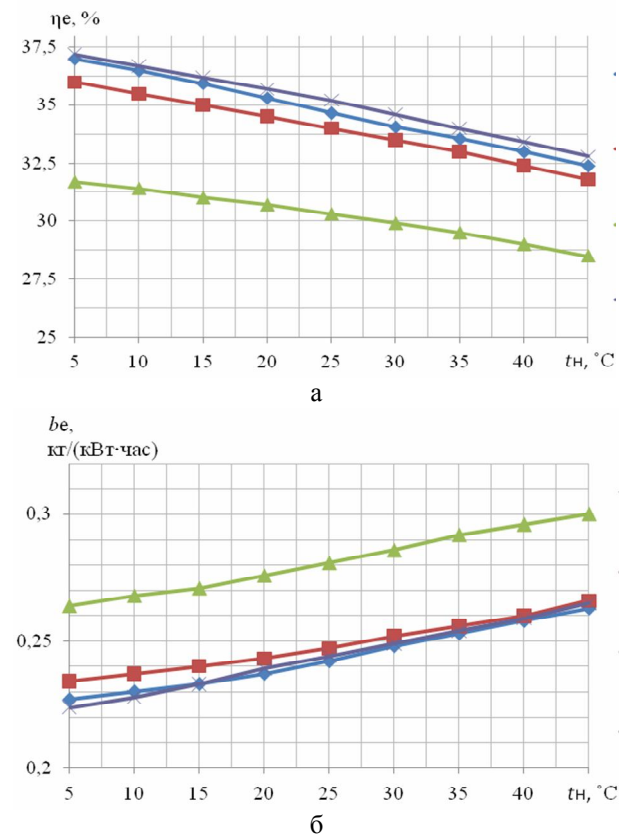


Рис. 1. Изменение КПД  $\eta_e$  (а) и удельного расхода топлива (б) в зависимости от температуры наружного воздуха  $t_n$  на входе ГТУ:

◆ – ДН70 (UGT10000); ■ – ДГ90 (UGT15000);  
▲ – ДЖ59 (UGT16000); × – ДН80 (UGT25000)

Полученный холод целесообразно задействовать для охлаждения циклового воздуха на входе ГТУ (внутрицикловая тригенерация) при повышенных  $t_n$ .

**Цель работы** – оценка целесообразности предварительного охлаждения циклового воздуха ГТУ КС в ТХМ с утилизацией теплоты уходящих газов.

## 2. Изложение результатов исследования

Рассмотрены конструктивно наиболее простые и надежные в эксплуатации эжекторные ТХМ (ЭТХМ) [1 – 3].

Схема ЭТХМ для охлаждения воздуха перед компрессором ГТУ приведена на рис. 2.

Использование в ЭТХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) обеспечивает глубокую утилизацию теплоты уходящих газов и охлаждение наружного воздуха до низких температур без поддержания вакуума в испарителях НРТ – воздухоохладителях (И – ВО). Как НРТ можно применять озонобезопасные хладоны R142В и R600 (н – бутан).

ЭТХМ состоит из паросилового и холодильного контуров. Паросиловой контур служит для получения паров НРТ высокого давления, энергия которых используется в эжекторе для сжатия паров НРТ низкого давления, всасываемых из 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 камере смешения и диффузоре).

Различие в климатических условиях эксплуатации обуславливает разные потребности в охлажде –

нии воздуха на входе ГТУ и получаемый за счет этого эффект в виде сокращения потребления топливного газа ГТУ КС.

На рис. 3 и 4 приведены данные метеоцентра по температуре  $t_n$  и относительной влажности  $\phi$  наружного воздуха для КС в с. Тарутино Одесской обл., июль 2009 г. (замеры проводились через каждые 3 часа).

