

Б. С. ПОРТНОЙ

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ З ВИЗНАЧЕННЯМ ЙОГО РАЦІОНАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ В ПОВІТРООХОЛОДЖУВАЧІ**

Запропоновано визначення раціональної швидкості потоку повітря через повітроохолоджувачі ступінчастої тепловикористовуючої абсорбційно-ежекторної холодильної машини, що утилізує теплоту відпрацьованих газів газотурбінної установки для охолодження повітря на вході, шляхом комп'ютерного моделювання процесів обробки повітря. Оскільки результат від охолодження повітря залежить від ефективності роботи повітроохолоджувачів на вході газотурбінної установки, то запропоновано визначати його у вигляді збільшення питомої економії палива, яка враховує як глибину охолодження (величина зниження температури) повітря, так і аеродинамічний опір повітроохолоджувача, який суттєво впливає на ефективність роботи апаратів охолодження. На прикладі охолодження повітря на вході газотурбінної установки проаналізовано значення питомої економії палива за рахунок охолодження повітря на вході до температури 10 °С – в двоступеневій абсорбційно-ежекторній тепловикористовуючій холодильній машині, в залежності від раціональної швидкості потоку повітря через апарати охолодження (повітроохолоджувачі). Проаналізовано ефективність роботи повітроохолоджувачів при різних швидкостях потоку повітря.

Показано, що виходячи з різного темпу нарощування питомої економії палива, обумовленого зміною швидкості потоку повітря через повітроохолоджувачі холодильних машин, необхідно обирати таку проектну (раціональну) швидкість потоку повітря, яка забезпечує досягнення максимального або близького до максимального збільшення питомої економії палива при відносно високих темпах його нарощування. З метою визначення встановленої швидкості потоку повітря через повітроохолоджувачі, яка забезпечує максимальне нарощування питомої економії палива, проаналізовано залежність прирощення питомої економії палива від швидкості потоку повітря. За результатами моделювання процесів охолодження повітря на вході газотурбінної установки, з використанням програмного забезпечення фірм, що виробляють теплообмінне обладнання, запропоновано визначення раціональної швидкості потоку повітря через повітроохолоджувачі, яка забезпечує близьку до максимальної питомої економії палива при відносно високих темпах її нарощування.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, холодильна машина, швидкість повітря, двоступеневе охолодження повітря, питома економія палива, газотурбінна установка.

**1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження**

Одним з основних напрямків підвищення паливної ефективності газотурбінних установок (ГТУ) є охолодження повітря на вході ГТУ тепловикористовувачими холодильними машинами (ТХМ), що утилізують скидку теплоту відпрацьованих газів. Однак більшість досліджень присвячена спекотним кліматичним умовам, в яких значний ефект досягається при зниженні температури повітря на вході ГТУ до 15 °С [1, 2], чого для помірного клімату України недостатньо.

В роботі [3] показано, що для кліматичних умов експлуатації ГТУ Південно-Бузької компресорної станції (потужність ГТУ  $N_e = 10$  МВт) (м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл., 2015 р.) при охолодженні повітря на вході ГТУ до температури

$t_{в2} = 10$  °С питомому (що припадає на одиничну витрату повітря  $G_n = 1$  кг/с) проектному тепловому навантаженню двоступеневого повітроохолоджувача (ПО)  $q_0 = 34$  кВт/(кг/с) відповідає практично максимальна річна економія палива  $B_{т.10}$ . Це питома теплове навантаження  $q_0 = 34$  кВт/(кг/с) приймають за раціональне і виходячи з нього проектують двоступеневий ПО, а також обирають повну встановлену холодопродуктивність ТХМ у відповідності з витратою повітря  $G_n$  через ГТУ:  $Q_0 = G_n \cdot q_0$ .

Однак, зазвичай питання ефективності роботи ПО з урахуванням швидкості потоку повітря, залишається невирішеним.

**Мета** дослідження – аналіз ефективності роботи повітроохолоджувачів на вході ГТУ при різних швидкостях потоку повітря, за результатами комп'ютерного моделювання.

## 2. Результати дослідження

Провідні фірми-виробники теплообмінного обладнання (Alfa Laval, Guentner) [4, 5] розробляють програми для вибору ПО, а не для моделювання їх роботи при різних кліматичних умовах. Тому був розроблений алгоритм, що дозволяє підготувати вихідні дані для використання зазначених програм і обробляти результати розрахунків ПО (рис. 1).

