

УДК 621.515.003

А.В. МИНЯЧИХИН¹, И.И. ПЕТУХОВ¹, Ф.Г. СОРОГИН², Р.Ю. ТУРНА¹¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВХОДНОГО ВОЗДУХА ГАЗОТУРБИННОГО ПРИВОДА

Приводятся климатические характеристики газотурбинного привода Д-336-2 с системой охлаждения входного воздуха на основе испарительных панелей.

газотурбинный привод, испарительное охлаждение, входное устройство, испарительная панель, климатическая характеристика

Введение

Известно, что высокая температура входного воздуха в летний период снижает выходную мощность газотурбинного привода (ГТП) и ограничивает возможности его использования как для газоперекачивающих агрегатов, так и для газотурбинных электростанций. Одним из способов улучшения ситуации является испарительное охлаждение сжимаемого циклового воздуха. [1 – 3]. Его можно осуществить с помощью распыла воды (системы типа «Туман») или при использовании испарительных панелей.

Цель работы. В данной работе рассмотрены климатические характеристики газотурбинного привода Д-336-2 мощностью 6,3 МВт с системой предварительного испарительного охлаждения входного воздуха на основе испарительных панелей Celdek®, тип 7090-15 производства фирмы Munters.

1. Принцип действия системы охлаждения на основе испарительных панелей

Испарительные панели называют еще сотовыми панелями и увлажняющими панелями. Они представляют собой ячеистую структуру, образованную гофрированными листами из пропитанного картона или стекловолокна. Панели из картона имеют низкую стоимость, но не огнеустойчивы. Панели из

стекловолокна дороже, но имеют более компактную структуру и огнеустойчивы. Гофролисты позволяют создать в 1 м³ площадь испарения около 450 м².

Сверху этих панелей устанавливают узел водораспределительной насадки, через которую в панель подается вода (рис. 1). Воздушный поток, проходя сквозь смоченную поверхность, увлажняется и охлаждается за счет передачи теплоты на испарение воды.

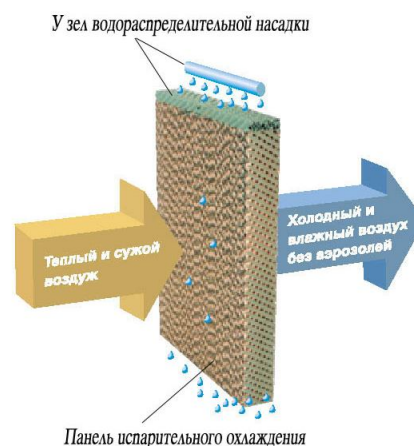


Рис. 1. Принцип работы испарительной панели

Системы подачи воды бывают двух типов: с обратным водоснабжением и с прямым водоснабжением. В первом случае вода в панели подается от циркуляционного насоса, а во втором непосредственно из водопроводной сети.

Системы обратного водоснабжения наиболее распространены благодаря низкому потреблению воды. Системы же с непосредственной подачей во-

ды из водопровода используются в тех случаях, когда слишком низкое качество воды не позволяет использовать ее в циркуляционных системах или когда незначительно время работы увлажнителя в течение года.

Схема системы испарительного охлаждения с оборотным водоснабжением представлена на рис. 2.

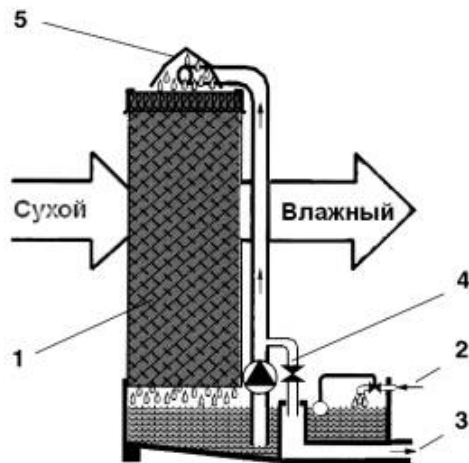


Рис. 2. Схема системы испарительного увлажнения/охлаждения:

1 – панель испарительного охлаждения; 2 – клапан подачи воды; 3 – дренаж; 4 – дренажный клапан; 5 – распределительный коллектор

Сухой воздух поступает в испарительную панель 1, на которую через распределительную систему 5 подается охлаждающая вода. Вода образует пленку на поверхности ячеек и с этой пленки происходит испарение воды. Скорость воздуха в ячейках ограничивается во избежание капельного уноса жидкости с поверхности пленки. Неиспарившаяся вода, достигнув низа панели, собирается в бак, из которого с помощью насоса снова подается в распределительный коллектор 5. В случае падения уровня воды в баке предусмотрена подпитка водой через клапан подачи воды 2. Поскольку из-за постоянного испарения воды увеличивается концентрация солей в циркуляционной воде, то для предотвращения отложений на поверхности панелей часть циркулирующей воды сливается через дренаж 3. После слива воды производится подпитка свежей водой с меньшим содержанием растворенных солей.