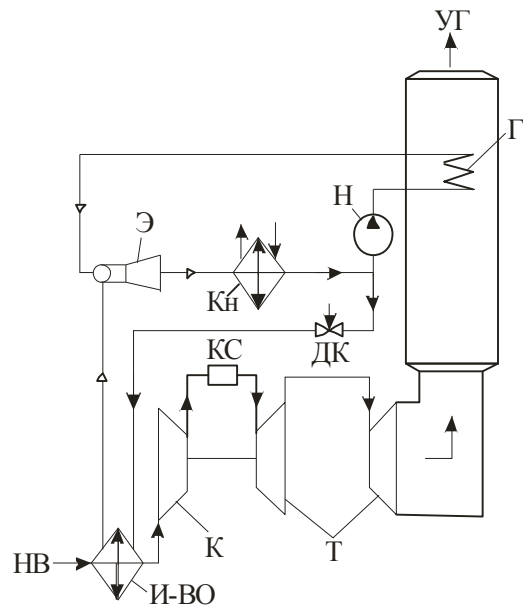


Рис. 2. Схема ЭТХМ, использующей теплоту уходящих газов для охлаждения воздуха на входе компрессора ГТУ: К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; И – ВО – испаритель – воздухоохладитель; Г – генератор пара НРТ; Э – эжектор; Кн – конденсатор НРТ; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

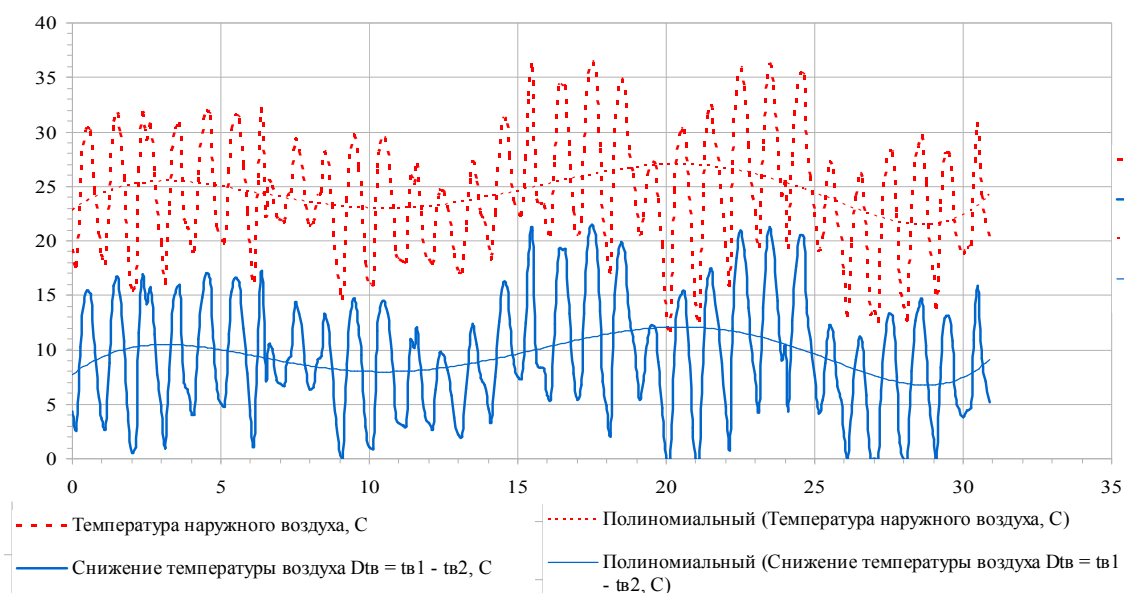


Рис. 3. Изменение температуры  $t_n$  наружного воздуха в течение июля 2009 г. и снижение температуры воздуха  $\Delta t_b$  на входе ГТУ от текущей  $t_n$  до температуры  $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ : - - -  $t_n$ ; — —  $\Delta t_b$

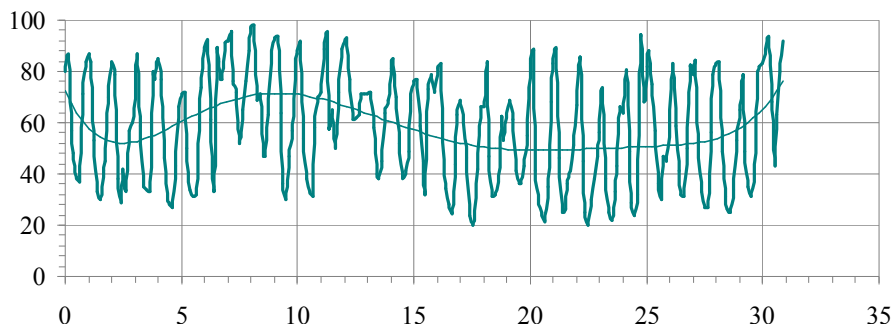


Рис. 4. Изменение относительной влажности  $\phi$ , %, наружного воздуха в течение июля 2009 г.

