

DOI 10.15589/jnn20160209

УДК 621.438.13:621.57

P21

A FUEL SAVING ESTIMATION OF GAS TURBINE INTAKE AIR COOLING FOR CLIMATIC CONDITIONS IN VARIOUS REGIONS OF LIBYA**ОЦЕНКА ТОПЛИВНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗНЫХ РЕГИОНОВ ЛИВИИ**

Rami Kamel El Gerbi
mazd77best@yahoo.com
ORCID: 0000-0003-3505-3463

Mykola I. Radchenko
andrad69@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5796-5370

Рами Камел Эл Герби¹
д-р философии

Н. И. Радченко²
д-р техн. наук, проф.

¹*University of Tripoli, Libya*

²*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine*

¹*Университет Триполи, Ливия*

²*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев, Украина*

Abstract. Gas turbine generators are the base of the electricity industry in Libya. The gas turbine operation conditions in Libya are characterized by high intake air temperatures and their fuel efficiency decrease, thus requiring the intake air cooling. The absorption lithium-bromide chiller and the absorption aqua-ammonia and refrigerant ejector chillers using the turbine exhaust gases heat are considered as waste heat thermotransformers; the former provides the gas turbine intake air temperature decrease down to 15 °C, while the latter — to 10 °C and lower. The assessment of fuel saving has been performed. It is achieved due to the gas turbine inlet air cooling down to various temperatures carried out by thermotransformers of different types for the regions of Libya where the turbogenerators electricity production is concentrated. It was shown that the gas turbine intake air cooling down to the temperatures of 10 and 7 °C by the absorption aqua-ammonia and refrigerant ejector chillers provides 1.5...2.0 times larger annular fuel saving as compared to the absorption lithium-bromide chiller providing the gas turbine intake air temperature decrease down to 15 °C. As a result, the higher efficiency of the gas turbine intake air deep cooling down to the temperatures of 10 and 7 °C by the absorption aqua-ammonia and refrigerant ejector chillers was proved. The annular fuel saving due to the air cooling at the inlet of gas turbine generators by thermotransformers of different types was assessed for the regions of Libya where the electricity production is concentrated.

Key words: gas turbine generator; fuel saving; absorption lithium-bromide chiller; refrigerant ejector chiller; absorption aqua-ammonia chiller; intake air cooling; exhaust gas waste heat recovery; climate conditions.

Анотація. Виконана оцінка годової економії палива за счет охолодження повітря на вході газових турбін до різних температур термотрансформаторами різних типів для регіонів Лівії, в яких зосереджено виробництво електричної енергії газотурбогенераторами. Показано, що охолодження повітря на вході газових турбін до 10 і 7 °C в абсорбційній водоаміачній і хладонової ежекторній холодильних машинах забезпечує в 1,5...2,0 рази більшу годову економію палива по порівнянню з абсорбційною бромисто-літєвою холодильною машиною, забезпечуюча зниження температури повітря на вході газових турбін до 15 °C.

Ключевые слова: газотурбогенератор; економія палива; абсорбційна бромисто-літєва холодильна машина; хладонової ежекторна холодильна машина; абсорбційна водоаміачна холодильна машина; охолодження всасуваного повітря; утилізація сбросної теплоти випускного газу; кліматическіє умови.

Анотація. Виконана оцінка економії палива за рахунок охолодження повітря на вході газових турбін до різних температур термотрансформаторами різних типів для регіонів Лівії, в яких зосереджено виробництво електричної енергії газотурбогенераторами. Показано, що охолодження повітря на вході газових турбін до 10 і 7 °C в абсорбційній водоаміачній і хладонової ежекторній холодильних машинах забезпечує в 1,5...2,0 рази більшу річну економію палива порівняно з абсорбційною бромисто-літєвою холодильною машиною, яка забезпечує зниження температури повітря на вході газових турбін до 15 °C.

Ключові слова: газотурбогенератор; економія палива; абсорбційна бромисто-літєва холодильна машина; хладонової ежекторна холодильна машина; абсорбційна водоаміачна холодильна машина; охолодження всмоктуваного повітря; утилізація скидної теплоти випускного газу; кліматичні умови.

