

УДК 621.57

Н.И. РАДЧЕНКО, РАМИ ЭЛЬГЕРБИ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

## ОХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЛИВИИ

*Проанализирована эффективность использования тепла уходящих газотурбинных двигателей для охлаждения воздуха на входе теплоиспользующей эжекторной холодильной машины на низкокипящем рабочем теле, которая включает силовой и холодильный контуры. Показана зависимость теплового коэффициента и коэффициента эжекции, удельной холодопроизводительности холодильной машины и достигаемого снижения температуры воздуха от температуры кипения низкокипящего рабочего тела в силовом контуре машины. Значения снижения температуры воздуха на входе газотурбинных двигателей рассчитаны с учетом изменения климатических условий эксплуатации.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, охлаждение воздуха, теплоиспользующая эжекторная холодильная машина, температура, влажность воздуха, уходящий газ.

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Эффективность газотурбинных установок (ГТУ) существенно зависит от температуры наружного воздуха  $t_{\text{нв}}$ . Так, при эксплуатации ГТУ в климатических условиях Ливии при  $t_{\text{нв}}$  около 40 °С, что обычно имеет место в июле–августе, мощность ГТУ составляет 80 % ее номинальной величиной при температуре 15 °С, соответствующей ISO 3977 (рис. 1 [4]).

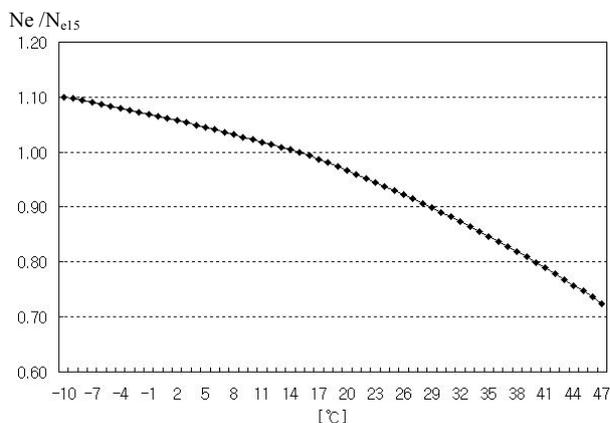


Рис. 1. Относительное изменение мощности  $N_e/N_{e15}$  (по сравнению с номинальной  $N_e/N_{e15} = 1$  при  $t_{\text{нв}} = 15$  °С) в зависимости от температуры наружного воздуха  $t_{\text{нв}}$

По данным [1, 2] каждые 10 °С увеличения температуры  $t_{\text{нв}}$  по сравнению с температурой  $t_{\text{н}} = 15$  °С приводят к уменьшению мощности  $N_e$  тяжелых стационарных ГТУ типа Frame-7 (FR-7) фирмы "General Electric" (например GE7121EA:  $N_e = 87$  МВт при  $t_{\text{н}} = 15$  °С) на 5...9 %, а для конвер-

тированных авиационных ГТУ типа LM-6000 фирмы "General Electric" ( $N_e = 45$  МВт) повышение температуры от 15 до 35 °С вызывает снижение мощности на 20 %.

Для ГТУ LM2500+ фирмы "General Electric" ( $N_e = 27$  МВт при  $t_{\text{нв}} = 15$  °С) повышение температуры  $t_{\text{нв}}$  на 10 °С вызывает снижение КПД на 2 % и соответствующее (на 2 %) возрастание удельного расхода топлива  $b_e$ , а для ГТУ LM1600 ( $N_e = 15$  МВт) ухудшение КПД и  $b_e$  составляет примерно 1,6 % [3].

Ухудшение показателей ГТУ с повышением  $t_{\text{нв}}$  на входе, с одной стороны, и возрастание температуры  $t_{\text{г}}$  уходящих газов (примерно на величину изменения температуры воздуха  $\Delta t_{\text{н}} : \Delta t_{\text{г}} \approx \Delta t_{\text{н}}$ ), с другой, делает целесообразным охлаждение воздуха на входе ГТУ с помощью теплоиспользующей холодильной машины (ТХМ), утилизирующей теплоту газов. Охлаждение воздуха на входе обеспечит эффективную стабильную (без снижения мощности) эксплуатацию ГТУ при повышенных  $t_{\text{нв}}$ .

