

УДК 621.438-716

Р. Н. РАДЧЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина

## ПОЛУЧЕНИЕ КОНДЕНСАТА КАК СОПУТСТВУЮЩЕГО ПРОДУКТА ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Исследовано получение конденсата как сопутствующего продукта охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки трансформацией в холод сбросной теплоты отработавших газов. Получены данные по расходам и температуре конденсата, отводимого в процессе тепловлажностной обработки воздуха за разные промежутки времени, которые свидетельствуют о целесообразности его использования в качестве хладоносителя. Предложен способ рациональной организации процессов с двухступенчатым охлаждением воздуха и применением холодной воды и кипящего хладона в качестве хладоносителей, что обеспечивает получение конденсата с большей разницей температур по сравнению с одноступенчатым охлаждением.

**Ключевые слова:** конденсат, хладагент, воздух, охлаждение, сопутствующий продукт.

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Охлаждение воздуха на входе ГТУ при высоких температурах наружного воздуха  $t_{нв}$  – перспективное направление повышения их термодинамической эффективности. Для охлаждения воздуха целесообразно применять теплоиспользующие холодильные машины (ТХМ), трансформирующие в холод теплоту отработавших газов [1–3].

В процессе охлаждения воздуха в результате конденсации содержащихся в нем водяных паров образуется конденсат. Представляется целесообразным использование его охлаждающего потенциала для охлаждения воздуха.

**Цель исследования** – анализ охлаждающего потенциала конденсата и особенностей его получения в процессах охлаждения воздуха на входе ГТУ.

### 2. Результаты исследования

Схема двухступенчатого охлаждения воздуха на входе ГТУ показана на рис. 1.

Сократить потребление теплоты можно с помощью ТХМ комбинированного типа, в которых высокоэффективные абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ) используют в качестве высокотемпературной ступени  $ВО_{ВТ}$  охлаждения воздуха от текущей  $t_{нв}$  до  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ , а менее эффективные эжекторные (ЭХМ) – как низкотемпературную ступень  $ВО_{НТ}$  охлаждения воздуха после АБХМ до  $t_{в2} = 7...10^\circ\text{C}$  [3].

О количестве и температуре конденсата, получаемого в процессе охлаждения воздуха на входе ГТУ UGT 10000 производства ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект" (мощность  $N_e = 10$  МВт, расход воздуха 40 кг/с) в двухступенчатом ВО при проектных тепловых нагрузках ступеней охлаждения  $Q_{0,ВТ} = 400$  кВт,  $Q_{0,НТ} = 960$  кВт/(кг/с) и суммарной тепловой нагрузке двухступенчатого ВО  $Q_0 = 1360$  кВт для климатических условий г. Южноукраинск, Николаевская обл. (8.07.2015) можно судить по рис. 2.

Как видно, в течение суток имеют место два локальных максимума текущих расходов высокотемпературного  $V_{ВТ}$  и низкотемпературного  $V_{НТ}$  конденсата примерно около 9 и 21 час. При этом максимумы более резко выражены для низкотемпературного конденсата  $V_{НТ}$  в  $ВО_{НТ}$  по сравнению с высокотемпературным конденсатом  $V_{ВТ}$  в  $ВО_{ВТ}$  вследствие больших проектных  $Q_{0,НТ} = 960$  кВт/(кг/с) и заниженных  $Q_{0,ВТ} = 400$  кВт, соответственно и поверхностей  $ВО_{ВТ}$  и  $ВО_{НТ}$ . Подтверждением этого являются повышенные температуры воздуха на выходе  $ВО_{ВТ}$   $t_{в2} = 20...26^\circ\text{C}$ , что значительно выше  $15^\circ\text{C}$  для АБХМ.