REFERENCES

- [1] Planning Electrical Power System Studies for Libya (Demand Forecasting & Generation Expansion Planning until 2025) Final Report, 2008: General People's Committee of Electricity, Water & Gas (GPCoEWG), ICEPCO, 2008. 193 p.
- [2] Bortmany, J. N. Assessment of aqua-ammonia refrigeration for pre-cooling gas turbine inlet air. *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*. Paper GT-2002-30657. 12 p.
- [3] Radchenko N. I. Rami El Gerbi. *Effekt ot okhlazhdeniya vozdukha na vkhode gazoturbinykh elektrostansiy v raznykh regionakh Livii* [Effect of air cooling at the inlet of gas turbine electrical stations in various regions of Libya]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace engineering and technology*, 2013, no. 1 (98), pp. 76–79.
- [4] Radchenko N. I. Rami El Gerbi. *Vybor sposoba okhlazhdeniya vozdukha na vkhode GTU v zavisimosti ot regionalnykh klimaticheskikh usloviy* [Selecting the method for GTU intake air cooling according to region climatic conditions]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace engineering and technology*, 2013, no. 2 (99), pp. 97–102.
- [5] Radchenko A. N., Kantor S. A. *Effektivnost sposobov okhlazhdeniya vozdukha na vkhode GTU kompressornykh stansiy v zavisimosti ot klimaticheskikh usloviy* [Efficiency of methods for GTU inlet air cooling at the compressor stations, depending on climatic conditions]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace engineering and technology*, 2015, no. 1 (118), pp. 95–98.
- [6] Radchenko R. M. Ostapenko O. V., Yesin I. P., Portnoi B. S. *Hlyboka utylizaciya teploty tryheneratsionnoi ustanovky avtonomnoho enerhozabezpechennia* [Deep heat recovery in trigeneration autonomous power supply installations]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace engineering and technology*, 2015, no. 1(118), pp. 99–103.
- [7] Radchenko R. N., Ostapenko A. V., Lekhmus A. A. *Usovershenstvovannyi kogeneratsionnyi gazoporshnevoy modul trigeneratsionnoi ustanovki avtonomnogo energoobespecheniya* [Improved gas-piston cogeneration module of the trigeneration installation of autonomous power supply]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace engineering and technology*, 2015, no. 2(119), pp. 104–107.
- [8] Radchenko A. M., Ostapenko O. V. *Transformatsiya teploty v ustanovtsi avtonomnoho enerhozabezpechennia absorbtsiinoiu kholodylnoiu mashynoiu* [Heat transformation in the integrated energy system by the absorption chiller]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnologiya — Refrigeration engineering and technology*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 32–37.
- [9] Radchenko A. N. Kantor S. A. *Otsenka potentsiala okhlazhdeniya vozdukha na vkhode gazoturbinykh ustanovok transformatsiei teploty otrabotannykh gazov v teploispolzuyushchikh kholodilnykh mashinakh* [Assessment of the potential of the gas turbine plant inlet air cooling by transforming the exhaust gases heat in the waste heat recovery chillers]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace engineering and technology*, 2014, no. 4 (111), pp. 56–59.
- [10] Radchenko A. N. *Termoekonomicheskiy metod analiza effektivnosti okhlazhdeniya vozdukha na vkhode dvigateley teploispolzuyushchimi kholodilnymi mashinami* [Thermoeconomical method of analysis of the efficiency of engine intake air cooling by waste heat recovery chillers]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnologiya — Refrigeration engineering and technology*, 2014, no. 5(151), pp. 30–36.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Основу электроэнергетической отрасли Ливии составляют газовые турбогенераторы. В соответствии с объемами потребления и производства электроэнергии общенациональная сеть электростанций (ЭС) суммарной мощностью 5000 МВт разбита на 6 региональных: Триполи (32% суммарной мощности всех ЭС), Бенгази (15%), западный регион (20%; Завиа, Нелут, Зентан), центральный (18%; Хон, Сирт, Мисрат), восточный (6%; Шахат, Тубрак, Салун), Южный (9%; Джалу, Саба, Кофра, Морзек) [1]. Топливная эффективность газотурбинных установок (ГТУ) существенно зависит от температуры

наружного воздуха на входе $t_{\text{вв}}$ и снижается с ее повышением. Так, повышение температуры $t_{\text{вв}}$ на входе ГТУ LM2500+ фирмы «General Electric» ($N_e = 27$ МВт при $t_{\text{вв}} = 15$ °C) на 10 °C вызывает снижение КПД на 2% и соответствующее возрастание удельного расхода топлива b_e , а для ГТУ LM1600 ($N_e = 15$ МВт) — примерно на 1,6% [2]. Из-за повышенных температур воздуха $t_{\text{вв}}$ на входе электрогенерирующие мощности ГТУ оказываются на 15...20% ниже установленных [1]. Поэтому проблема охлаждения воздуха на входе ГТУ стоит в энергетике Ливии остро.