Как видно, в течение суток имеют место существенные колебания  $t_n$  и  $\phi$  наружного воздуха, причем максимумам  $t_n$  соответствуют минимумы  $\phi$ . Процессы охлаждения влажного воздуха сопровождаются конденсацией водяных паров, что требует дополнительных (по сравнению с охлаждением сухого воздуха) затрат холодопроизводительности. В то же время наличие дневных и ночных противоположно направленных экстремумов  $t_n$  и  $\phi$  создает благоприятные условия для большего снижения температуры воздуха на входе ГТУ днем (благодаря меньшей  $\phi$ ), когда имеет место значительное ухудшение топливной эффективности ГТУ из-за повышенных  $t_n$ .

В ночное же время, когда больше  $\phi$ , потребность в охлаждении воздуха на входе ГТУ меньше, т.к.  $t_n$  ниже.

На рис. 3 приведены также значения снижения температуры воздуха  $\Delta t_b$  на входе ГТУ от текущей температуры наружного воздуха  $t_n$  до температуры  $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ . Как видно, снижение температуры воздуха  $\Delta t_n$  в охладителе ЭТХМ (при температуре кипения НРТ в И – ВО  $t_0 = 5^\circ\text{C}$ ) в течение июля составляет  $\Delta t_b = 10 \dots 20^\circ\text{C}$  ( $10^\circ\text{C}$  – среднесуточное значение;  $20^\circ\text{C}$  – в самые жаркие часы,  $15^{00}$  часов, и дни месяца).

Используя зависимости на рис. 1, б, определено уменьшение удельного расхода топливного газа  $\Delta b_e$ , г/(кВт·ч), и его часового расхода  $\Delta G_T$ , кг/ч, по суткам за счет снижения температуры воздуха на входе на величину  $\Delta t_b$ , приведенное на рис. 5 для ГТУ ДН70 (10 МВт) за июль 2009 г. для КС в с. Тарутино Одесской обл.

Экономия топливного газа  $\Delta G_T$ , т, одной ГТУ ДН70 (10 МВт) в 4–10 – м месяцах 2009 г. (по нарастающей по суткам) за счет охлаждения воздуха на входе для КС в с. Тарутино показана на рис. 6.

Данные по экономии топливного газа  $\Delta G_T$ , тыс.  $\text{м}^3$ , одной ГТУ ДН70 за 2009 г. (по нарастающей по месяцам) за счет охлаждения воздуха на входе для разных КС и в денежном исчислении (при

цене 300 \$ за  $1000 \text{ м}^3$  топливного газа) приведены на рис. 7.

Как видно, экономия топливного газа  $\Delta G_T$  за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью 10 МВт для разных КС колеблется от 40 тыс.  $\text{м}^3$  до 83 тыс.  $\text{м}^3$  (меньшие величины соответствуют климатическим условиям западных регионов с пониженной температурой, с. Голятин Закарпатской обл., большие – восточным и южным регионам с более высокой температурой).

При цене 300 \$ за  $1000 \text{ м}^3$  топливного газа получают годовую экономию 12000...25000 \$ на одной ГТУ мощностью 10 МВт.

С учетом того, что в среднем суммарная мощность ГТУ, установленных на одной КС, примерно 50 МВт, годовая экономия для одной КС составит 60000...125000 \$.

## Выводы

Экономия топливного газа  $\Delta G_T$  за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью 10 МВт для разных КС колеблется от 40 тыс.  $\text{м}^3$  (климатические условия западных регионов с пониженной температурой, с. Голятин Закарпатской обл.) до 83 тыс.  $\text{м}^3$  (восточные и южные регионы с более высокой наружной температурой).