Поточні кліматичні умови визначались за програмою "Meteomanz" [6], доступною в режимі "online".

Ефективність охолодження повітря на вході ГТУ доцільно оцінювати питомою економією палива  $\Delta b_e, \text{°г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ , яка представляє собою різницю охолодження повітря  $\Delta b_{et}, \text{°г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$  та його витрати на подолання аеродинамічного опору ПО  $\Delta b_{eP}, \text{°г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ . Для визначення оптимальної швидкості повітря в ПО необхідно проаналізувати залежність питомої економії палива  $\Delta b_e$  від неї.

Питома економія палива розраховується як  $\Delta b_e = \Delta b_{et} - \Delta b_{eP} = \Delta t \cdot b_{et} - \Delta P \cdot b_{eP}, \text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ , де  $\Delta t$  – різниця температур повітря на вході та виході ПО,  $\text{°C}$ ;  $b_{et}$  – коефіцієнт питомої економії палива, при охолодженні повітря на  $1\text{°C}$ ,  $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{год}\cdot\text{°C})$ ;  $\Delta P$  – аеродинамічний опір ПО, Па;  $b_{eP}$  – коефіцієнт питомої витрати палива, при подоланні опору в 1 Па,  $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{год}\cdot\text{Па})$ .

На рис. 2 представлено результати комп'ютерного моделювання роботи ПО з різною швидкістю потоку повітря, при постійній температурі  $t_{\text{вв}}$  та відносній вологості  $\varphi_{\text{вв}}$  зовнішнього повітря, а також з однаковою загальною витратою повітря  $G_{\text{п}} = 40 \text{ кг/с}$ , з урахуванням кількості ПО.

Як видно з результатів комп'ютерного моделювання (рис. 2) складова загальної питомої економії палива  $\Delta b_e$ , яка враховує охолодження повітря  $\Delta b_{et}$ , практично не змінна. В свою чергу, складова, яка відображає витрату палива на подолання аеродинамічного опору  $\Delta b_{eP}$  повітроохолоджувача, поступово зростає з ростом швидкості повітря. Очевидно, що цей висновок можна констатувати як для високотемпературного ступеня повітроохолоджувача ПО<sub>ВТ</sub>, так і для низькотемпературного ступеня ПО<sub>НТ</sub>, а разом з ними і загалом для всього двоступеневого повітроохолоджувача, отримані результати не залежать від температурного режиму охолодження. Для даної ланки швидкостей при охолодженні повітря на вході газотурбінної установки до температури  $t_{\text{в2}}$  при швидкості повітря  $w \approx 3,2 \text{ м/с}$  показники загальної питомої економії палива  $\Delta b_e$  складають  $13,5 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$  при високих темпах її нарощу-

вання. Через падіння темпу нарощування  $\Delta b_e$  після  $w \approx 3,2 \text{ м/с}$  не відбувається значного нарощування  $\Delta b_e$ . А подальше зменшення швидкості повітря призводить до збільшення кількості повітроохолоджувачів, що призводить до непродуктивних капітальних витрат. Швидкість повітря  $w \approx 3,2 \text{ м/с}$  приймають за раціональну і, виходячи з неї, проектують повітроохолоджувачі.