Климатическая карта Ливии характеризуется значительными различиями тепловлажностных условий

эксплуатация ГТУ (температуры $t_{\text{нв}}$, относительной влажности $\phi_{\text{нв}}$ наружного воздуха), и прежде всего в указанных 6 регионах, в которых сконцентрировано производство электроэнергии газотурбинными электростанциями.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Глубина охлаждения воздуха термотрансформаторами, использующими теплоту газов, а следовательно, и получаемый эффект в виде сокращения потребления топлива ограничиваются температурой t_x хладоносителя (хладагента), подаваемого в воздухоохладитель на входе ГТУ. Так, при использовании в качестве хладагента озонобезопасных хладонов R142B и R600 в эжекторных термотрансформаторах (ЭТТ) или аммиака в абсорбционных водоаммиачных термотрансформаторах (ВАТТ) [2, 3–6] воздух может быть охлажден до температуры $t_{\text{в2}} = 10^\circ\text{C}$ и даже 7°C ($t_x = 2...3^\circ\text{C}$), а в случае применения воды как хладагента в абсорбционных бромистолитиевых термотрансформаторах (АБТТ) температура охлажденного воздуха $t_{\text{в2}} = 15...17^\circ\text{C}$ ($t_x \approx 7^\circ\text{C}$) [3, 4, 7, 8].

Тепловлажностные параметры наружного воздуха характеризуются не только сезонными, но и суточными колебаниями температуры $t_{\text{нв}}$, а следовательно, величины ее снижения $\Delta t_{\text{в}} = t_{\text{нв}} - t_{\text{в2}}$ в процессе охлаждения и сокращения потребления топлива. Поэтому оценку эффективности охлаждения в виде экономии топлива следует производить с учетом текущих значений температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ и температуры охлажденного воздуха $t_{\text{в2}}$, зависящей от типа термотрансформатора.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — оценка топливной эффективности охлаждения воздуха на входе ГТУ и выбор типа термотрансформатора, следует производить с учетом текущих значений, обеспечивающего достижение максимального эффекта с учетом климатических условий эксплуатации в разных регионах Ливии.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Глубина охлаждения воздуха $\Delta t_{\text{в}}$ и, соответственно, получаемый эффект от охлаждения воздуха на входе ГТУ в виде экономии топлива зависят не только от текущей наружной температуры $t_{\text{нв}}$, но и от конечной $t_{\text{в2}}$, которая определяется типом термотрансформатора: в АБТТ — при охлаждении воздуха до $t_{\text{в2}} = 15...20^\circ\text{C}$; в ЭТТ — до $t_{\text{в2}} = 10^\circ\text{C}$ и ниже.

Методика оценки эффективности охлаждения воздуха на входе ГТУ [9, 10] позволяет выбрать глубину охлаждения — конечную температуру $t_{\text{в2}}$ и, следовательно, тип термотрансформатора для конкретных климатических условий: АБТТ — $t_{\text{в2}} = 12...15^\circ\text{C}$, ВАТТ или ЭТТ — $t_{\text{в2}} = 7...10^\circ\text{C}$ для климатических условий региона.

Для ГТУ с одинаковым влиянием охлаждения воздуха на входе на топливную эффективность, т. е. одинаковой величиной уменьшения удельного расхода топлива Δb_e , приходящейся на 1°C снижения температуры воздуха на входе ГТУ: $\Delta b_{e1^\circ\text{C}} = \Delta b_e / \Delta t$, при оценке годовой экономии топлива весьма удобным показателем является удельная, приходящаяся на 1 кВт электрической мощности ГТУ, экономия топлива $V_{\text{т,г1}} = V_{\text{т}} / N_e$, кг/кВт, получаемая как $V_{\text{т,г1}} = \Sigma[(\Delta t_{\text{в}} \tau)] \cdot (\Delta b_e / \Delta t)$.