**Цель работы** – оценка эффективности использования тепла уходящих газов для охлаждения воздуха на входе ГТУ с помощью ТХМ с учетом климатических условий Ливии.

### 2. Результаты исследования

Рассмотрена эжекторная ТХМ (ТЭХМ) как конструктивно наиболее простая и надежная в эксплуатации, в которой функцию компрессора выполняет эжектор (рис. 2). В качестве рабочего тела ТЭХМ применяют низкокипящие рабочие тела (НРТ), например, озонобезопасные хладоны R142B и R600 (н-бутан), что обеспечивает глубокую утили-

зацию теплоты уходящих газов и охлаждение наружного воздуха до низких температур без поддержания вакуума в испарителях НРТ - воздухоохлаждителях (И-ВО).

ТЭХМ состоит из паросилового и холодильного контуров. Паросиловой контур служит для получения паров НРТ высокого давления, которые расширяются в сопле эжектора и энергия которых используется для сжатия паров НРТ низкого давления (в камере смешения и диффузоре эжектора), всасываемых из И-ВО холодильного контура, до давления в конденсаторе. Эжектор совмещает функции детандера паросилового контура (сопло) и компрессора холодильного контура (камера смешения и диффузор).

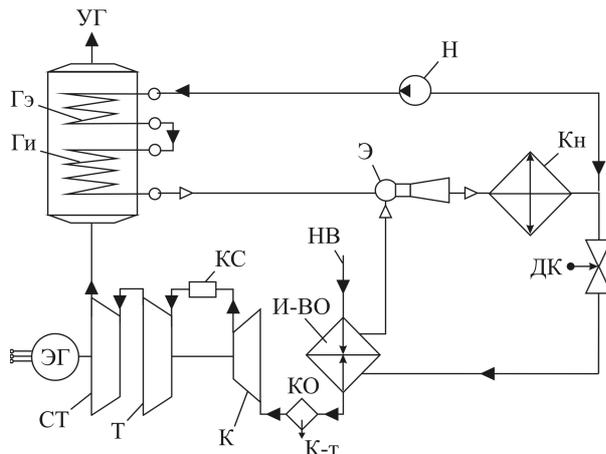


Рис. 2. Схема ГТУ с ТЭХМ, использующей теплоту уходящих газов для охлаждения воздуха на входе: К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; СТ – силовая турбина; ЭГ – электрогенератор; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; Г<sub>э</sub> и Г<sub>и</sub> – экономайзерная и испарительная секции генератора пара НРТ; Э – эжектор; Кн – конденсатор НРТ; Н – насос; ДК – дрессельный клапан; КО – конденсато-отводчик; К-т – конденсат; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

С целью упрощения в схеме на рис. 2 контур пароводяного или водяного утилизационного котла (УК), к которому подключается генератор паров НРТ, опущен, а генератор ТЭХМ показан на уходящих газах. В действительности теплота уходящих газов используется сначала для получения водяного пара или горячей воды в УК, а уже их теплота расходуется в генераторе ТЭХМ на испарение НРТ при 100...120 °С.

Эффективность эжектора характеризуется коэффициентом эжекции  $U = G_0/G_r$ , где  $G_0$  и  $G_r$  – расходы НРТ через И-ВО (всасываемый НРТ низкого давления) и генератор (силовой НРТ высокого давления), а ТЭХМ – тепловым коэффициентом  $\zeta$ , представляющим собой отношение холодопроизводительности  $Q_0$  (теплоты, отведенной от воздуха на

входе ГТУ к НРТ, кипящему в И-ВО) к теплоте  $Q_r$ , подведенной в генераторе к кипящему НРТ высокого давления от уходящих газов:  $\zeta = Q_0/Q_r$ . Коэффициенты  $U$  и  $\zeta$  зависят от параметров цикла ТЭХМ, увеличиваясь с повышением температур кипения НРТ в генераторе  $t_r$  (рис. 3) и И-ВО  $t_0$  и снижением температуры конденсации  $t_k$ .

Исходя из теплоты, отводимой от уходящих газов  $Q_r$  и значения  $\zeta$  определяют холодопроизводительность ТЭХМ  $Q_0 : Q_0 = \zeta Q_r$ , где  $Q_r = G_{yr} \cdot c_{yr} (t_{yr1} - t_{yr2})$ . Температура уходящих газов  $t_{yr1}$  после ГТУ около 500 °С. Температуру уходящих газов  $t_{yr2}$  после отвода от них теплоты в ТЭХМ принимают 100 °С.

