

УДК 621.438.13:621.57

С. С. РЫЖКОВ

*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина*

## СЕПАРАЦИЯ КОНДЕНСАТА В ПРОЦЕССАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

*Исследованы процессы охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки при меняющихся температурах наружного воздуха с получением конденсата как сопутствующего продукта. При этом эффективная сепарация конденсата с разной температурой, образующегося в процессе охлаждения воздуха, рассматривается как необходимое условие его использования в качестве хладоносителя. Исходя из такого подхода, разработаны схемные решения воздухоохладителей с сепарацией и использованием конденсата для предварительного охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки.*

**Ключевые слова:** сепарация конденсата, охлаждение воздуха, газотурбинная установка, холодильная машина, воздухоохладитель.

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Охлаждение воздуха на входе ГТУ теплоиспользующими холодильными машинами, преобразующими в холод теплоту отработавших газов, является одним из основных направлений сокращения потребления топлива при повышенных температурах наружного воздуха  $t_{нв}$  [1, 2]. В абсорбционных бромистолитиевых холодильных машинах (АБХМ) получают холодную воду с температурой  $t_x \approx 7^\circ\text{C}$ , которой можно охладить воздух до температуры не ниже  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ . До температуры  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  и ниже можно охладить воздух в хладоновых холодильных машинах (ХМ) хладоном, кипящим при температурах  $t_0 = 2...4^\circ\text{C}$ .

В работе [3] рассмотрено двухступенчатое охлаждение воздуха на входе ГТУ: в первой высокотемпературной ступени – от текущей температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  до  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  водой из АБХМ; во второй низкотемпературной ступени – от  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  до  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  и ниже кипящим хладоном из ХМ. Предложено использование конденсата, образующегося в процессе охлаждения воздуха в высоко- и низкотемпературной ступенях воздухоохладителя (ВО), для предварительного охлаждения воздуха. Однако решение этих вопросов невозможно без решения главного – эффективной сепарации капельной влаги из потока влажного воздуха в ступенях ВО при меняющихся температурах наружного воздуха  $t_{нв}$  с целью получения конденсата разной температуры и дальнейшего его использования в качестве хладоносителя.

Способы эффективной сепарации газожидкостных потоков предложены и исследованы автором в работе [4].

**Цель исследования** – анализ процессов охлаждения влажного воздуха на входе ГТУ при меняющихся температурах наружного воздуха и разработка схемных решений сепарации и использования образующегося конденсата.

### 2. Результаты исследования

Исследование процессов охлаждения влажного воздуха на входе ГТУ с конденсацией содержащихся в нем водяных паров при снижении температуры воздуха ниже точки росы и меняющихся температуре  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\varphi_{нв}$  наружного воздуха выполнено для климатических условий эксплуатации ГТУ Южнобугской компрессорной станции (г. Южноукраинск, Николаевская обл., 2015 г.).

Расчет параметров процесса охлаждения воздуха выполнен для UGT 10000 производства ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект (мощность  $N_e = 10$  МВт, расход воздуха  $G_B = 40$  кг/с), предлагаемых в качестве привода газоперекачивающих компрессоров при замене установленных на компрессорной станции турбокомпрессоров ГТК-10-4. При расчете экономии топлива за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ исходили из климатической характеристики UGT 10000, согласно которой при снижении температуры  $t_{нв}$  на  $10^\circ\text{C}$  удельный расход топлива уменьшается на  $7$  г/(кВт·ч).

Текущие значения параметров процесса охлаждения воздуха в хладоновом ВО на входе ГТУ до температуры  $t_{нв} \approx 10^\circ\text{C}$  с получением конденсата для тепловлажностных условий 9.07.2015 г. приведены на рис. 1.