При цене 300 \$ за  $1000 \text{ м}^3$  топливного газа годовая экономия на одной КС с суммарной мощностью установленных ГТУ около 50 МВт составит 60000...125000 \$.

## Литература

1. Билека Б.Д. Теплоиспользующие установки кондиционирования воздуха на низкокипящих рабочих телах для газоперекачивающих станций / Б.Д. Билека, В.Н. Клименко, Н.И. Радченко, А.А. Сирота // *Авіаційно – космічна техніка і технологія. Сер. Двигуни та енергоустановки.* – Х.: ХАІ. – 2003. – Вип. 40. – С. 41–46.

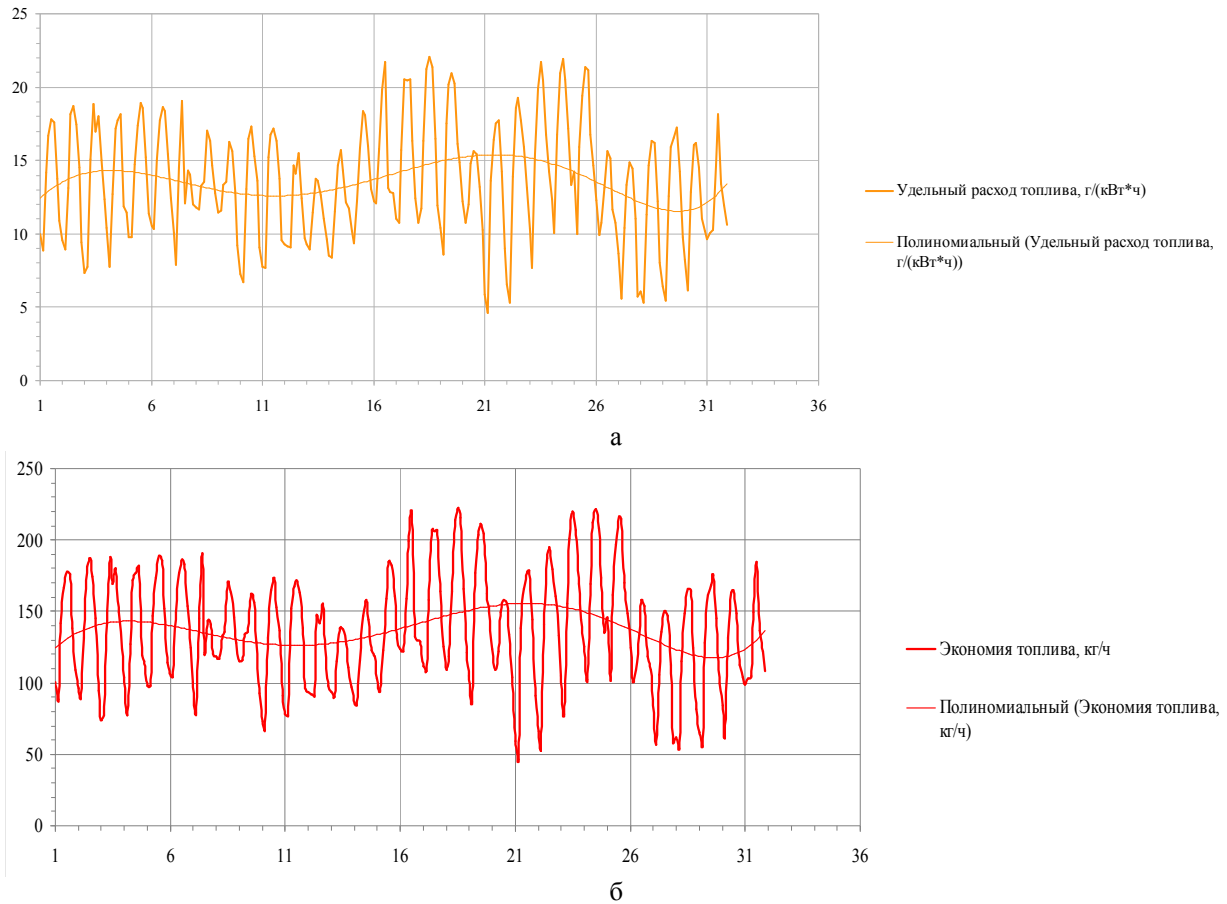


Рис. 5. Изменение экономии удельного расхода топливного газа  $\Delta b_e$ , г/(кВт·ч), (а) и часового расхода топливного газа  $\Delta G_T$ , кг/ч, (б) за счет снижения температуры воздуха на входе на величину  $\Delta t_b$  (рис. 3) для ГТУ ДН70 (10 МВт) по суткам в течение июля 2009 г. (31 сутки) для КС в с. Тарутино Одесской обл.