Количество конденсата, полученного в процессе охлаждения воздуха в двухступенчатом ВО на входе ГТУ UGT 10000 производства ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект" (мощность  $N_e = 10$  МВт, расход воздуха 40 кг/с) в течение суток, составляет  $16\text{ м}^3$ , а в его высоко- и низкотемпературных ступенях  $ВО_{ВТ}$  и  $ВО_{НТ}$  соответственно 4 и  $12\text{ м}^3$ . Расчеты показали, что при изменении соотношения проектных тепловых нагрузок  $Q_{0,ВТ}$  на  $ВО_{ВТ}$  (увеличении) и  $Q_{0,НТ}$

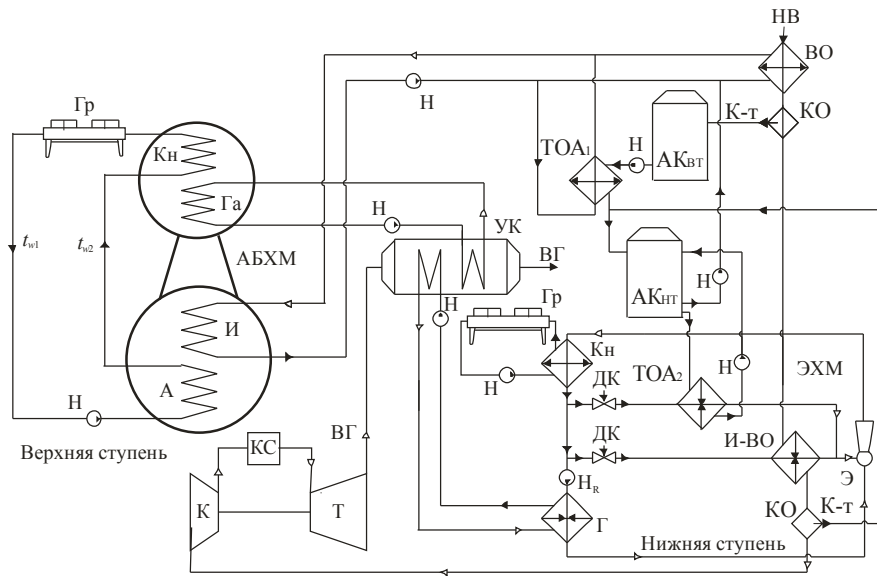


Рис. 1. Схема системы двухступенчатого охлаждения воздуха на входе ГТУ: К – компрессор; Т – турбина; КС – камера сгорания; УК – утилизационный котел; Гр – градирня; ВО – воздухоохладитель водяного охлаждения (ВО<sub>ВТ</sub>); И-ВО – испаритель хладона-воздухоохладитель (ВО<sub>НТ</sub>); КО – каплеотделитель; К-т – конденсат; АК<sub>ВТ</sub> и АК<sub>НТ</sub> – аккумуляторы высоко- и низкотемпературного конденсата; ТОА<sub>1</sub> и ТОА<sub>2</sub> – теплообменные аппараты; Га – генератор; Кн – конденсатор; И – испаритель; А – абсорбер; Э – эжектор; Г – генератор; Кн – конденсатор; ДК – дроссельный клапан; Н – насос; ВГ – выпускные газы