Регулирование температуры охлажденного воздуха обеспечивается изменением подачи охлаждающей воды. Растворенные вещества остаются в пленке воды и не уносятся в проточную часть ГТУ, что является основным преимуществом рассматриваемых систем охлаждения по сравнению с системами типа «Туман». Это обстоятельство позволяет также снизить требования к водоподготовке. Недостатком испарительных панелей являются более высокие гидравлические потери по воздуху.

Эффективность охлаждения в панелях принято оценивать с помощью КПД

$$\eta_{ОХЛ} = \frac{T_{ВХ} - T_{ВЫХ}}{T_{ВХ} - T_{SAT}}, \quad (1)$$

представляющего отношение действительного и максимально возможного охлаждения воздуха.

Здесь $T_{ВХ}$ – температура входного воздуха; $T_{ВЫХ}$ – температура охлажденного воздуха; T_{SAT} – температура точки росы влажного воздуха при адиабатном увлажнении. При ее нахождении на I,d-диаграмме не учитывают вносимую с водой энтальпию, считая ее пренебрежимо малой. В данной работе эта энтальпия учитывается. В ряде случаев температуру точки росы ошибочно называют температурой влажного термометра, которая в действительности несколько выше температуры точки росы.

Характеристики панелей задаются графически зависимостями КПД $\eta_{ОХЛ}$ и гидросопротивления ΔP от скорости W потока на входе. Для выбранных панелей Celdek®, тип 7090-15 производства фирмы Munters, толщиной 300 мм, из соответствующих графиков были получены следующие аппроксимирующие зависимости:

$$\eta_{ОХЛ} = (-0,0286 \cdot W - 9,286) \cdot 10^{-2} \cdot W + 0,975, \quad (2)$$

$$\Delta P = (25,36 \cdot W + 1,83) \cdot W + 0,0273. \quad (3)$$

2. Результаты работы

Анализ проводился с учетом гидросопротивления панелей и эффективности охлаждения, расчи-

тываемым по формулам 2 и 3, при следующих параметрах: температура окружающего воздуха изменялась от +15°C до +45°C, относительная влажность от нуля до 80%; давление воздуха на входе принималось 0,101 МПа; частота вращения свободной турбины равнялась 7200 об/мин; температура газа перед рабочими лопатками турбины высокого давления (ТВД) поддерживалась равной 1280 К.

Скорость входного воздуха определялась по характеристикам привода Д-336-2 и заданной площади проходного сечения всасывающей шахты – 9 м².

Климатическая характеристика исходного привода при работе на сухом воздухе представлена в таблице 1. Резкий "провал" мощности при температуре +40 и +45°C обусловлен открытием клапанов перепуска воздуха (КПВ) компрессора низкого давления (КНД).

Таблица 1

Климатическая характеристика ГТП Д-336-2

$t, ^\circ\text{C}$	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45
$\eta_{\text{эф}}, \%$	30,05	29,25	28,49	27,74	27,00	25,59	25,01
$N, \text{МВт}$	6,206	5,761	5,366	4,992	4,646	4,108	3,871