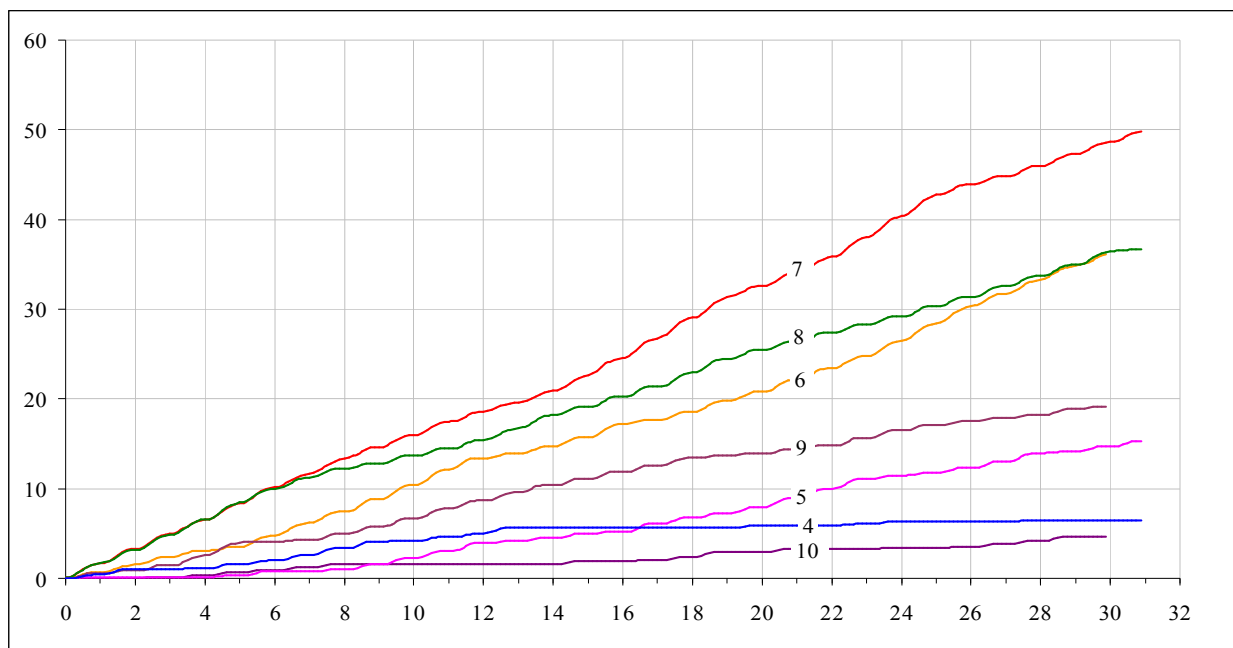
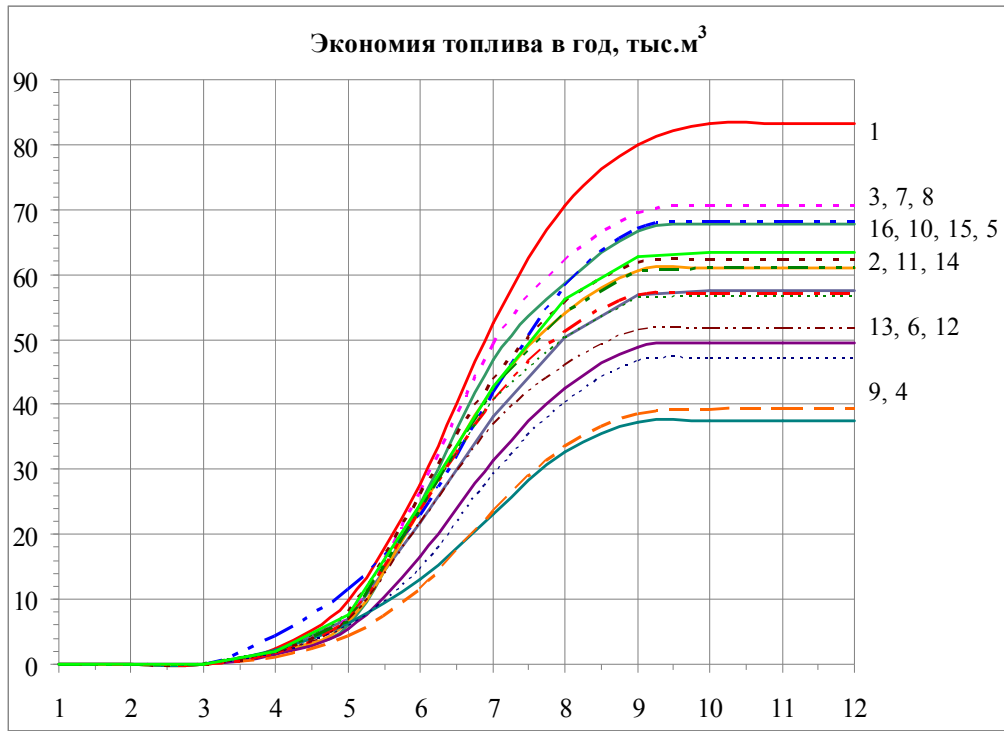