Как видно, для меняющихся текущих температуры  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\varphi_{нв}$  наружного

воздуха, соответственно и тепловой нагрузке  $Q_0$  на ВО текущий расход образующегося конденсата  $V$  также сильно меняется. При этом суммарное за сутки количество получаемого конденсата  $W$  достаточно весомое и составляет примерно  $12 \text{ м}^3$ . В условиях острого дефицита воды в Украине его использование, причем для нужд самой энергоустановки, например, в качестве хладоносителя, весьма целесообразно. Однако сильно меняющаяся в течение суток температура  $t_{\text{нв}}$  наружного воздуха, соответственно и образующегося конденсата, требует эффективной его сепарации для сведения к минимуму смешивания конденсата с разной температурой, образующегося на первых по ходу воздуха поверхностях теплообмена и конечных, где происходит сравнительно глубокое снижение температуры воздуха.

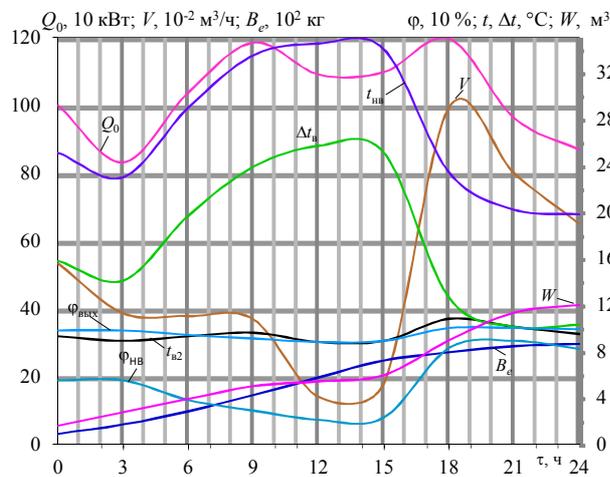


Рис. 1. Текущие значения температуры  $t_{\text{нв}}$  и относительной влажности  $\phi_{\text{нв}}$  наружного воздуха, температуры воздуха на выходе из хладонового ВО  $t_{\text{н2}}$ , снижения его температуры  $\Delta t_{\text{в}}$  в ВО, тепловых нагрузок  $Q_0$  на ВО (расход воздуха  $G_{\text{в}} = 40 \text{ кг/с}$ ), часового расхода конденсата  $V$  и суммарного по нарастающей за сутки количества получаемого конденсата  $W$ , а также экономии топлива  $B_e$  за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ (мощность 10 МВт) в хладоновой холодильной машине в течение суток (9.07.2015) для климатических условий г. Южноукраинск, Николаевская обл.

Принципиальная схема хладонового ВО с сепарацией конденсата разной температуры и использованием низкотемпературного конденсата, сепарируемого на выходе низкотемпературной ступени ВО для предварительного охлаждения воздуха на входе ГТУ приведена на рис. 2.

Более благоприятные условия для сепарации конденсата с разной температурой и использования низкотемпературного конденсата, получаемого в хладоновом ВО, для предварительного охлаждения

воздуха создаются при охлаждении воздуха в ступенях высокотемпературного охлаждения водой от АБХМ и низкотемпературного охлаждения кипящим хладоном от ХМ, поскольку температура получаемого конденсата зависит от температуры воды ( $t_{\text{х}} \approx 7 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и хладоном ( $t_0 = 2 \dots 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