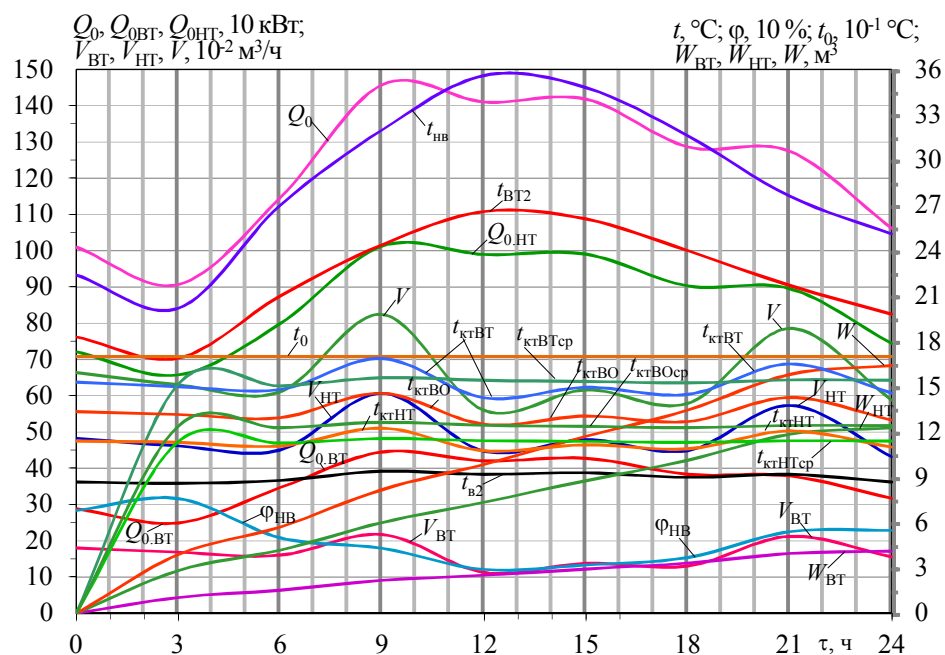


Рис. 2. Текущие значения температуры  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi_{нв}$  наружного воздуха, температуры воздуха  $t_{ВТ2}$  на выходе из ВО<sub>ВТ</sub> и  $t_{в2}$  на выходе из ВО<sub>НТ</sub>, температуры кипения хладона  $t_0$  в ВО<sub>НТ</sub>, тепловой нагрузки  $Q_{0.ВТ}$  на ВО<sub>ВТ</sub>,  $Q_{0.НТ}$  на ВО<sub>НТ</sub> и  $Q_0$  на весь двухступенчатый ВО, текущей температуры конденсата  $t_{ктВТ}$ , полученного в ВО<sub>ВТ</sub> с часовым расходом  $V_{ВТ}$ , конденсата  $t_{ктНТ}$ , полученного в ВО<sub>НТ</sub> с расходом  $V_{НТ}$ , и текущей температуры конденсата  $t_{ктВО}$ , полученного в двухступенчатом ВО с расходом  $V$ , а также средней температуры конденсата  $t_{ктВТср}$ , полученного в ВО<sub>ВТ</sub> в количестве  $W_{ВТ}$ , конденсата  $t_{ктНТср}$ , полученного в ВО<sub>НТ</sub> в количестве  $W_{НТ}$ , и средней температуры конденсата  $t_{ктВОср}$ , полученного в двухступенчатом ВО в количестве  $W$  (расход воздуха 40 кг/с, расход охлаждающей воды ВО<sub>ВТ</sub> 80 т/ч) в течение 8.07. 2015 г. при проектных тепловых нагрузках  $Q_{0.ВТ} = 400$  кВт,  $Q_{0.НТ} = 960$  кВт/(кг/с) и  $Q_0 = 1360$  кВт для климатических условий г. Южноукраинск, Николаевская обл.

на  $Q_{0.HT}$  (уменьшении), соответственно меняется и количество конденсата, образующегося в  $VO_{BT}$  (увеличивается) и  $Q_{0.HT}$  (уменьшается), хотя их суммарное накопление меняется слабо, несколько уменьшаясь по сравнению с их соотношением  $Q_{0.BT} \approx 400$  кВт,  $Q_{0.HT} \approx 960$  кВт/(кг/с).

Как видно, средние температуры конденсата  $t_{ктВТср}$  и  $t_{ктНТср}$ , образующегося соответственно в  $VO_{BT}$  и  $VO_{HT}$ , практически не меняются в течение суток и остаются близкими величинам  $t_{ктВТср} \approx 15$  °С и  $t_{ктНТср} \approx 11$  °С.

