

Цель работы. В статье проанализирован рабочий процесс пневматической форсунки, конкретизированы параметры сжатого воздуха, способы его отбора и подготовки применительно к РСО циклового воздуха ГТП Д-336-2. Рассмотрены энергозатраты на подготовку сжатого воздуха, влияние его отбора на энергетическую эффективность ГТП. Получены расчетные данные о влиянии отбора воздуха и распыла воды на эффективность ГТП Д-336-2 при различных начальных температурах циклового воздуха.

1. Рабочий процесс пневматической форсунки

Анализ публикаций по конструкции и рабочему процессу пневматических форсунок показал, что мелкодисперсный распыл воды вполне реализуем. Однако однозначно связать конструктивные, режимные параметры и качество распыла, ориентируясь только на литературные источники, невозможно. Термин «пневматические» употребляют и для форсунок, где в качестве активного потока выступает водяной пар. Уровень начального давления активного потока для воздуха составляет 0,2...0,8 МПа, для перегретого пара 0,9...2,6 МПа. Форсунки низкого давления применяются для распыла жидкого топлива в промышленных печах, где в качестве активного потока используется либо весь воздух, необходимый для горения, либо большая его часть.

Мелкодисперсный распыл можно получить при высоком давлении [4]. Поэтому затраты энергии на сжатие воздуха достаточно велики (рис. 2) и стремятся уменьшить удельный (на единицу массы распыливаемой жидкости) расход активного потока. При распыле воды удельный расход воздуха составляет 0,5...1,7. Для перегретого пара это соотношение может быть снижено до 0,25...0,3 за счет значительно более высокого давления. При прочих равных условиях меньший удельный расход воздуха обеспечивается в пневматических форсунках эжекционного типа с внутренним смешением. Для них рекомендуют удельный расход воздуха 0,8.

Из теплофизических свойств наибольшее влияние на дисперсность распыла оказывают вязкость и поверхностное натяжение жидкости [5, 6]. При распыле высоковязких жидкостей вязкость является существенным фактором. Однако в области умеренных и малых значений вязкости, характерных для воды, это влияние практически не сказывается. Для воды в интервале температур 20...80°C, характерном для РСО, коэффициент динамической вязкости снижается в три раза. Коэффициент поверхностного натяжения воды в этом интервале меняется незначительно.

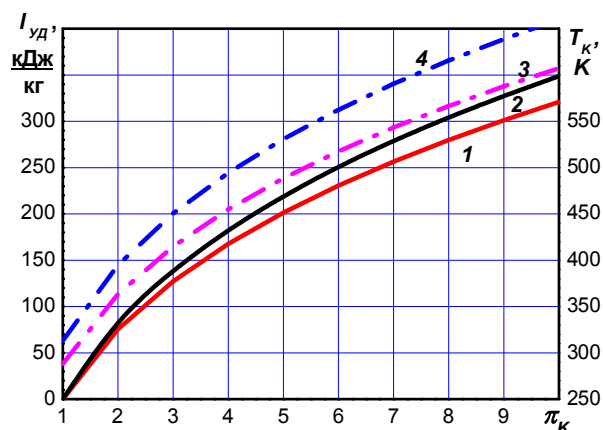


Рис. 2. Характеристики процесса сжатия воздуха в компрессоре с КПД 0,84:

1, 2 — удельная работа; 3, 4 — конечная температура; 1, 3 — $T_{0с}=288,15$; 2, 4 — $T_{0с}=313,15$

Таким образом, факторами, определяющими дисперсность распыла воды для РСО, могут выступать конструкция пневматической форсунки, удельный расход и начальное давление воздуха. В результате выполненных исследований отработана конструкция пневматической форсунки с центральным сверхзвуковым газовым соплом и периферийной подачей воды, близкая к эжекционному типу. Наряду с качеством распыла при отработке конструкции значительное внимание уделено снижению удельного расхода воздуха.

В результате разработана пневматическая форсунка с расходом воды около 25 г/с и удельным расходом воздуха не более 1,2. Давление воздуха на входе составляло 0,5...0,7 МПа. О качестве и факеле распыла дают представление фото на рис.3. При низкой температуре окружающего воздуха испарение капель незначительное и в зоне распыла виден туман из капель, сдуваемых ветром (рис. 3 а). При высокой температуре воздуха в зоне распыла происходит полное испарение капель (рис. 3 б).