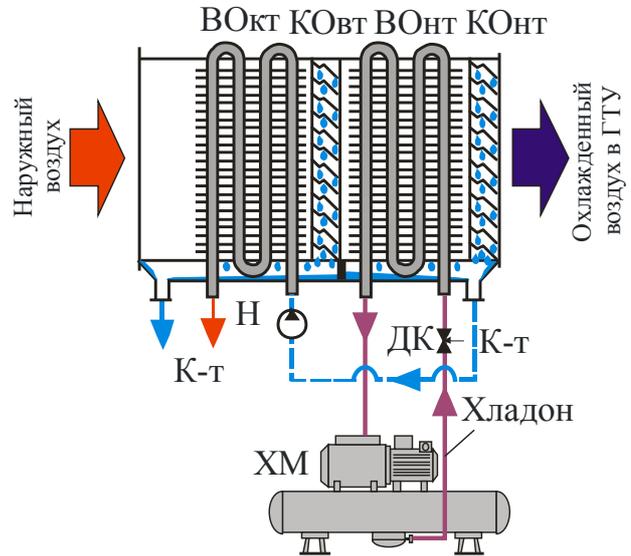


Рис. 2. Принципиальная схема хладонового ВО с сепарацией конденсата разной температуры и использованием низкотемпературного конденсата для предварительного охлаждения воздуха: ВО<sub>кт</sub> и ВО<sub>нт</sub> – ступени ВО с конденсатом и хладоном в качестве хладоносителя; КО<sub>вт</sub> и ВО<sub>нт</sub> – каплеуловители высоко- и низкотемпературного конденсата; Н – насос; ХМ – хладоновая холодильная машина; ДК – дроссельный клапан; К-т – конденсат

На рис. 3 представлены результаты расчета параметров процесса двухступенчатого охлаждения воздуха в ступенях высокотемпературного охлаждения водой ВО<sub>вт</sub> и низкотемпературного охлаждения хладоном ВО<sub>нт</sub> при разном соотношении проектных тепловых нагрузок на ступени  $Q_{0,\text{вт}}$  и  $Q_{0,\text{нт}}$ , соответственно и разных поверхностях теплообмена, а на рис. 4 – соответствующая принципиальная схема трехступенчатого ВО.

При этом вариант заниженной проектной тепловой нагрузки на ВО<sub>вт</sub> принят с целью сокращения затрат мощности ГТУ, соответственно и топлива на преодоление аэродинамического сопротивления ВО<sub>вт</sub> с учетом того, что при умеренных температурах  $t_{\text{нв}}$  тепловая нагрузка  $Q_{0,\text{вт}}$  на ВО<sub>вт</sub> будет снижаться и часть ее поверхности не будет участвовать в теплопередаче. С другой стороны, занижение проектной тепловой нагрузки  $Q_{0,\text{вт}}$  на ВО<sub>вт</sub> приводит к недоохлаждению воздуха в ВО<sub>вт</sub>, т.е. на входе ВО<sub>вт</sub>, соответственно к повышению температуры конденсата на выходе из ВО<sub>нт</sub>.