С изменением соотношения проектных тепловых нагрузок ступеней охлаждения  $Q_{0.BT}$  и  $Q_{0.HT}$  при одинаковой суммарной тепловой нагрузке двухступенчатого ВО  $Q_0 = 1400$  кВт/(кг/с) средние температуры конденсата  $t_{ктВТср}$  и  $t_{ктНТср}$  меняются весьма слабо – не более чем на 0,5 °С. Сохранение практически неизменной средней температуры конденсата  $t_{ктВТср}$  и  $t_{ктНТср}$ , образующегося в  $VO_{BT}$  и  $VO_{HT}$ ,

подтверждено расчетами и для других дней июля 2015 г.

То обстоятельство, что температура конденсата  $t_{ктНТср}$ , получаемого в  $VO_{HT}$ , существенно ниже, примерно на 4 °С, по сравнению с  $t_{ктВТср}$  для  $VO_{BT}$ , свидетельствует о необходимости его отдельного отвода от  $VO_{BT}$  и  $VO_{HT}$  и использования в качестве хладагента при охлаждении воздуха на входе ГТУ.

О количестве и температуре конденсата, полученного за 3 суток и июль месяц можно судить по результатам расчетов, приведенных на рис. 3 и 4.

Как видно, количество конденсата, полученного за 3 суток в двухступенчатом ВО и его ступенях  $VO_{BT}$  и  $VO_{HT}$ , составляет соответственно  $W \approx 37$  м<sup>3</sup>,  $W_{BT} \approx 9$  м<sup>3</sup>,  $W_{HT} \approx 28$  м<sup>3</sup> при  $Q_{0.BT} = 400$  кВт,  $Q_{0.HT} = 960$  кВт/(кг/с). Средняя температура конденсата меняется в течение 3 суток незначительно:  $t_{ктВТср} \approx 15$  °С и  $t_{ктНТср} \approx 11$  °С.