Зависимость удельной, приходящейся на 1 кВт электрической мощности ГТУ, годовой экономии топлива $V_{\text{т,г1}} = V_{\text{т}} / N_e$, кг/кВт, полученной как $V_{\text{т,г1}} = \Sigma[(\Delta t_{\text{в}} \tau)] \cdot (\Delta b_e / \Delta t)$, приведена на рис. 1. При этом исходили из того, что при снижении температуры воздуха на входе на 1°C удельный расход топлива уменьшается на величину $\Delta b_{e1^\circ\text{C}} = \Delta b_e / \Delta t = 0,35 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

Зная величину удельного показателя сокращения расхода топлива на 1 кВт мощности ГТУ, $V_{\text{т,г1}} = \Sigma[(\Delta t_{\text{в}} \tau)] \cdot (\Delta b_e / \Delta t)$, кг/кВт, можно легко получить годовую экономию топлива $V_{\text{т}} = V_{\text{т,г1}} \cdot N_e$ для ГТУ любой мощности, например, $N_e = 10 \text{ МВт}$, и ГТУ суммарной мощностью N_e , конечно, при условии одинакового уменьшения удельного расхода топлива Δb_e , приходящегося на 1°C снижения температуры воздуха на входе ГТУ: $\Delta b_{e1^\circ\text{C}} = \Delta b_e / \Delta t$.

Для удобства пересчета на другие мощности значения получаемой годовой экономии топлива за счет охлаждения воздуха на входе рассчитывали для ГТУ номинальной мощностью 10 МВт (рис. 2).

Об эффективности более глубокого охлаждения воздуха до $t_{\text{в2}} = 7...10^\circ\text{C}$ в ЭТТ или ВАТТ по сравнению с охлаждением до $t_{\text{в2}} = 15^\circ\text{C}$ в АБТТ для климатических условий г. Триполи можно судить по соответствующей годовой экономии топлива в относительном виде $V_{\text{т}} / V_{\text{т15}}$ на рис. 3.

Как видно, более глубокое охлаждение воздуха на входе ГТУ до температур $t_{\text{в2}} = 10$ и 7°C в ЭТТ или ВАТТ обеспечивает в 1,5...2,0 раза большую годовую экономию топлива по сравнению с охлаждением воздуха до температуры $t_{\text{в2}} = 15^\circ\text{C}$ в АБТТ.

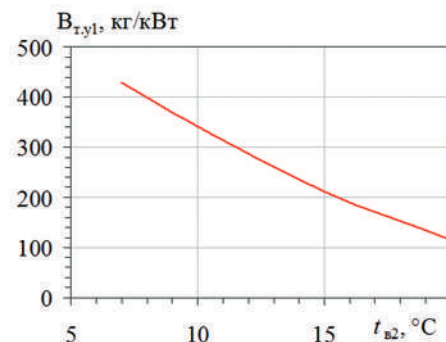


Рис. 1. Значения удельной (на 1 кВт мощности ГТУ) экономии топлива $V_{\text{т,г1}}$ за год в результате охлаждения воздуха на входе ГТУ до разных конечных температур $t_{\text{в2}}$ (г. Триполи, 2009 г.)

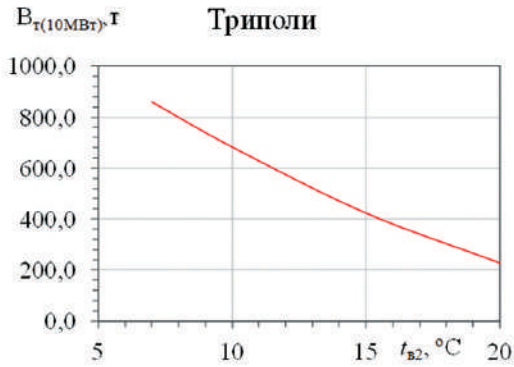


Рис. 2. Значения годовой экономии топлива $V_{T(10MBt)}$ в результате охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью 10 МВт до разных конечных температур t_{B2} (г. Триполи, 2009 г.)