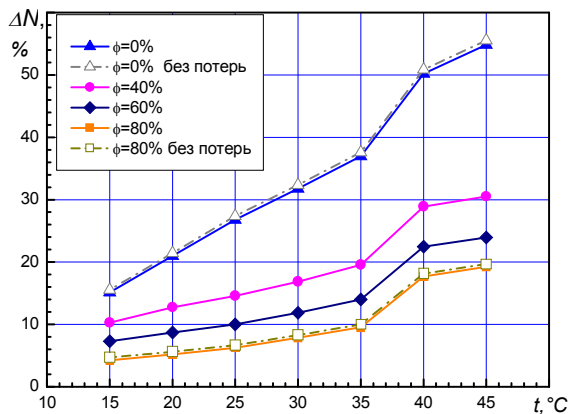


Рис. 3. Прирост мощности привода с охлаждением входного воздуха

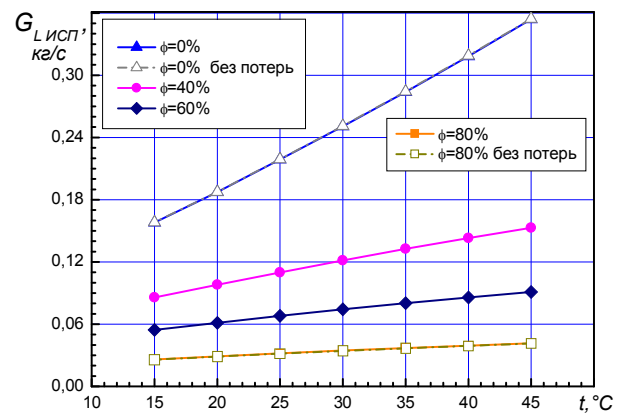


Рис. 5. Расход испарившейся воды

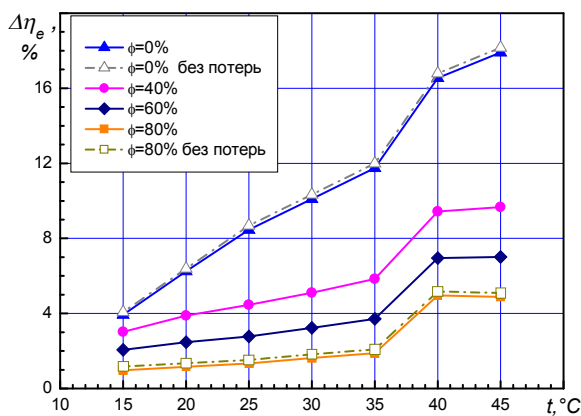


Рис. 4. Прирост эффективного КПД привода с охлаждением входного воздуха

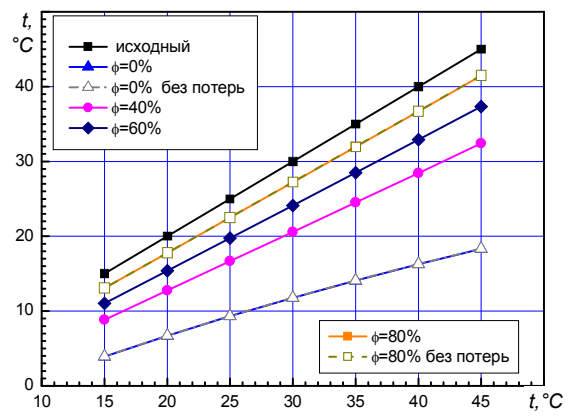


Рис. 6. Температура воздуха перед КНД

Результаты расчетов представлены на рис. 3 – 6. Штрихпунктирными линиями с незакрашенными символами отмечены режимы работы привода без учета гидравлического сопротивления испарительной панели. Так как уровень сопротивления составляет 200...250 Па, указанные линии практически совпадают с режимами, где гидросопротивления панели учитываются.

Прирост мощности и эффективного КПД привода с системой охлаждения входного воздуха зависят от относительной влажности и температуры атмосферного воздуха (рис. 3 и 4). Наибольший прирост мощности и эффективного КПД наблюдается при охлаждении сухого воздуха. Чем больше относительная влажность входного воздуха, тем меньше полезный эффект от испарительного охлаждения. При 100% относительной влажности испарительные панели охлаждать воздух не могут.

Резкий скачок эффективного КПД и мощности при температурах +40 и +45 °С обусловлен провалом рассматриваемых параметров исходного привода без системы охлаждения из-за открытия КПВ КНД. При охлаждении сжимаемого воздуха в изучаемом диапазоне значений температур и относительной влажности клапаны перепуска воздуха КНД не открывались.

Температура воздуха на входе в КНД и потребный расход охлаждающей воды практически линейно возрастают с увеличением температуры входного воздуха (рис. 5, 6).

Выводы

Из всех систем охлаждения сжимаемого воздуха испарительные панели имеют наибольшую готовность к монтажу, наименьшую стоимость и предъявляют менее жесткие требования к системе водоподготовки по сравнению с системами испарительного охлаждения типа «Туман». Испарительные панели имеют малую массу, а система охлаждения

на их основе хорошо вписывается в габариты всасывающей шахты.

Недостатком испарительных панелей по сравнению с системой "Туман" является отсутствие мелкодисперсной влаги в воздухе перед компрессором, которая способствует охлаждению воздуха непосредственно в процессе.

Концентрация пара после системы охлаждения значительно меньше допустимой по устойчивости горения в камере сгорания, что оставляет возможность межступенчатого и межкаскадного испарительного охлаждения сжимаемого в компрессоре циклового воздуха.

Литература

1. Разработка испарительной системы «Туман» для охлаждения воздуха на входе в ГТУ установки ПГУ-60С ФГУП ММП «Салют» / В.Е. Беляев, А.С. Косой, В.Е. Михайлов, В.Ф. Нарышкин, А.П. Тарабрин // Труды одиннадцатого Междунар. симпози. «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования – 2005». – С.-Пб.: С.ПбГТУ, 2005. – С. 157-164.
2. Ameri M., Nabati H., Keshtgar A. Gas turbine power augmentation using fog inlet air-cooling system // 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis: Proceedings of ESDA04 (19-22 July, 2004, Manchester, United Kingdom).
3. Эффективность газотурбинного привода с охлаждением циклового воздуха / И.И. Петухов, А.В. Минячихин, Р.Л. Зеленский, П.Д. Жеманюк, Ф.Г. Сорогин, А.И. Таран // *Авиационно-космическая техника и технология* – 2004. – № 8/16. – С. 13-15.

Поступила в редакцию 1.04.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.