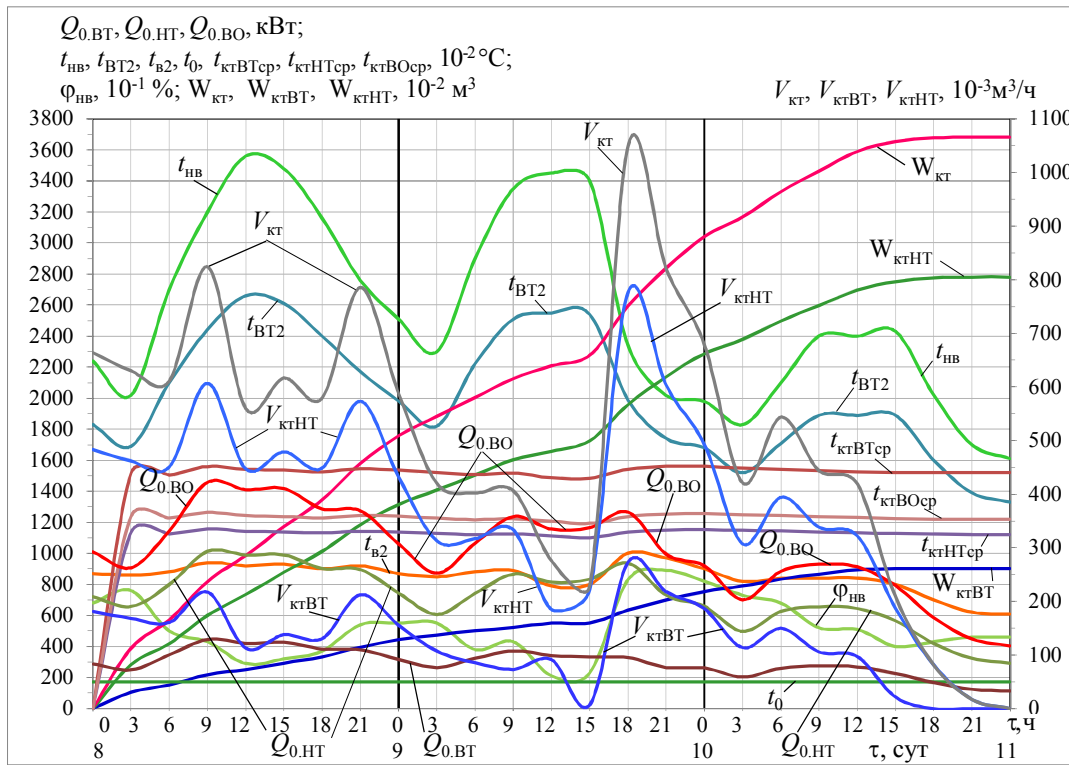


Рис. 3. Текущие значения температуры  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi_{нв}$  наружного воздуха, температуры воздуха  $t_{ВТ2}$  на выходе из  $VO_{BT}$  и  $t_{В2}$  на выходе из  $VO_{HT}$ , температуры охлаждающей воды  $t_{w2}$  на выходе из  $VO_{BT}$  и кипения хладона  $t_0$  в  $VO_{HT}$ , тепловой нагрузки  $Q_{0.ВТ}$  на  $VO_{BT}$ ,  $Q_{0.НТ}$  на  $VO_{HT}$  и  $Q_0$  на весь двухступенчатый ВО, текущей температуры конденсата  $t_{ктВТ}$ , полученного в  $VO_{BT}$  с часовым расходом  $V_{ВТ}$ , конденсата  $t_{ктНТ}$ , полученного в  $VO_{HT}$  с расходом  $V_{НТ}$ , и текущей температуры конденсата  $t_{кт}$ , полученного в двухступенчатом ВО с расходом  $V$ , а также средней температуры конденсата  $t_{ктВТср}$ , полученного в  $VO_{BT}$  в количестве  $W_{ВТ}$ , конденсата  $t_{ктНТср}$ , полученного в  $VO_{HT}$  в количестве  $W_{НТ}$ , и средней температуры конденсата  $t_{кт}$ , полученного в двухступенчатом ВО в количестве  $W$ , часового расхода охлаждающей воды  $G_w$  в  $VO_{BT}$ , (расход воздуха 40 кг/с, расход охлаждающей воды  $VO_{BT}$  80 т/ч) в течение 8-10 июля 2015 г. при проектных тепловых нагрузках  $Q_{0.ВТ} = 400$  кВт,  $Q_{0.НТ} = 960$  кВт/(кг/с) и  $Q_0 = 1360$  кВт для климатических условий г. Южноукраинск, Николаевская обл.