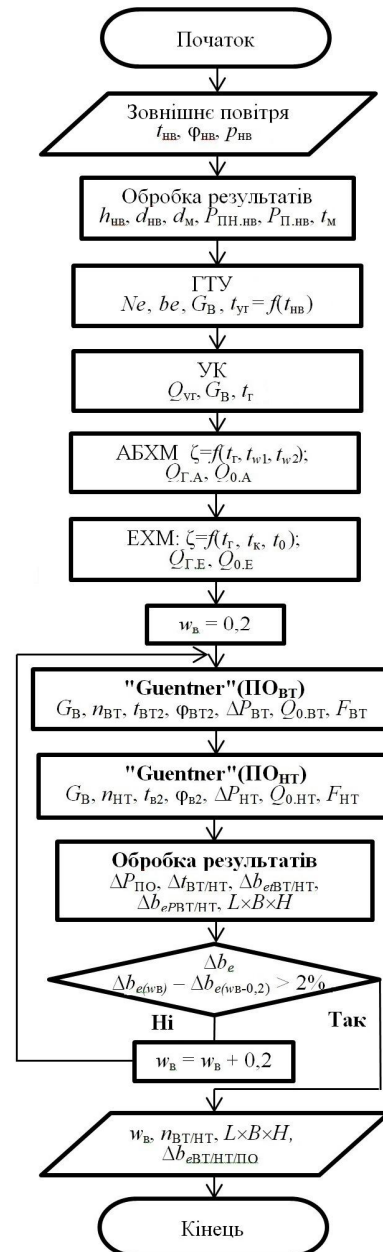


Рис. 1. Алгоритм розрахунку процесів охолодження повітря на вході ГТУ при різних швидкостях повітря; УК – утилізаційний котел; АБХМ – абсорбційна бромистолітєва холодильна машина; ЕХМ – ежекторна хладонова холодильна машина; ПО<sub>ВТ</sub> – високотемпературний ступінь двоступеневого ПО (складова частина АБХМ); ПО<sub>НТ</sub> – низькотемпературний ступінь двоступеневого ПО (складова частина ЕХМ)

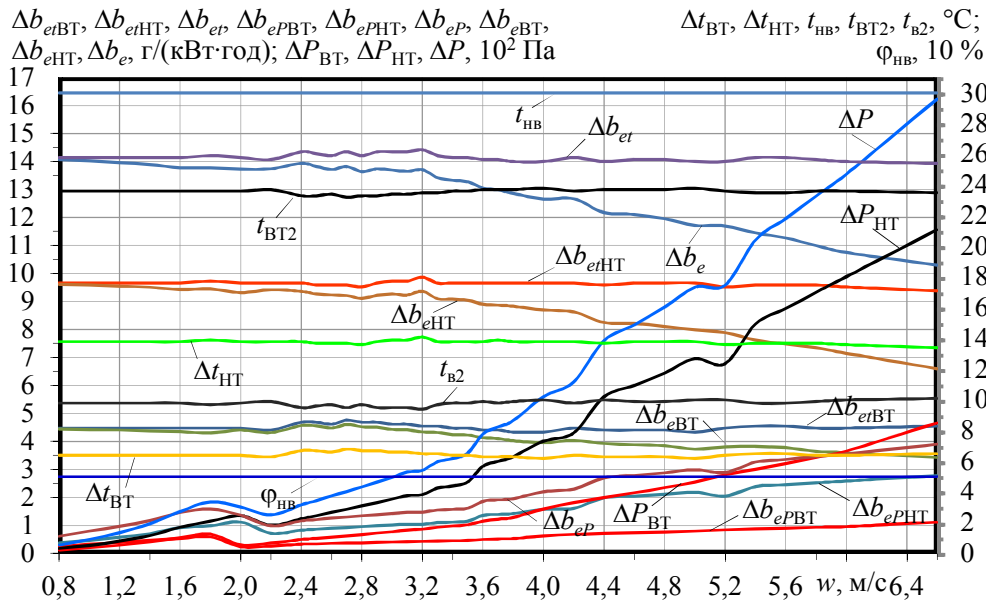


Рис. 2. Поточні значення температури  $t_{нв}$  та відносної вологості  $\phi_{нв}$  зовнішнього повітря, температури повітря  $t_{вТ2}$  на виході з ПО<sub>вТ</sub> та  $t_{вНТ}$  – з ПО<sub>нТ</sub>, перепад температури повітря на ПО<sub>вТ</sub> –  $\Delta t_{вТ}$ , на ПО<sub>нТ</sub> –  $\Delta t_{вНТ}$ , питомої (на 1кВт потужності ГТУ) економії палива  $\Delta b_{et}$  за рахунок охолодження повітря на вході ГТУ на 1°C, питомої (на 1кВт потужності ГТУ) витрати палива  $\Delta b_{eP}$  на подолання 1Па опору ПО,  $\Delta b_e$  – загальної питомої (на 1кВт потужності ГТУ) економії палива ГТУ,  $\Delta P$  – аеродинамічного опору ПО для високотемпературного ПО<sub>вТ</sub>, низькотемпературного ПО<sub>нТ</sub> ступенів та двоступеневого ПО:

$\Delta b_{eBT}$ ,  $\Delta b_{eHT}$  та  $\Delta b_{et}$  – для ПО<sub>вТ</sub>, ПО<sub>нТ</sub> та загалом ПО;  $\Delta b_{ePBT}$ ,  $\Delta b_{ePHТ}$  та  $\Delta b_{eP}$  – для ПО<sub>вТ</sub>, ПО<sub>нТ</sub> та загалом ПО;  $\Delta b_{eBT}$ ,  $\Delta b_{eHT}$  та  $\Delta b_e$  – для ПО<sub>вТ</sub>, ПО<sub>нТ</sub> та загалом ПО;  $\Delta P_{вТ}$ ,  $\Delta P_{вНТ}$  та  $\Delta P$  – для ПО<sub>вТ</sub>, ПО<sub>нТ</sub> та загалом ПО; проектні  $q_{0,вТ}=10$  кВт/(кг/с);  $q_{0,нТ}=24$  кВт/(кг/с);  $q_0=34$  кВт/(кг/с)

Для підтвердження результатів розрахунку було проведено комп’ютерне моделювання процесів охолодження повітря при змінних кліматичних умовах, завдяки якому були отримані залежності сумарної по нарощенню економії палива для різних співвідношень питомого теплового навантаження на ступені ПО ( $q_{0,вТ}$ ,  $q_{0,нТ}$ ), зі збереженням загального питомого теплового навантаження  $q_0 = 34$  кВт/(кг/с) на двоступеневий ПО, які представлені на рис. 3.

В результаті порівняння даних (рис. 3) моделювання різних (3,2 м/с та 6 м/с) швидкостей потоку повітря крізь ПО, підтверджено раціональну швидкість  $\approx 3,2$  м/с, при такому варіанті спостерігається значне падіння аеродинамічного опору  $\Delta P$  повітроохолоджувача до 80 %, що приводить до збільшення питомої економії палива  $b_e$  до 20 %.

### Висновки

Виходячи з результатів комп’ютерного моделювання, проаналізовано ефективність роботи повітроохолоджувачів на вході ГТУ при різних швидкостях потоку повітря.

Визначено раціональну швидкість потоку повітря. Показано, що при обраній швидкості потоку повітря, досягаються оптимальні показники економії палива.

### Література

1. Popli, S. Trigeneration scheme for energy efficiency enhancement in a natural gas processing plant through turbine exhaust gas waste heat utilization [Text] / Sahil Popli, Peter Rodgers, Valerie Evely // Applied Energy. – 2012. – № 93. – P. 623–636.
2. Popli, S. Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry [Text] / Sahil Popli, Peter Rodgers, Valerie Evely // Applied Thermal Engineering. – 2013. – № 50. – P. 918–931.
3. Радченко, А. Н. Метод выбора рациональной тепловой нагрузки абсорбционно-эжекторного термотрансформатора охлаждения воздуха на входе регенеративных ГТУ компрессорных станций [Текст] / А. Н. Радченко, С. А. Кантор // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 5(122). – С. 61–64.
4. Alfa Laval [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alfalaval.ru>: Palladio. – 05.05.2018.
5. Hans Güntner GmbH [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.guentner.de>: Güntner Product Calculator. – 05.05.2018.
6. Meteomanz [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.meteomanz.com>: – 05.05.2018.