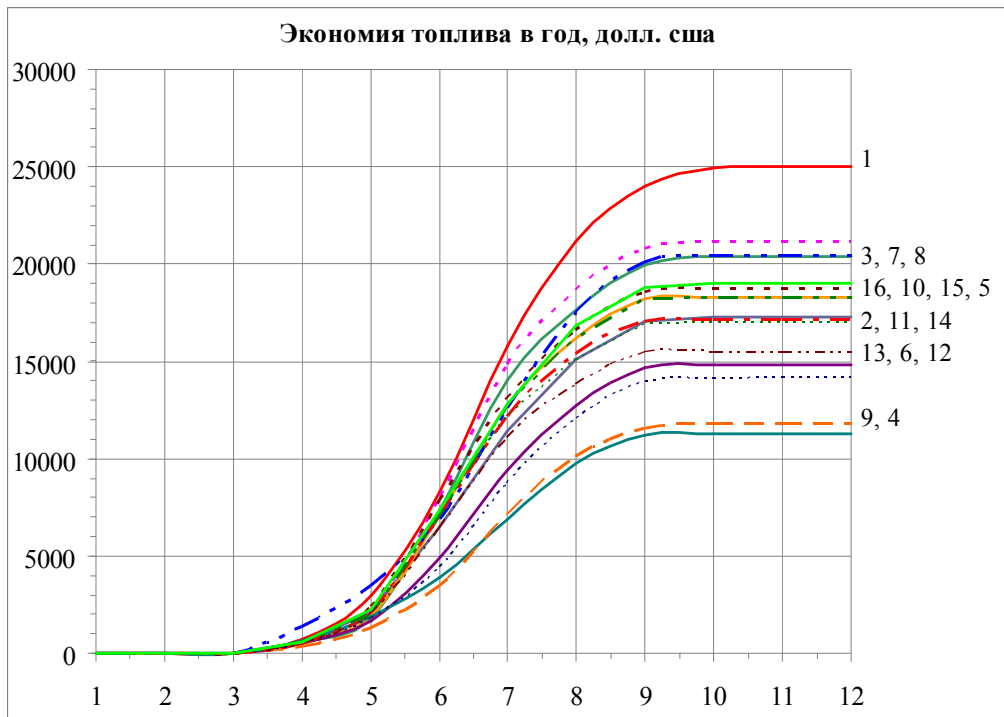