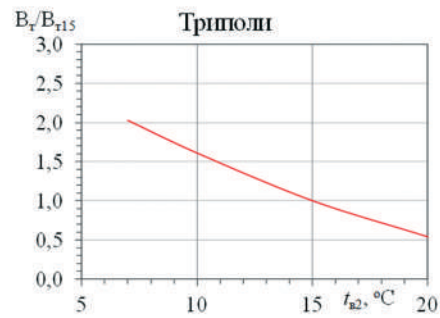


Рис. 3. Значения годовой экономии топлива в результате охлаждения воздуха на входе ГТУ до разных температур t_{B2} в относительном виде V_T/V_{T15} (г. Триполи, 2009 г.):

V_T — до разных температур t_{B2} ; V_{T15} — до температуры $t_{B2} = 15^\circ\text{C}$ в АБТТ

На рис. 4 даны значения годовой экономии топлива V_T одной ГТУ номинальной мощностью 10 МВт при разных конечных температурах t_{B2} охлажденного воздуха на входе для 6 регионов Ливии, в которых в основном расположены газотурбинные ЭС: 1 — Триполи; 2 — Бенгази; 3 — Шахат (восточный регион); 4 — Хон (центральный); 5 — Джало (южный); 6 — Налут (западный регион).

При этом принимали, что при охлаждении воздуха на входе ГТУ на 10°C удельный расход топлива сокращается на величину $\Delta b_e = 3,5 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ [2–4].

Как видно, эффект от применения разных способов охлаждения воздуха на входе конкретной ГТУ в разных трансформаторах (соответственно, температуры t_{B2} охлажденного воздуха) существенно зависит от климатических условий региона, превышая, например, для центрального и южного регионов (кривые 4 и 5) практически в два раза его величину для восточного региона (кривая 3).

При оценке суммарного для электрогенерирующей отрасли страны эффекта от применения того или иного способа охлаждения воздуха на входе ГТУ (разными трансформаторами) помимо влияния снижения температуры воздуха на входе на топливную эффективность конкретных ГТУ необходимо учитывать электрические мощности электростанций (ЭС), сосредоточенные в каждом из 6 регионов (при суммарной мощности всех ЭС 5000 МВт): Триполи (32% суммарная мощность ЭС, или 1600 МВт), Бенгази (15%, 750 МВт), западный регион (Налут, Завиа, Зентан: 20%, 1000 МВт), центральный (Хон, Сирт, Мисрат: 18%, 900 МВт), восточный (Шахат, Тубрак, Салун: 6%, 300 МВт), Южный (Джало, Саба, Кофра, Морзек: 9%, 450 МВт) [1].

Значения годовой экономии топлива V_T^p за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ для указанных 6 регионов с учетом электрической мощности всех ЭС, расположенных в регионах, при разных конечных температурах t_{B2} охлажденного воздуха (разных способах охлаждения) приведены на рис. 5.

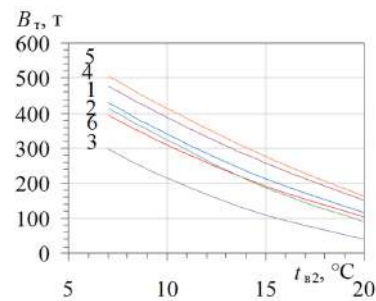


Рис. 4. Значения годовой экономии топлива V_T одной ГТУ номинальной мощностью 10 МВт при разных конечных температурах t_{B2} охлажденного воздуха для регионов Ливии, в которых расположены газотурбинные ЭС, за 2009 г.: 1 — Триполи; 2 — Бенгази; 3 — Шахат (восток); 4 — Хон (центр); 5 — Джало (юг); 6 — Налут (запад)

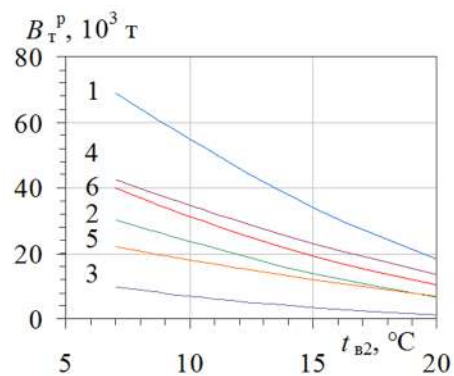


Рис. 5. Значения годовой экономии топлива V_T^p за счет охлаждения воздуха на входе всех ГТУ электростанций для 6 регионов при конечных температурах t_{B2} охлажденного воздуха (разных способах охлаждения) за 2009 г.:

1 — Триполи (32%, 1600 МВт); 2 — Бенгази (15%, 750 МВт); 3 — Шахат (восток, 6%, 300 МВт); 4 — Хон (центр, 18%, 900 МВт); 5 — Джало (юг, 9%, 450 МВт); 6 — Налут (запад, 20%, 1000 МВт)

Как видно, при охлаждении воздуха в АБТТ ($t_{в2} = 12...15\text{ }^\circ\text{C}$) значения годовой экономии топлива за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ для всех ГТУ ЭС и климатических условий, например, Триполи (кривая 1), составляет 30000...48000 т, тогда как в ВАТТ или ЭТТ ($t_{в2} = 7...10\text{ }^\circ\text{C}$) — П = 55000...68000 т, т. е. примерно в 1,8...1,4 раза больше, что свидетельствует о существенной зависимости экономии топлива от глубины охлаждения воздуха на входе ГТУ и, следовательно, типа термотрансформатора.

Исходя из мощности ГТУ всех электростанций в каждом из 6 регионов рассчитана годовая экономия топлива B_T^P за счет охлаждения воздуха от текущей температуры наружного воздуха $t_{нв}$ до $t_{в2} = 10\text{ }^\circ\text{C}$ (ВАТТ или ЭТТ), $t_{в2} = 15\text{ }^\circ\text{C}$ (АБТТ) и увлажнением воздуха до t_m на входе ГТУ за 2009 г. (рис. 6).

Как видно, годовая экономия топлива B_T за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ во всех регионах весьма значительная, а ее различие объясняется климатическими условиями регионов (соответственно