Снижение температуры воздуха в И-ВО  $\Delta t_b = t_{b1} - t_{b2}$  находят из теплового баланса:  $Q_0 = G_b \cdot c_b (t_{b1} - t_{b2}) \xi$ , где  $c_b$  – теплоемкость влажного воздуха;  $\xi$  – коэффициент влаговыпадения представляет собой отношение полного количества теплоты (разности энтальпий воздуха на входе и выходе из И-ВО), отведенной от влажного воздуха в И-ВО (холодопроизводительности ТЭХМ  $Q_0$ , к количеству явной теплоты, определяемому разностью температур по сухому термометру:

$$\xi = Q_0 / [G_b \cdot c_b (t_{b1} - t_{b2})].$$

Значения удельных, приходящихся на единицу расхода газов (воздуха) теплоты, отведенной от уходящих газов в генераторе ТЭХМ  $\bar{q}_a$ , и холодопроизводительности ТЭХМ  $\bar{q}_0$ , снижения температуры  $\Delta t_b$  воздуха в И-ВО ТЭХМ, коэффициентов  $U$  и  $\zeta$  в зависимости от температуры  $t_r$  кипения НРТ в генераторе при  $\xi = 1,0; 2,0; 2,5$  и  $3,0$  и температурах кипения R142b в испарителе  $t_0 = 0$  и  $5$  °С приведены на рис. 3. В качестве НРТ в ТЭХМ применен хладон R142b.

Как видно, при  $t_r = 120$  °С снижение температуры  $\Delta t_b$  воздуха в И-ВО наибольшее и составляет при  $t_0 = 5$  °С:  $\Delta t_b = 30, 35, 43$  и  $75$  °С при  $\xi = 3,0; 2,5; 2,0$  и  $1,0$  соответственно (рис. 3, а), а при  $t_0 = 0$  °С:  $\Delta t_b = 25, 30, 35$  и  $65$  °С (рис. 3, б). Чем больше  $\xi$ , тем больше теплоты необходимо отвести от влажного воздуха на конденсацию водяных паров и, следовательно, снижение его температуры  $\Delta t_b$  меньше. Величина  $\xi = 1$  соответствует охлаждению без влаговыпадения.

Условия эксплуатации ГТУ характеризуются суточными и сезонными колебаниями температуры  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi_{нв}$  наружного воздуха на входе, что влияет на глубину охлаждения воздуха в И-ВО на входе ГТУ, соответственно и на термодинамическую эффективность ГТУ ( $KПД$  и  $b_c$ ). Изменение температуры  $t_{нв}$ , относительной влажности  $\phi_{нв}$  и влагосодержания  $d_{нв}$  наружного воздуха в течение 1.07...15.07.2009 в Триполи (Ливия) представлено на рис. 4.

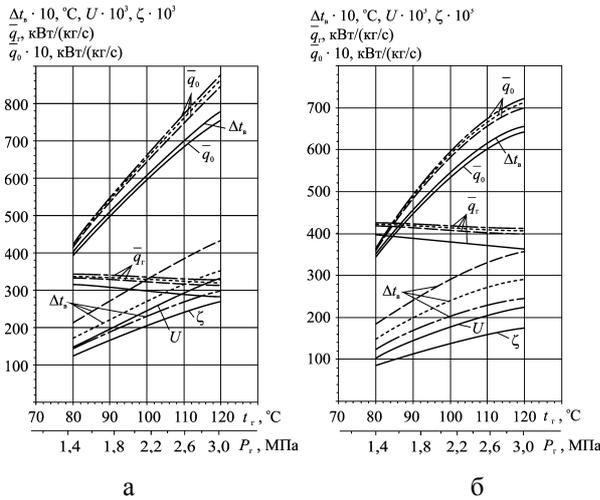


Рис. 3. Удельные теплота, отведенная от уходящих газов в генераторе ТЭХМ  $\bar{q}_a$ , и холодопроизводительность ТЭХМ  $\bar{q}_0$ , снижение температуры  $\Delta t_b$  воздуха в И-ВО ТЭХМ в зависимости от температуры  $t_r$  и давления  $P_r$  кипения R142b в генераторе при коэффициентах влаговываждения  $\xi$ :  
 —  $\xi = 1,0$ ; - - -  $\xi = 2,0$ ; - - -  $\xi = 2,5$ ;  
 - · - · -  $\xi = 3,0$ ; а -  $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б -  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

