

УДК 621.438.13:621.57

А. Н. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, С. А. КАНТОР<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*<sup>2</sup> *ПАО "Завод "Экватор", Украина*

## МЕТОД РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ НА ВХОДЕ ГТУ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

*Предложен метод определения рациональной установленной холодильной мощности (холодопроизводительности) теплоиспользующих холодильных машин, утилизирующих теплоту отработанных газов для охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок (ГТУ), представляющей собой тепловую нагрузку, исходя из которой проектируют воздухоохладитель на входе ГТУ для конкретных климатических условий и которая обеспечивает максимальную годовую экономию топлива, причем при высоких темпах ее приращения, т.е. эксплуатации теплоиспользующих холодильных машин при нагрузках, близких проектной величине.*

**Ключевые слова:** воздухоохладитель, холодопроизводительность, теплоиспользующая холодильная машина, газотурбинная установка, цикловой воздух, отработанные газы, экономия топлива.

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

С повышением температуры наружного воздуха  $t_{\text{нв}}$  на входе термодинамическая эффективность газотурбинных установок (ГТУ) снижается. Так, для ГТУ производства ГП НПКГ "Зоря-Машпроект" с повышением температуры  $t_{\text{нв}}$  на 10 °С уменьшается КПД на 0,8...1,0 % в абсолютных и на 2,7...2,8 % в относительных величинах. Удельный расход топлива ГТУ при этом возрастает на 7...8 г/(кВт·ч).

Повысить эффективность ГТУ и за счет этого сократить расход топлива при высоких температурах  $t_{\text{нв}}$  воздуха на входе можно путем его предварительного охлаждения теплоиспользующими холодильными машинами (ТХМ), утилизирующими теплоту отработанных газов [1–3]. Поскольку при эксплуатации ГТУ имеют место сезонные и значительные суточные изменения температур, то весьма важен выбор тепловой нагрузки, исходя из которой проектируют воздухоохладители (ВО) на входе ГТУ и, следовательно, выбирают установленную мощность ТХМ. В практике проектирования теплообменных аппаратов за такую принимают максимальную ее величину, что приводит к тому, что большую часть времени в году ТХМ эксплуатируется далеко не на полную мощность, следствием чего являются завышенные капитальные затраты и срок окупаемости системы охлаждения.

**Цель исследования** – разработать метод рационального проектирования воздухоохладителей на входе ГТУ с учетом климатических условий.

### 2. Результаты исследования

Эффективность охлаждения воздуха на входе ГТУ зависит от снижения его температуры  $\Delta t_{\text{в}}$  и продолжительности  $\tau$  подачи в ГТУ охлажденного воздуха, т.е. климатических условий и типа ТХМ. Снижение температуры воздуха  $\Delta t = t_{\text{нв}} - t_{\text{в2}}$  зависит от температуры наружного воздуха  $t_{\text{нв}}$  и охлажденного в ТХМ воздуха  $t_{\text{в2}}$ , которая определяется температурой хладоносителя  $t_{\text{х}}$  (рабочего тела ТХМ), т.е. типом ТХМ [1–3]. Так, в эжекторных хладоновых (ЭХМ) при использовании низкокипящих рабочих тел (НРТ) или водоаммиачных абсорбционных (ВАХМ) холодильных машинах воздух можно охладить до температуры  $t_{\text{в2}} = 10$  °С и ниже ( $t_{\text{х}} = 2...3$  °С и ниже), а в абсорбционных бромистолитиевых (АБХМ) машинах, как правило, до  $t_{\text{в2}} = 15$  °С и выше ( $t_{\text{х}} \approx 7$  °С).

Установленная (проектная) холодильная мощность (холодопроизводительность) ТХМ  $Q_0$ , с одной стороны, должна покрывать затраты холода на охлаждения воздуха на входе ГТУ в течение как можно большего времени эксплуатации ГТУ в году, обеспечивая наибольший суммарный (годовой) эффект в виде экономии топлива. С другой стороны, установленная холодопроизводительность ТХМ  $Q_0$  не должна быть завышенной, чтобы большую часть года ТХМ эксплуатировалась при нагрузках, близких номинальной (проектной). Иначе будет иметь место невысокий коэффициент использования ТХМ (эксплуатация не на полную нагрузку), а при заниженной  $Q_0$ , наоборот, – недоохлаждение воздуха на входе ГТУ при высоких наружных температурах  $t_{\text{нв}}$ .