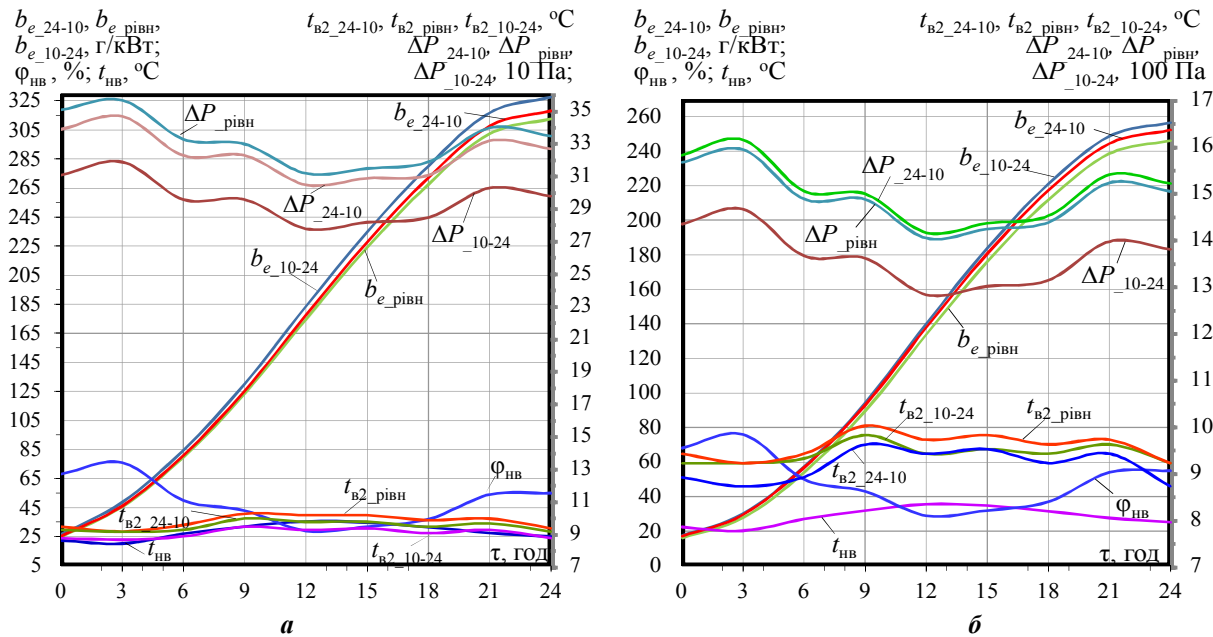


Рис. 3. Поточні значення для температури зовнішнього повітря  $t_{\text{в2}}$  на вході в високотемпературний ступінь охолодження повітря ПО<sub>ВТ</sub>, відносної вологості зовнішнього повітря на вході  $\phi_{\text{вв}}$ , для розрахунку при питомому тепловому навантаженні ПО<sub>ВТ</sub>  $q_{0,\text{ВТ}} \approx 24$  кВт/(кг/с), ПО<sub>НТ</sub>  $q_{0,\text{НТ}} \approx 10$  кВт/(кг/с): сумарної по нарощенню економії палива  $b_{e,24-10}$ , (на 1 кВт потужності ГТУ), аеродинамічного опору ПО  $\Delta P_{24-10}$ , на виході з ПО<sub>НТ</sub>  $t_{\text{в2},24-10}$ ; для розрахунку при питомому тепловому навантаженні  $q_{0,\text{ВТ}} \approx q_{0,\text{НТ}}$ : сумарної по нарощенню економії палива  $b_{e,\text{рівн}}$ , (на 1 кВт потужності ГТУ), аеродинамічного опору ПО  $\Delta P_{\text{рівн}}$ , на виході з ПО<sub>НТ</sub>  $t_{\text{в2},\text{рівн}}$ ; для розрахунку при питомому тепловому навантаженні ПО<sub>ВТ</sub>  $q_{0,\text{ВТ}} \approx 10$  кВт/(кг/с), ПО<sub>НТ</sub>  $q_{0,\text{НТ}} \approx 24$  кВт/(кг/с): сумарної по нарощенню економії палива  $b_{e,10-24}$ , (на 1 кВт потужності ГТУ), аеродинамічного опору ПО  $\Delta P_{10-24}$ , на виході з ПО<sub>НТ</sub>  $t_{\text{в2},10-24}$ , протягом 8.07.2015 для кліматичних умов м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл.; **a** – швидкість потоку повітря 3,2 м/с; **б** – швидкість потоку повітря 6 м/с.

## References

1. Popli, Sahil., Rodgers, Peter., Eveloy, Valerie. Trigeneration scheme for energy efficiency enhancement in a natural gas processing plant through turbine exhaust gas waste heat utilization. *Applied Energy*, 2012, no. 93, pp. 623–636.
2. Popli, Sahil., Rodgers, Peter., Eveloy, Valerie. Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry. *Applied Thermal Engineering*, 2013, no. 50, pp. 918–931.
3. Radchenko, A. N., Kantor, S. A. Metod vybora ratsional'noy teplovoy nagruzki absorbtionno-zhektornogo termotransformatora okhlazhdeniya

- vozdukha na vkhode regenerativnykh GTU kompresornykh stantsiy [The method of evaluation of rational heat load on absorption-ejector thermotransformer for cooling regenerative gtu intake air of compressor stations]. *Avitsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2015, no. 5 (122), pp. 61–64.
4. Alfa Laval. Available at: <https://www.alfalaval.ru>; Palladio (accessed 05.05.2018).
  5. Hans Guntner GmbH. Available at: <http://www.guentner.de>; Guntner Product Calculator. (accessed 05.05.2018).
  6. Meteomanz. Available at: <http://www.meteomanz.com>. (accessed 05.05.2018).