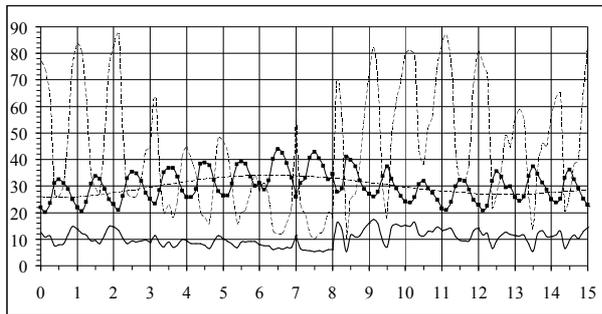


Рис. 4. Изменение температуры  $t_{нв}$ , относительной влажности  $\phi_{нв}$  и влажностности  $d_{нв}$  наружного воздуха в течение 1.07...15.07.2009:  
 —■—  $t_{нв}$ ; - - -  $\phi_{нв}$ ; —  $d_{нв}$

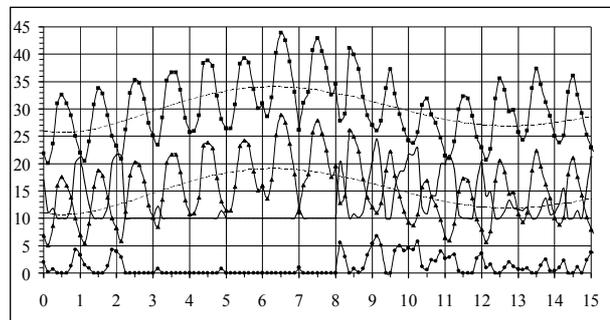
Как видно, колебания температуры  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi$  наружного воздуха в течение суток характеризуются наличием дневных и ночных противоположно направленных экстремумов  $t_{нв}$  и  $\phi_{нв}$ : максимумам температур соответствуют минимумы влажности днем и наоборот ночью. Их существование создает благоприятные условия для большего снижения температуры воздуха на входе ГТУ днем (благодаря меньшей относительной влажности  $\phi_{нв}$ ), когда имеет место значительное ухудшение термодинамической эффективности ГТУ из-за повышенных температур  $t_{нв}$ . В ночное же время, когда потребность в охлаждении воздуха на входе ГТУ меньше (ниже  $t_{нв}$ ), меньше и снижение температуры воздуха в И-ВО ТЭХМ из-за повы-

шенных затрат холода на конденсацию водяных паров (при большей влажности  $\phi$ ).

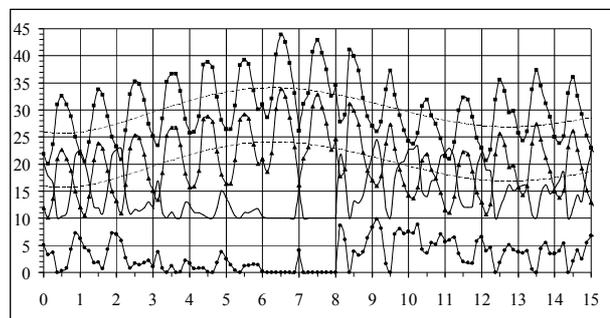
При температуре кипения R142b в И-ВО  $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  с учетом минимальной разности температур между охлажденным воздухом и  $t_0$ :  $t_{b2} - t_0 = 8...10 \text{ }^\circ\text{C}$ , глубина охлаждения воздуха ограничивается температурой  $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , а при  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  — соответственно  $t_{b2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Значения снижения температуры воздуха  $\Delta t_b$  и его влажностности  $\Delta d$ , коэффициента влаговываждения  $\xi$  процессов охлаждения воздуха в И-ВО ТЭХМ от текущей  $t_{нв}$  до  $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  (при  $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и  $t_{b2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  (при  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в течение 1.07...14.07.2009 приведены на рис. 5.