Значения годовой экономии топлива  $V_{т,10МВт}$  за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью  $N_e = 10$  МВт в зависимости от соответствующих затрат холодопроизводительности (установленной холодильной мощности ТХМ)  $Q_{0,10МВт}$  при температурах охлажденного воздуха на входе  $t_{в2} = 7$  и  $10$  °С (ВАХМ или ЭХМ) и  $t_{в2} = 15$  и  $20$  °С (АБХМ) для газотурбокомпрессорного агрегата ГТК-10-4 Южнобугской компрессорной станции (с. Любашевка, Николаевская обл.) приведены на рис. 1. При этом для регенеративной ГТУ ГТК-10-4 при снижении температуры воздуха на входе на  $1$  °С удельный расход топлива уменьшается на величину  $\Delta b_e = 0,7$  г/(кВт·ч), расход воздуха  $G_{в,10МВт} = 120$  кг/с, с учетом чего затраты холодильной мощности на охлаждение воздуха:  $Q_{0,10МВт} = (c_{вл} \xi \Delta t) G_{в,10МВт}$ , где  $\xi$  – коэффициент влаговываждения, т.е. отношение полного количества теплоты (разности энтальпий воздуха на входе и выходе из ВО), отведенной от влажного воздуха в ВО, к количеству явной теплоты, определяемому разностью температур  $\Delta t$ .

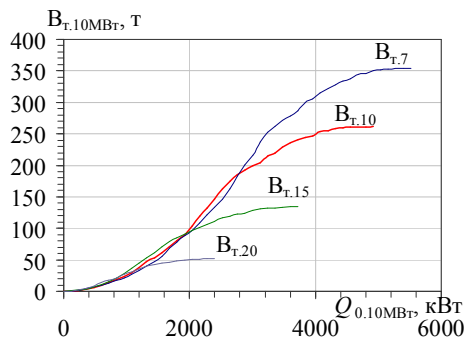


Рис. 1. Значения годовой экономии топлива  $V_{т,10МВт}$  за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ  $N_e = 10$  МВт в зависимости от затрат холодопроизводительности  $Q_{0,10МВт}$  при разных температурах охлажденного воздуха  $t_{в2}$ :  $V_{т,7...20}$  при  $t_{в2} = 7; 10; 15$  и  $20$  °С (с. Любашевка Николаевской обл., 2011 г.)

Как видно, при охлаждении воздуха на входе ГТУ до  $t_{в2} = 10$  °С в ВАХМ или ЭХМ установленной холодильной мощности  $Q_{0,10МВт} = 4000$  кВт достаточно, чтобы получить годовую экономию топлива 250 т. Использование более крупной ВАХМ или ЭХМ установленной холодильной мощностью  $Q_{0,10МВт} = 5000$  кВт (на 25 % больше) хотя и обеспечит охлаждение воздуха до предельно низкой температуры  $t_{в2} = 10$  °С в часы максимальных температур  $t_{нв}$ , но приращение годовой экономии топлива будет незначительным: 10...15 т, т.е. не более 5 % ее величины 250 т при  $Q_{0,10МВт} = 4000$  кВт. Установленная холодильная мощность  $Q_{0,10МВт} = 4000$  кВт является рациональной для ВАХМ или ЭХМ в конкретных климатических условиях.

Для удобства пересчета на ГТУ другой мощности приведенные на рис. 1 данные удобно представлять в относительных (удельных) величинах – в виде годовой экономии топлива, приходящейся на 1 кВт мощности ГТУ, т.е.  $V_{т,y1} = V_{т,10МВт} / N_e$ , в зависимости от затрат удельной холодильной мощности ТХМ, приходящейся на единичный расход воздуха (при  $G_b = 1$  кг/с):  $q_0 = Q_0 / G_{в,10МВт}$  (рис. 2).