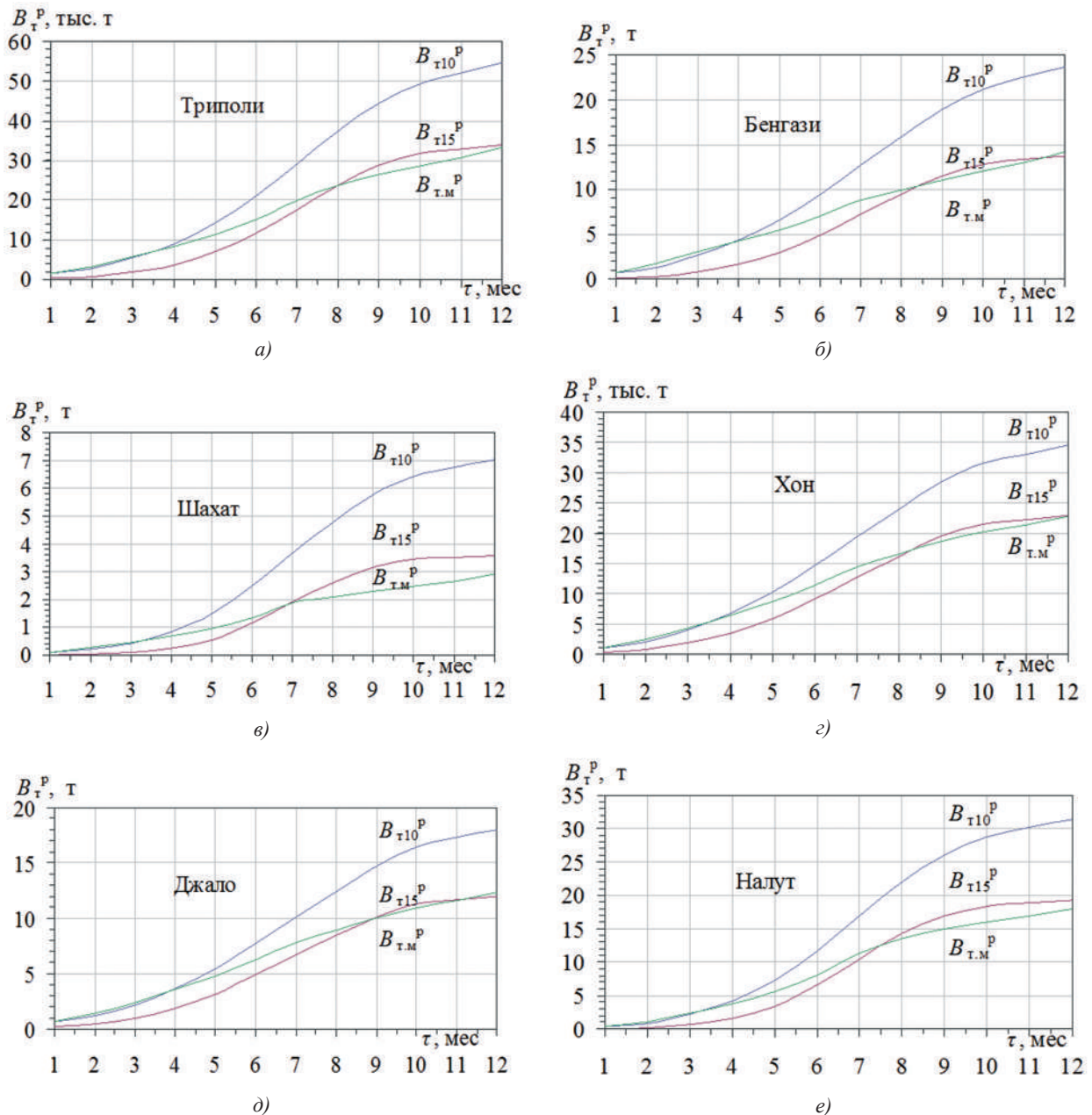


Рис. 6. Годовая экономия топлива B_T^P за счет охлаждения воздуха от текущей температуры наружного воздуха $t_{нв}$ до $t_{в2} = 10\text{ }^\circ\text{C}$ (ВАТТ или ЭТТ), $t_{в2} = 15\text{ }^\circ\text{C}$ (АБТТ) и увлажнением воздуха до t_m на входе всех ГТУ электростанций 6 регионов за 2009 г.:

B_{T10}^P — при $t_{в2} = 10\text{ }^\circ\text{C}$; B_{T15}^P — при $t_{в2} = 15\text{ }^\circ\text{C}$; B_{Tm}^P — при $t_{в2} = t_m$; а) Триполи (32%, 1600 МВт); б) Бенгази (15%, 750 МВт); в) восток (Шахат, 6%, 300 МВт); г) центр (Хон, 18%, 900 МВт); д) юг (Джало, 9%, 450 МВт); е) запад (Налут, 20%, 1000 МВт)

и глубиной охлаждения воздуха), а также суммарными мощностями электростанций.

За счет охлаждения воздуха на входе ГТУ суммарной мощностью 1600 МВт (г. Триполи) в ВАТТ или ЭТТ можно сэкономить 55000 т топлива (природного газа) за год. Используя сэкономленное топливо, можно выработать дополнительно $230 \cdot 10^6$ кВт·ч электроэнергии (при удельном расходе топлива b_e на производство 1 кВт·ч электроэнергии 240 г/(кВт·ч)), на располагаемых мощностях ГТУ. Иначе для получения этих дополнительных $230 \cdot 10^6$ кВт·ч электроэнергии (при традиционной эксплуатации ГТУ без охлаждения воздуха на входе) необходимо было бы ввести в эксплуатацию газотурбинную электростанцию мощностью 26 МВт, т.е. 1,6% суммарной электрической мощности ГТУ, установленных в Триполи.

Следует отметить, что значения эффекта для способа охлаждения воздуха на входе ГТУ его увлажнением до состояния насыщения ($\varphi = 100\%$) с понижением температуры воздуха до ее значения по мокрому термометру t_m несколько завышено (примерно на 10%), поскольку относительная влажность повышается практически до $\varphi \approx 90\%$, а не 100% (во избежание выпадения влаги во всасывающем диффузоре компрессора ГТУ), кроме того, при расчетах не вводилось ограничение по минимальной температуре t_m , которая в относительно прохладные месяцы t_m может опускаться ниже $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ и даже 10°C . В такие прохладные периоды потребность в охлаждении воздуха на входе ГТУ может отсутствовать вообще. Поэтому в действительности разница в эффекте от охлаждения воздуха на входе ГТУ в АБТТ ($t_{b2} = 15^\circ\text{C}$) и его увлажнением более значительная.