Поступила в редакцію 12.07.2018, рассмотрена на редколлегии 12.09.2018

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ РАЦИОНАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВОЗДУХА В ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕ

**Б. С. Портной**

Предложено определение рациональной скорости потока воздуха через воздухоохладители ступенчатой теплоиспользующей абсорбционно-эжекторной холодильной машины, утилизирующей теплоту отработавших газов газотурбинной установки, для охлаждения воздуха на входе, путём компьютерного моделиро-

вания процессов обработки воздуха. Поскольку результат от охлаждения воздуха зависит от эффективности работы воздухоохлаждателей на входе газотурбинной установки, то предложено определять его в виде увеличения удельной экономии топлива, которая учитывает как глубину охлаждения (величина снижения температуры) воздуха, так и аэродинамическое сопротивление воздухоохлаждателя, которое существенно влияет на эффективность работы аппаратов охлаждения. На примере охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки проанализировано значение удельной экономии топлива за счёт охлаждения воздуха на входе до температуры 10 °С – в двухступенчатой абсорбционно-эжекторной теплоиспользующей холодильной машине, в зависимости от рациональной скорости потока воздуха через аппараты охлаждения (воздухоохладители). Проанализирована эффективность работы воздухоохлаждателей при различных скоростях потока воздуха.

Показано, что исходя из различного темпа приращения удельной экономии топлива, обусловленного изменением скорости потока воздуха через воздухоохлаждатели холодильных машин, необходимо выбирать такую проектную (рациональную) скорость потока воздуха, которая обеспечивает достижение максимального или близкого к максимальному увеличению удельной экономии топлива при относительно высоких темпах её приращения. С целью определения установленной скорости потока воздуха через воздухоохладители, которая обеспечивает максимальное приращение удельной экономии топлива, проанализирована зависимость приращения удельной экономии топлива от скорости потока воздуха. По результатам моделирования процессов охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки, с использованием программного обеспечения фирм, которые производят теплообменное оборудование, предложено определение рациональной скорости потока воздуха через воздухоохладители, которая обеспечивает близкую максимальной удельную экономию топлива при относительно высоких темпах её приращения.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, холодильная машина, скорость воздуха, двухступенчатое охлаждение воздуха, удельная экономия топлива, газотурбинная установка.

#### COMPUTER SIMULATION OF AIR COOLING PROCESSES AT THE INLET OF THE GAS TURBINE UNIT WITH THE DETERMINATION OF THE RATIONAL AIR VELOCITY IN AIR COOLER

*B. S. Portnoi*

It is proposed to determine the rational velocity of air flow through the air coolers of a stepped a waste heat-recovery absorption-ejector chiller utilizing the heat of exhaust gases of a gas turbine unit to cool the air at the inlet, by computer simulation of air processes processing. Whereas the result of air cooling depends on the efficiency of the air coolers at the inlet of the gas turbine unit, it is proposed to determine it as an increase in the specific fuel economy, which consider both the cooling depth (the magnitude of the temperature decrease) of the air and the air resistance of the air cooler, which significantly affects the efficiency of operation cooling devices. On the example of air cooling at the inlet of a gas turbine unit has been analyzed the value of specific fuel economy by cooling the air at the inlet to a temperature of 10 °С in a two-stage absorption-ejector chiller, depending on the rational airflow rate through the cooling units (air coolers). The efficiency of the air coolers at different air flow rates has been analyzed.

It is shown that proceeding from the different rate of increment in the specific fuel economy caused by the change in the rational velocity of air flow through the air coolers of chillers, it is necessary to choose a design (rational) the rational velocity of air flow that ensures the achievement of a maximum or close to the maximum increase in the specific fuel economy at relatively high rates increments. In order to determine the established the rational velocity of air flow through the air coolers, which provides the maximum increment of the specific fuel economy, the dependence of the increment of the specific fuel economy on the airflow velocity is analyzed. Based on the results of modeling air cooling processes at the inlet of the gas turbine unit, using software from firms that produce heat exchange equipment, it is proposed to determine the rational velocity of air through the air coolers, which ensures a close maximum specific fuel economy at relatively high rates of its increment.

**Keywords:** computer simulation, chiller, velocity of air flow, two-stage air cooling, specific fuel economy, gas turbine unit.

**Портной Богдан Сергійович** – аспірант Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: bodya1184@yandex.ru.

**Portnoi Bohdan Sergeevich** – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: bodya1184@yandex.ru.