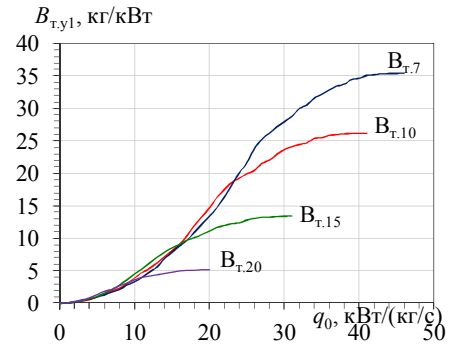


Рис. 2. Значения годовой удельной экономии топлива  $V_{т,y1} = V_{т,10МВт} / N_e$  в зависимости от затрат удельной холодильной мощности ТХМ  $q_0$  ( $G_b = 1$  кг/с) при температурах охлажденного воздуха  $t_{в2}$ :  $V_{т,y1,7...20}$  при  $t_{в2} = 7; 10; 15$  и  $20$  °С (с. Любашевка Николаевской обл., 2011 г.)

Об эффективности глубокого охлаждения воздуха на входе ГТУ до  $t_{в2} = 7$  и  $10$  °С (ВАХМ или ЭХМ) можно судить по годовой экономии топлива в относительных величинах  $V_{\Sigma} / V_{\Sigma 15}$  – по сравнению с ее величиной при охлаждении воздуха до  $t_{в2} = 15$  °С (АБХМ) в зависимости от удельных, приходящихся на единичный расход воздуха, затрат холодильной мощности  $q_0 = \xi c_{вл} (t_{нв} - t_{в2})$ , при разных температурах охлажденного воздуха  $t_{в2}$  (2011 г., с. Любашевка, Николаевская обл.) на рис. 3.

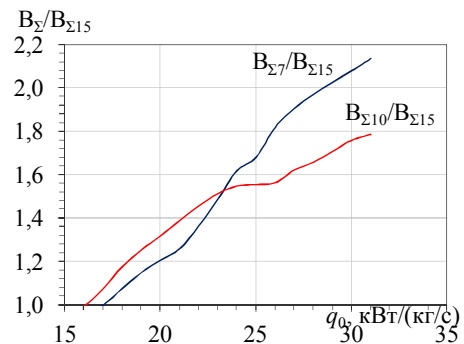


Рис. 3. Значения годовой экономии топлива для ГТУ 10 МВт за счет охлаждения воздуха на входе до  $t_{в2} = 7$  и  $10$  °С (ВАХМ или ЭХМ) в относительных величинах  $V_{\Sigma} / V_{\Sigma 15}$  – по сравнению с охлаждением воздуха до  $t_{в2} = 15$  °С (АБХМ) в зависимости от удельных затрат холодильной мощности  $q_0$  при разных температурах охлажденного воздуха  $t_{в2}$

Графики на рис. 3 получены делением данных по годовой экономии топлива на рис. 2 при  $t_{в2} = 7$  и  $10^\circ\text{C}$  (ВАХМ или ЭХМ) на соответствующие ее значения при  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  (АБХМ).

Как видно, при охлаждении воздуха на входе ГТУ в ВАХМ или ЭХМ (до  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  и ниже) годовая экономия природного газа почти в два раза больше, чем в АБХМ ( $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  и выше).

Поскольку выбор установленной (рациональной) удельной холодильной мощности  $q_0$  и соответствующей полной  $Q_0$  производят не по максимальной тепловой нагрузке, а по несколько меньшей, обеспечивающей высокие темпы приращения эффекта, получаемого за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ в виде сокращения расхода топлива  $V_\tau$ , то вполне очевидно, что в наиболее жаркие дни в течение некоторого времени будет иметь место недоохлаждение воздуха до потенциально возможной минимальной температуры:  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  (ВАХМ или ЭХМ) и  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  (АБХМ). О том, насколько существенными могут быть величины дефицита (недостающей) удельной (расход воздуха  $G_v = 1$  кг/с) холодопроизводительности  $\Delta q_{0,д}$  и соответствующего недоохлаждения воздуха  $\Delta t_{д}$  на входе ГТУ по сравнению с текущими удельными тепловыми нагрузками  $q_{0,10}$  и  $\Delta q_{0,15}$  и потенциально возможными значениями снижения температуры воздуха  $\Delta t_{10}$  и  $\Delta t_{15}$  до  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  (ВАХМ или ЭХМ) и  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  (АБХМ) для климатических условий Южнобугской компрессорной станции (с. Любашевка, Николаевская обл., 2011 г.) можно судить по рис. 4.