Переход ГТУ всех электростанций на эксплуатацию с охлаждением воздуха на входе обеспечивает весьма значительную годовую экономию топлива $V_T = 170$ тыс.т. На сэкономленном топливе можно выработать дополнительно $700 \cdot 10^6$ кВт·ч электроэнергии (при удельном расходе топлива b_e на производство 1 кВт·ч электроэнергии 240 г/(кВт·ч)), на располагаемых мощностях ГТУ. При традиционной работе ГТУ без охлаждения воздуха на входе для получения дополнительных $700 \cdot 10^6$ кВт·ч электроэнергии потребовалось бы введение в эксплуатацию газотурбинной электростанции мощностью 80 МВт.

ВЫВОДЫ. В результате анализа эффективности разных способов охлаждения воздуха на входе ГТУ термотрансформаторами разных типов, использующими теплоту отработанных газов: в абсорбционном бромисто-литиевом термотрансформаторе (АБТТ) до температуры $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$, в эжекторном и абсорбционном водоаммиачном термотрансформаторах (ЭТТ и ВАТТ) до температуры $t_{b2} = 10^\circ\text{C}$ и ниже — с учетом климатических условий эксплуатации обосновано целесообразность глубокого охлаждения воздуха на входе ГТУ.

Показано, что более глубокое охлаждение воздуха на входе ГТУ до температуры $t_{b2} = 10$ и 7°C в ЭТТ или ВАТТ обеспечивает в 1,5...2,0 раза большую годовую экономию топлива по сравнению с охлаждением воздуха до температуры $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ в АБТТ. Приведена оценка эффекта от охлаждения воздуха на входе ГТУ в виде годовой экономии топлива для регионов Ливии, в которых сосредоточено производство электрической энергии газотурбинными электростанциями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Planning Electrical Power System Studies for Libya (Demand Forecasting & Generation Expansion Planning until 2025) [Text]. — Final Report, 2008: General People's Committee of Electricity, Water & Gas (GPCoEWG), ICEPCO, 2008. — 193 p.
- [2] Bortmany, J. N. Assessment 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.
- [3] Радченко, Н. И. Эффект от охлаждения воздуха на входе газотурбинных электростанций в разных регионах Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Эл Герби // Авиационно-космическая техника и технология. — 2013. — № 1 (98). — С. 76–79.
- [4] Радченко, Н. И. Выбор способа охлаждения воздуха на входе ГТУ в зависимости от региональных климатических условий. [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Эл Герби // Авиационно-космическая техника и технология. — 2013. — № 2 (99). — С. 97–102.
- [5] Радченко, А. Н. Эффективность способов охлаждения воздуха на входе ГТУ компрессорных станций в зависимости от климатических условий [Текст] / А. Н. Радченко, С. А. Кантор // Авиационно-космическая техника и технология. — 2015. — № 1 (118). — С. 95–98.
- [6] Радченко, Р. М. Глибока утилізація теплоти тригенераційної установки автономного енергозабезпечення [Текст] / Р. М. Радченко, О. В. Остапенко, І. П. Єсін, Б. С. Портної // Авиационно-космическая техника и технология. — 2015. — № 1 (118). — С. 99–103.
- [7] Радченко, Р. Н. Усовершенствованный когенерационный газопоршневой модуль тригенерационной установки автономного энергообеспечения [Текст] / Р. Н. Радченко, А. В. Остапенко, А. А. Лехмус // Авиационно-космическая техника и технология. — 2015. — № 2 (119). — С. 104–107.
- [8] Радченко, А. М. Трансформація теплоти в установці автономного енергозабезпечення абсорбційною холодильною машиною [Текст] / А.М. Радченко, О.В. Остапенко // Холодильна техніка та технологія. — 2015. — Т. 51, вып. 2. — С. 32–37.

- [9] **Радченко, А. Н.** Оценка потенциала охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок трансформацией теплоты отработанных газов в теплоиспользующих холодильных машинах [Текст] / А. Н. Радченко, С. А. Кантор // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2014. — № 4 (111). — С. 56–59.
- [10] **Радченко, А. Н.** Термoeкономический метод анализа эффективности охлаждения воздуха на входе двигателей теплоиспользующими холодильными машинами [Текст] / А. Н. Радченко // *Холодильна техніка та технологія*. — 2014. — № 5 (151). — С. 30–36.

© Рамі Камел Ел Гербі, М.І. Радченко

Надійшла до редколегії 01.04.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

д-р техн. наук, проф. *С. І. Сербін*