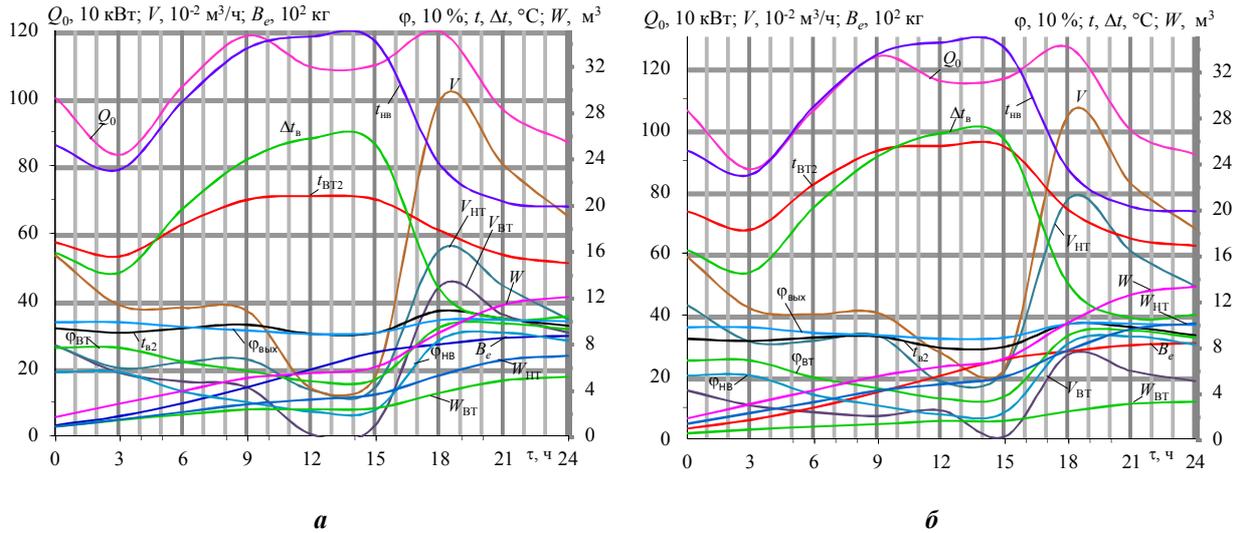


Рис. 3. Текущие значения температуры  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi_{нв}$  наружного воздуха, температуры воздуха на выходе из  $ВО_{вТ}$   $t_{вТ2}$  и из  $ВО_{нТ}$   $t_{вТ2}$ , снижения его температуры  $\Delta t_{в}$  в ВО, тепловых нагрузок  $Q_0$  на ВО (расход воздуха  $G_{в} = 40$  кг/с), часового расхода конденсата  $V$  и суммарного по нарастающей за сутки количества получаемого конденсата  $W$ , а также экономии топлива  $B_e$  за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ (мощность 10 МВт) в двухступенчатом ВО в течение суток (9.07.2015) для климатических условий г. Южноукраинск, Николаевская обл., для ступеней  $ВО_{вТ}$  и  $ВО_{нТ}$  и всего двухступенчатого ВО:  $V_{вТ}$ ,  $V_{нТ}$ ,  $V$  и  $W_{вТ}$ ,  $W_{нТ}$ ,  $W$  – для  $ВО_{вТ}$ ,  $ВО_{нТ}$  и всего ВО;  $\phi_{вТ}$  и  $\phi_{ввх}$  – на выходе  $ВО_{вТ}$  и  $ВО_{нТ}$  (всего ВО);  
**а** –  $Q_{0,вТ} \approx Q_{0,нТ} \approx 680$  кВт; **б** –  $Q_{0,вТ} = 400$  кВт;  $Q_{0,нТ} = 960$  кВт;  $Q_0 = Q_{0,вТ} + Q_{0,нТ} = 1360$  кВт

Как видно из рис. 3, хотя во втором варианте соотношения проектных тепловых нагрузок на ступени: увеличенной  $Q_{0,нТ}$  более, чем в 2 раза по сравнению с  $Q_{0,вТ}$  (рис. 3,б), получают намного большее количество конденсата в  $ВО_{нТ}$  за сутки:  $W_{нТ} = 10$  м<sup>3</sup> (рис. 3,б) по сравнению с  $W_{нТ} = 7$  м<sup>3</sup> (рис. 3,а), его температура во втором варианте будет выше, чем в первом, поскольку на вход  $ВО_{нТ}$  поступает воздух с более высокой температурой  $t_{вТ2} = 20 \dots 25$  °С (рис. 3,б) по сравнению с  $t_{вТ2} = 18 \dots 20$  °С при равных тепловых нагрузках на ступени (рис. 3,б).

Очевидно, что применение каплеотделителей на выходе ступеней  $ВО_{вТ}$  и  $ВО_{нТ}$  будет эффективным при условии соответствия проектных реальным текущим тепловым нагрузкам, что обеспечить при меняющихся в течение суток температуре  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi_{нв}$  наружного воздуха невозможно в принципе. Однако применение эффективных сепараторов-каплеотделителей, предотвращающих унос капельной влаги из теплообменных секций, позволяет свести к минимуму смешивание конденсата с разной температурой с целью последующего его использования как хладоносителя.