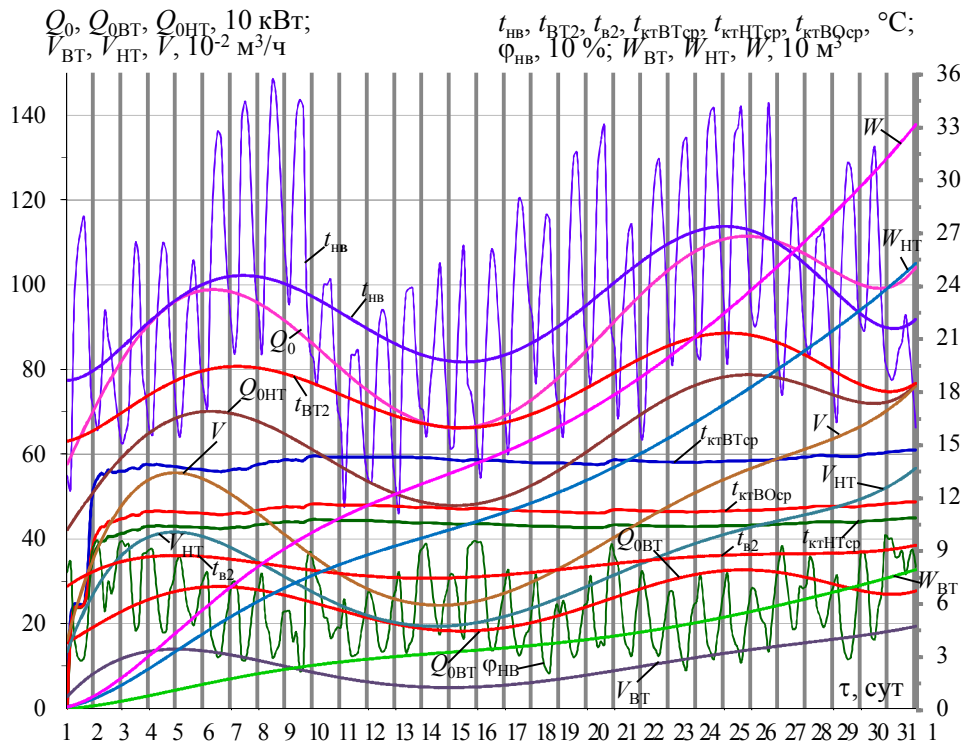


Рис. 4. Среднесуточные значения температуры  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi_{нв}$  наружного воздуха, температуры воздуха  $t_{ВТ2}$  на выходе из  $ВО_{ВТ}$  и  $t_{В2}$  на выходе из  $ВО_{HT}$ , температуры наружного воздуха по мокрому термометру  $t_m$ , тепловой нагрузки  $Q_{0,ВТ}$  на  $ВО_{ВТ}$ ,  $Q_{0,HT}$  на  $ВО_{HT}$  и  $Q_0$  на двухступенчатый  $ВО$ , текущей температуры конденсата  $t_{кТ,ВТ}$ , полученного в  $ВО_{ВТ}$  с часовым расходом  $V_{ВТ}$ , конденсата  $t_{кТ,HT}$ , полученного в  $ВО_{HT}$  с расходом  $V_{HT}$ , и текущей температуры конденсата  $t_{кТ}$ , полученного в двухступенчатом  $ВО$  с расходом  $V$ , а также средней температуры конденсата  $t_{кТ,ВТ,ср}$ , полученного в  $ВО_{ВТ}$  в количестве  $W_{ВТ}$ , конденсата  $t_{кТ,HT,ср}$ , полученного в  $ВО_{HT}$  в количестве  $W_{HT}$ , и средней температуры конденсата  $t_{кТ,ср}$ , полученного в двухступенчатом  $ВО$  в количестве  $W$  (расход воздуха 40 кг/с, расход охлаждающей воды  $ВО_{ВТ}$  80 т/ч) в течение июля 2015 г. при проектных тепловых нагрузках  $Q_{0,ВТ} = 400$  кВт,  $Q_{0,HT} = 960$  кВт/(кг/с) и  $Q_0 = 1360$  кВт для климатических условий г. Южноукраинск, Николаевская обл.

Как видно, количество конденсата, полученного в процессе охлаждения воздуха в двухступенчатом  $ВО$  на входе ГТУ UGT 10000 в течение июля 2015 г., составляет  $330 \text{ м}^3$ , что свидетельствует о целесообразности его использования в качестве хладагента для охлаждения воздуха на входе ГТУ.

То, что средняя температура  $t_{кТ,HT,ср}$  конденсата, получаемого в  $ВО_{HT}$ , примерно на  $4^\circ\text{C}$  ниже ее величины  $t_{кТ,ВТ,ср}$  для  $ВО_{ВТ}$  (см. рис. 2–4), подтверждает целесообразность раздельного его отвода с разной температурой, что расширяет возможности его использования в качестве хладагента. Условием раздельного отвода конденсата является конструктивное выполнение  $ВО$  в виде двух ступеней охлаждения воздуха с разной температурой хладоносителей.

## Выводы

Приведены данные по текущим расходам и температуре конденсата, получаемого как сопутствующий продукт в процессах охлаждения воздуха на входе ГТУ. Предложен способ рациональной ор-

ганизации процессов с двухступенчатым охлаждением воздуха на входе ГТУ и применением холодной воды и кипящего хладона в качестве хладоносителей, что обеспечивает получение конденсата в ступенях с большей разницей температур по сравнению с одноступенчатым охлаждением.