При этом дефицит удельной холодопроизводительности  $\Delta q_{0,д10}$  (ВАХМ или ЭХМ) и

$\Delta q_{0,д15}$  (АБХМ), т.е. превышение текущей удельной тепловой нагрузкой на ВАХМ или ЭХМ  $q_{0,10}$  и АБХМ  $q_{0,15}$  рациональной удельной установленной (проектной) холодопроизводительности для охлаждения воздуха на входе ГТУ до  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  и  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ , вычисляли как  $\Delta q_{0,д10} = q_{0,10} - q_{0,р10}$  и  $\Delta q_{0,д15} = q_{0,15} - q_{0,р15}$ , где  $q_{0,р10}$  и  $q_{0,р15}$  – рациональные значения удельной установленной (проектной) холодопроизводительности согласно рис. 2:  $q_{0,р10} \approx 34$  кВт/(кг/с) и  $q_{0,р15} \approx 34$  кВт/(кг/с).

При этом недоохлаждение  $\Delta t_{д,10}$  и  $\Delta t_{д,15}$  воздуха на входе ГТУ по сравнению с потенциально возможным снижением температуры воздуха  $\Delta t$  на входе ГТУ от текущих значений температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  до температур  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  в ВАХМ или ЭХМ и  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  в АБХМ рассчитывали как  $\Delta t_{д,10} = \Delta t_{10} - \Delta t_{10,п}$  и  $\Delta t_{д,15} = \Delta t_{15} - \Delta t_{15,п}$ , где  $\Delta t_{10} = t_{нв} - 10^\circ\text{C}$  и  $\Delta t_{15} = t_{нв} - 15^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{10,п} = q_{0,р10} / \xi$  и  $\Delta t_{15,п} = q_{0,р15} / \xi$ , а значения рациональной удельной установленной (проектной) холодопроизводительности  $q_{0,р10}$  и  $q_{0,р15}$  определяют согласно рис. 2.

Как видно, недоохлаждение  $\Delta t_{д,10}$  и  $\Delta t_{д,15}$  воздуха на входе ГТУ по сравнению с потенциально возможным снижением температуры воздуха  $\Delta t$  на входе ГТУ от текущих значений температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  до температуры  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  в ВАХМ или ЭХМ и  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  в АБХМ составляет 2...3 °С, причем оно весьма кратковременное даже в самом жарком месяце (июле). Из этого следует, что выбор рациональных значений удельной установленной (проектной) холодопроизводительности  $q_{0,10}$  и  $q_{0,15}$  согласно рис. 2 произведен правильно и с учетом климатических условий эксплуатации.