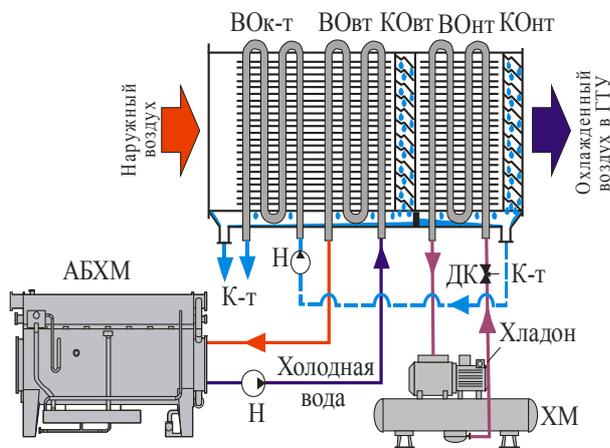


Рис. 4. Принципиальная схема трехступенчатого охлаждения воздуха с сепарацией конденсата разной температуры:  $ВО_{к-т}$ ,  $ВО_{вТ}$  и  $ВО_{нТ}$  – ступени охлаждения (обозначения см. рис. 2)

### Выводы

Предложены методологический подход к решению проблемы сепарации конденсата, образующегося в процессе охлаждения воздуха на входе ГТУ при меняющихся температурах наружного воздуха, а также схемные решения воздухоохладителей с сепарацией и использованием конденсата в качестве хладоносителя.

### Литература

1. Popli, S. Trigeneration scheme for energy efficiency enhancement in a natural gas processing plant through turbine exhaust gas waste heat utilization [Text] / S. Popli, P. Rodgers, V. 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] / S. Popli, P. Rodgers, V. Eveloy // *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. Рыжков, С. С. Применение аэрозольных градиентных технологий в сепарационном оборудовании для судостроения и морской инфраструктуры [Текст] / С. С. Рыжков // *Судостроение и морская инфраструктура*. – 2015. – № 2(4). – С. 151–163.

## 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 racionalnoy teplovy nagruzky absorbcionno-ezhektornogo termotransformatora okhlazhdeniya vozdukha na vhode regenerativnyh GTU kompressornyh stanciy [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. Ryzhkov, S. S. Primenenie aerazolnyh gradientnyh tehnologiy v separacionnom oborudovanii dlja sudostroyeniya i morskoy infrastruktury [Use of aerosol gradient technologies in separation equipment for shipbuilding and marine infrastructure]. *Sudostroyeniye i morskaya infrastruktura – Shipbuilding & Marine Infrastructure*, 2015, no. 2(4), pp. 151–163.

Поступила в редакцию 4.05.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

## СЕПАРАЦІЯ КОНДЕНСАТУ В ПРОЦЕСАХ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ

С. С. Рыжков

Досліджено процеси охолодження повітря на вході газотурбінної установки при змінних температурах зовнішнього повітря з отриманням конденсату як супутнього продукту. При цьому ефективна сепарація конденсату з різною температурою, який утворюється в процесі охолодження повітря, розглядається як необхідна умова його використання як холодоносія. Виходячи з такого підходу, розроблено схемні рішення повітроохолоджувачів з сепарацією та використанням конденсату для попереднього охолодження повітря на вході газотурбінної установки.

**Ключові слова:** сепарація конденсату, охолодження повітря, газотурбінна установка, холодильна машина, повітроохолоджувач.

## SEPARATION OF CONDENSATE DURING GAS TURBINE UNIT INTAKE AIR COOLING PROCESSES

S. S. Ryzhkov

The processes of gas turbine unit intake air cooling at changeable ambient air temperatures with producing a condensate as sub-product were investigated. With this an efficient separation of condensate at different temperatures produced during air cooling processes is considered as necessary condition for its use as coolant. Following this approach the schemes of air coolers with separation and use of condensate for previous gas turbine unit intake air cooling have been developed.

**Keywords:** separation of condensate, air cooling, gas turbine unit, chiller, air cooler.

**Рыжков Сергей Сергеевич** – канд. техн. наук, доц., Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: sergiy.ryzhkov@nuos.edu.ua.

**Ryzhkov Serhiy Sergeevich** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: sergiy.ryzhkov@nuos.edu.ua.