## Литература

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 Eveloy // *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 Eveloy // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – № 50. – P. 918–931.
3. Раоченко, А. Н. Методологический подход к рациональному проектированию комбинированной теплоиспользующей системы охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки [Текст] /

А. Н. Радченко, С. А. Кантор // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 4(121). – С. 76–79.

### References

1. Popli, Sahil., Rodgers, Peter., Eveloy, Valerie. Trigeration 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. Metodologicheskiy podhod k racionalnomu proektirovaniyu kombinirovannoi teploispolzuyushchey sistemy okhlazhdeniya vozdukha na vhode gazoturbinnoy ustanovky [Methodological approaches of rational designing of combined waste heat recovery system for gas turbine unit intake air cooling]. *Avitsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2015, no. 4 (121), pp. 76–79.

Поступила в редакцию 12.01.2018, рассмотрена на редколлегии 14.02.2018

### ОТРИМАННЯ КОНДЕНСАТУ ЯК СУПУТНЬОГО ПРОДУКТУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ

*Р. М. Радченко*

Досліджено отримання конденсату як супутнього продукту охолодження повітря на вході газотурбінної установки трансформацією в холод скидної теплоти відпрацьованих газів. Отримано дані з витрат і температури конденсату, який відведено в процесі тепловологісної обробки повітря за різні проміжки часу, які свідчать про доцільність його використання як холодоносія. Запропоновано спосіб раціональної організації процесів з двоступеневим охолодженням повітря і застосуванням холодної води і киплячого хладону як холодоносіїв, що забезпечує отримання конденсату з більшою різницею температур порівняно з одноступеневим охолодженням.

**Ключові слова:** конденсат, холодоагент, повітря, охолодження, супутній продукт.

### CONDENSATE GENERATION AS SUBPRODUCT OF GAS TURBINE UNIT INLET AIR COOLING

*R. N. Radchenko*

The processes of gas turbine unit inlet air cooling with generation of condensate as a subproduct were investigated. The heat-humidity processes in the two-stage air cooler of combined type with the first low temperature cooling stage were water with temperature of about 7 °C as a coolant for precooling air from the changeable ambient temperature to the temperature not lower than 15 °C is used and low temperature cooling stage with a refrigerant boiling at the temperature of 2-4 °C as a coolant for further deep cooling air to the temperature of about 10 °C by utilizing the exhaust gas waste heat in the absorption lithium-bromide chiller as the high temperature cooling stage and refrigerant ejector chiller as the low temperature cooling stage of the combined thermotransformer has been analyzed for daily changing ambient air temperatures and heat loads on the stages as consequence.

The processes of generating the condensate as a subproduct of gas turbine unit intake air two-stage cooling were simulated by using the computer simulation programs of the firms-producers of heat equipment for more than twice decreased heat load upon the high temperature cooling stage as compared with a heat load upon the low temperature cooling stage. The data about amount of condensate extracted in each air cooler stage was summed up over a day, three days and July and its temperature was calculated. The results of calculation have shown that the temperature of condensate received in the refrigerant low temperature cooling stage are lower by about 4 °C as compared with its value for high temperature cooling stage with a chilled water temperature of 7 °C from absorption lithium-bromide chiller. It was also shown that inspite of intensive changeable current temperatures of condensate from each and both stages mean weighted values of temperature of condensate from both stages of a combined two-stage air cooler remained nearly unchangeable during days. A conclusion about using the condensate from low temperature cooling stage as a coolant has been made.

**Keywords:** condensate, coolant, air, cooling, subproduct.

**Радченко Роман Николаевич** – канд. техн. наук, доц., Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: nirad50@gmail.com.

**Radchenko Roman Nikolaevich** – PhD, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.