Как видно, процессы охлаждения воздуха в И-ВО на входе ГТУ от текущей  $t_{нв}$  до  $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  (при  $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) происходят в основном при значениях коэффициента влаговываждения  $\xi$  не превышающих 2,0 и с понижением температуры на величину  $\Delta t_b = 20...25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Согласно рис. 3 при  $\xi \approx 2$  ТЭХМ в состоянии обеспечивать охлаждение воздуха на величину  $\Delta t_b = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , что намного больше значений  $\Delta t_b = 20...25 \text{ }^\circ\text{C}$ , требуемых при  $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . При снижении  $t_0$ , к примеру до  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , соответственно и  $t_{b2}$  до  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , глубина охлаждения также увеличится на  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  по сравнению с  $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 5, б).



а



б

Рис. 5. Значения снижения температуры воздуха  $\Delta t$  и его влажностности  $\Delta d$ , коэффициента влаговываждения  $\xi$  в охладителе ТЭХМ на входе ТК с изменением температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  (1.07...14.07.2009): а -  $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б -  $t_{b2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 —■—  $t_{нв}$ ; —▲—  $\Delta t_b$ ; —●—  $\Delta d_b$ ; —  $\xi \cdot 10$

Охлаждение воздуха на входе ГТУ на 20...30 °С обеспечивает сокращение удельного расхода топлива  $b_e$  на 4...6 % и соответственно повышение КПД (рис. 2).

### Выводы

Использование теплоты уходящих газов для охлаждения воздуха на входе ГТУ с помощью ТЭХМ обеспечивает снижение температуры воздуха на 20...30 °С, что позволяет сократить удельный расход топлива  $b_e$  на 4...6 % и соответственно повысить КПД.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований по Гранту Президента Украины (проект № GP/F32/152).*

### Литература

1. Bhargava, R. *Parametric analysis of existing gas turbines with inlet evaporative and overspray fogging [Text]* / R. Bhargava, C.B. Meher-Homji // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2002-30560. – 15 p.*
2. Bhargava, R. *Parametric analysis of combined cycles equipped with inlet fogging [Text]* / R. Bhargava, M. Bianchi, F. Melino, A. Peretto // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2003-38187. – 12 p.*
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.*
4. *Planning Electrical Power System Studies for Libya [Text] (Demand Forecasting & Generation Expansion Planning until 2025) //Final Report, 2008: General People's Committee of Electricity, Water & Gas (GPCoEWG), ICEPCO, 2008. – 193 p.*

*Поступила в редакцию 5.10.2011*

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

## ОХОЛОЖДЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ У КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ЛІВІЇ

*М.І. Радченко, Рамі Елгербі*

Проаналізована ефективність використання тепла відхідних газів газотурбінних двигунів для охолодження повітря на вході тепловикористовуючою ежекторною холодильною машиною на низькокиплячому робочому тілі, яка включає силовий і холодильний контури. Показана залежність теплового коефіцієнта та коефіцієнта ежекції, питомої холодопродуктивності холодильної машини та досяжного зниження температури повітря від температури кипіння низькокиплячого робочого тіла в силовому контурі машини. Значення зниження температури повітря на вході газотурбінних двигунів розраховані з урахуванням зміни кліматичних умов експлуатації.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, охолодження повітря, тепловикористовуюча ежекторна холодильна машина, відхідний газ, температура, вологість повітря.

## COOLING THE INTAKE AIR OF GAS TURBINE ENGINES BY UTILIZING THE HEAT OF EXHAUST GASES FOR CLIMATIC CONDITIONS IN LIBIA

*N.I. Radchenko, Rami Elgerbi*

The efficiency of utilizing the heat of exhaust gases from gas turbine engines to cool the air at the inlet by waste heat recovery ejector cooling machine on low boiling working fluid that includes power and cooling contours was analyzed. It was shown the dependence of heat coefficient and coefficient of ejection, specific refrigeration capacity of waste heat recovery cooling machine and air temperature decrease from boiling temperature of low boiling working fluid in the power contour of machine. The values of air temperature drop at the inlet of gas turbine engines for changeable climate conditions of the performance were calculated.

**Keywords:** gas turbine engine, cooling of air, waste heat recovery ejector refrigeration machine, exhaust gas, temperature, humidity of air.

**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.

**Ельгерби Рами** – аспирант Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, e-mail: andrad69@mail.ru.