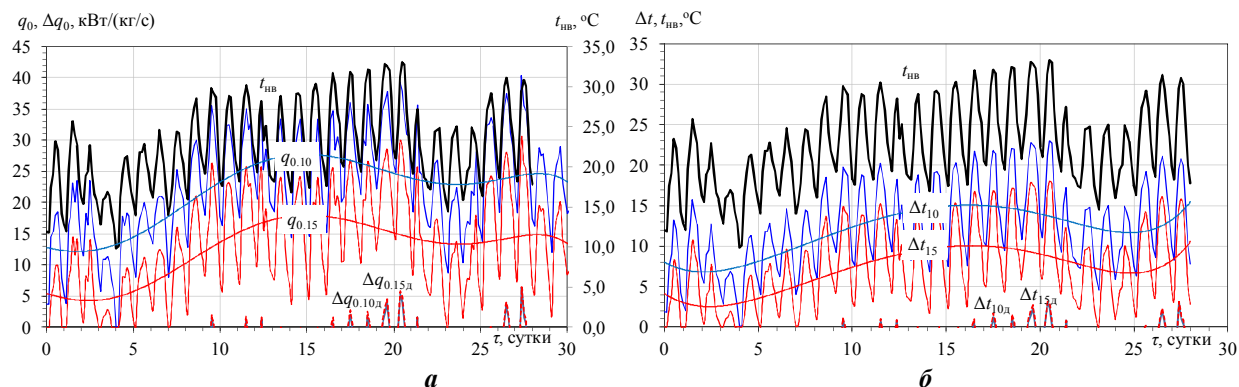


Рис. 4. Текущие значения температуры наружного воздуха  $t_{нв}$ , удельных тепловых нагрузок на ВАХМ или ЭХМ  $q_{0,10}$  и АБХМ  $q_{0,15}$  и дефицита удельной холодопроизводительности  $\Delta q_{0,д10}$  (ВАХМ или ЭХМ) и  $\Delta q_{0,д15}$  (АБХМ) (а), а также снижения температуры  $\Delta t$  воздуха на входе ГТУ до  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  (в ВАХМ или ЭХМ) и до  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  (в АБХМ), недоохлаждения  $\Delta t_{д,10}$  и  $\Delta t_{д,15}$  воздуха на входе ГТУ (б) по сравнению с потенциально возможным его снижением  $\Delta t$  от текущих значений  $t_{нв}$  до  $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$  и  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$

## Выводы

Предложен метод определения рациональной установленной холодильной мощности (холодопроизводительности) ТХМ, представляющей собой тепловую нагрузку, исходя из которой проектируют воздухоохладитель для конкретных климатических условий и которая обеспечивает максимальную годовую экономию топлива, причем при высоких темпах ее приращения, т.е. эксплуатации ТХМ при нагрузках, близких проектной величине.

Правомерность выбора рациональных значений установленной (проектной) холодопроизводительности подтверждена данными по тепловой нагрузке на воздухоохладитель в течение самого жаркого месяца – июля.

Показано, что при охлаждении воздуха на входе ГТУ в ВАХМ или ЭХМ (до  $t_{b2} = 10^\circ\text{C}$  и ниже) годовая экономия природного газа почти в два раза больше, чем в АБХМ ( $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$  и выше).

## Литература

1. 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.
2. Радченко, Н. И. Повышение эффективности газотурбинных установок рекуперацией теплоты с охлаждением воздуха на входе [Текст] / Н. И. Радченко, С. А. Кантор // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 5 (112). – С. 95–98.
3. Радченко, А. Н. Методология технико-экономического обоснования эффективности применения тригенерации в газотурбинных установках [Текст] / А. Н. Радченко, А. С. Морозова // *Газотурбинные технологии*. – Рыбинск, 2013. – № 3 (114). – С. 42–45.

*Поступила в редакцию 19.01.2015, рассмотрена на редколлегии 20.03.2015*

## МЕТОД РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ПОВІТРООХОЛДЖУВАЧІВ НА ВХОДІ ГТУ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ

*А. М. Радченко, С. А. Кантор*

Запропоновано метод визначення раціональної встановленої холодильної потужності (холодопродуктивності) тепловикористовуючих холодильних машин, що утилізують теплоту відпрацьованих газів для охолодження повітря на вході газотурбінних установок (ГТУ), яка являє собою теплове навантаження, виходячи з якого проектується повітроохолоджувач на вході ГТУ для конкретних кліматичних умов та яка забезпечує максимальну річну економію палива, причому за високих темпів її прирощення, тобто експлуатації тепловикористовуючих холодильних машин при навантаженнях, близьких до проектною величини.

**Ключові слова:** повітроохолоджувач, холодопродуктивність, тепловикористовуюча холодильна машина, газотурбінна установка, циклове повітря, відпрацьовані гази, економія палива.

## THE METHOD OF RATIONAL DESIGNING OF INTAKE AIR COOLERS FOR GTU OF COMPRESSOR STATIONS

*A. N. Radchenko, S. A. Kantor*

The method to determine a rational cooling power installed (cooling capacity) of waste heat recovery cooling machines utilizing the heat of exhaust gases for gas turbine unit (GTU) intake air cooling, that is heat load based on which the air cooler at the GTU inlet is designed for site climate conditions and which provides maximal annular fuel saving at high rate of its increment, that is performance of waste heat recovery cooling machines at the loads closed to designing value, has been proposed.

**Key words:** air cooler, cooling capacity, waste heat recovery cooling machine, gas turbine unit, cyclic air, exhaust gases, fuel saving.

**Радченко Андрей Николаевич** – канд. техн. наук, доц., Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Кантор Сергей Анатольевич** – инженер-механик, ПАО "Завод "Экватор", Николаев, Украина, e-mail: s\_kantor@mail.ru.