Рис. 6. Экономия топливного газа  $\Delta G_T$ , т, одной ГТУ ДН70 (мощность 10 МВт) в 4–10 – м месяцах 2009 г. (по нарастающей по суткам) за счет охлаждения воздуха на входе для КС в с. Тарутино



а



б

Рис. 7. Экономия газа  $\Delta G_T$ , тыс.  $m^3$ , (а) и стоимости газа  $C_T$ , \$, (б) на одной ГТУ ДН70 (10 МВт) за 2009 г. за счет охлаждения воздуха на входе для разных КС:

- 1 – Тарутино, Одес. обл.; 2 – Ставище, Киев. обл.; 3 – Купянск, Харьков. обл.;
- 4 – Новопсков, Луган. обл.; 5 – Решетилловка, Полтав. обл.; 6 – Бар, Винниц. обл.;
- 7 – Ужгород, Закарпат. обл.; 8 – Голятин, Закарпат. обл.; 9 – Долина, И. – Франк. обл.;
- 10 – Софиевка, Черкас. обл.; 11 – Гребинка, Полтав. обл.; 12 – Гусятин, Терноп. обл.;
- 13 – Ромны, Сум. обл.; 14 – Зеньков, Полтав. обл.;
- 15 – Диканька, Полтав. обл.; 16 – Кировоград

2. Radchenko A. Complex recovering of gas turbine waste heat for cooling of turbine cyclic air by ejector refrigeration system / A. Radchenko, N. Radchenko // *Proceedings of the ICHMT Int. Symposium "Heat Transfer in Gas Turbine Systems"*, Antalya, Turkey, 9–14 August, 2009. – 4 p.

3. Радченко А.Н. Испарительное охлаждение воздуха в компрессорах ГТД с предварительным осушением теплоиспользующей холодильной машиной / А.Н. Радченко, А. Стахель, Н.И. Радченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 8 (75). – С. 29–32.

Поступила в редакцию 1.06.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Голиков, Одесская национальная морская академия, Украина.

### **ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ВНУТРІШНЬОЦИКЛОВА ТРИГЕНЕРАЦІЯ В ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВКАХ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ**

*Р.М. Радченко, М.І. Радченко*

Проаналізовано доцільність застосування внутрішньоциклової тригенерації в газотурбінних установках (ГТУ) компресорних станцій, коли холод, одержаний в ежекторній тепловикористовуючій холодильній машині, що утилізує теплоту відхідних газів ГТУ, застосовується для попереднього охолодження циклового повітря, тобто в термодинамічному циклі самих ГТУ. Охолодження повітря на вході ГТУ забезпечує скорочення питомої витрати паливного газу. Визначені значення зниження температури повітря на вході ГТУ та економія газу для конкретних кліматичних умов експлуатації компресорних станцій.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, компресорна станція, охолодження повітря, відхідні гази, тепловикористовуюча холодильна машина.

### **ENERGY – RESOURCES SAVING INNER CYCLIC TRIGENERATIVE TECHNOLOGY IN GAS TURBINE UNITS AT COMPRESSION STATIONS**

*R.N. Radchenko, N.I. Radchenko*

The expediency of application of inner cyclic trigeneration in gas turbine units (GTU) at the compression stations when a cold produced by the waste heat recovery cooling machine utilizing the heat of exhaust gases of GTU is used to precool the cyclic air, i.e. in thermodynamic cycle of the GTU, has been analyzed. Cooling of the air at the inlet of GTU provides a reduction in fuel gas specific consumption. The values of temperature drop at the inlet of GTU and fuel gas saving for climate conditions of the performance of compression stations are evaluated.

**Keywords:** gas turbine unit, compression station, heat utilization, cooling of air, steam condensation, waste heat recovery cooling machine, diesel engine.

**Радченко Роман Николаевич** – канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Радченко Николай Иванович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. кондиционирования и рефрижерации Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, e-mail: andrad69@mail.ru.