2. Энергетические характеристики ГТП

Для охлаждения циклового воздуха до входа в ГТП даже при начальной его температуре 45°C и относительной влажности 20% расход воды составляет не более 0,8% расхода воздуха [3]. С учетом этого и данных, приведенных на рис. 1, максимальный расход воздуха для распылительной системы охлаждения ГТП Д-336-2 с пневмофорсунками составляет около 0,24 кг/с.

С точки зрения энергетической эффективности для подачи этого воздуха целесообразно использовать отдельный компрессор, приводимый от свободной турбины ГТП. В этом случае сжатый цикловой воздух из ГТП не отбирается и далее после под-

вода теплоты в камере сгорания совершает работы при расширении в турбинах. От ГТП отбирается только мощность.



а



б

Рис. 3. Взаимодействие факела распыла пневматической форсунки с атмосферным воздухом:
а – $T_{oc} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; б – $T_{oc} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$

С точки зрения удобства и надежности эксплуатации сжатый воздух целесообразно отбирать от компрессора ГТП, используя один из технологических отборов. Но энергетическая эффективность такого способа ниже, так как отбираемый воздух выводится из цикла и не совершает работу в турбинах.

Конструкцией ГТП Д-336-2 предусмотрена возможность отбора части циклового воздуха за четвертой ступенью компрессора низкого давления (КНД) и после четвертой ступени компрессора высокого давления (КВД). С точки зрения организации распыла воды в шахте комплексного воздухоочистительного устройства (КВОУ) предпочтительным является отбор воздуха из КНД с давлением на номинальном режиме до 0,3 МПа. Однако этот штатный отбор воздуха из КНД используется для охлаждения элементов турбины и дополнительный отбор для РСО на этапе отработки технологии может нарушить баланс системы.

В связи с этим единственным вариантом оста-

ется отбор воздуха за четвертой ступенью КВД, который в холодное время года используется для антиобледенительной системы. Однако на номинальном режиме давление воздуха за четвертой ступенью КВД составляет 0,86 МПа, а температура 569 К. Перед пневматической форсункой давление воздуха понижается путем дросселирования до 0,6...0,7 МПа. Полная температура при этом не снижается. Статическая температура при дальнейшем истечении из сопла падает до 310...350 К.

Чтобы снизить полную температуру рассматриваемого распыливающего потока до значений, соответствующих температуре охлажденного циклового воздуха, необходимо дополнительно испарить до 10% воды или предварительно охладить сжатый воздух в теплообменнике. Тепловая нагрузка последнего может составить до 60 кВт. Более подробные данные о влиянии места отбора воздуха на энергетические показатели ГТП Д-336-2 представлены в табл. 1 для трех температур T_{oc} окружающего воздуха с относительной влажностью 60%.

Расход $G_{вд}$ распыливаемой воды отвечает условию достижения состояния насыщения, т.е. температуры точки росы, после полного ее испарения в воздух [3]. С повышением температуры наблюдается рост затрат воды. Величина $\Delta T_{вз}$ характеризует снижение температуры циклового воздуха в равновесном процессе испарительного охлаждения для указанного случая.

Таблица 1

Показатели процесса отбора воздуха

$T_{oc}, \text{ К}$	303,15	313,15	323,15
$G_{вд}, \text{ кг/с}$	0,078	0,090	0,101
$G_{вз}, \text{ кг/с}$	0,0519	0,0599	0,0672
$\Delta T_{вз}, \text{ К}$	6,16	7,41	8,56
$\pi_{кнд \text{ отбор}}$	2,69	2,57	2,42
$\pi_{квд \text{ отбор}}$	7,60	7,11	6,56
$N_{\phi 1}, \text{ кВт}$	6,15	6,94	7,44
$N_{\phi 2}, \text{ кВт}$	14,8	16,9	18,5
$I_{уд \text{ ГТП}}, \text{ кДж/кг}$	179,2	170,6	145,5
$\Delta N, \text{ кВт}$	9,3	10,2	9,8

Для распыла воды в пневматические форсунки подается воздух с общим расходом $G_{вз}$. В данном расчете взяты средние значения удельного расхода распыливающего воздуха для разработанной форсунки.

Мощность, затрачиваемая на получение сжатого воздуха, зависит от места его отбора. Приведенные в таблице значения степени повышения давления для мест отбора в КНД и КВД взяты без учета влияния отбора воздуха на эти показатели. Соответствующие им значения удельной работы компрессора приведены на рис. 2. Для случая отбора после КНД мощность $N_{\phi 1}$ существенно ниже, чем $N_{\phi 2}$, от-

вечающая условию отбора воздуха после четвертой ступени КВД.

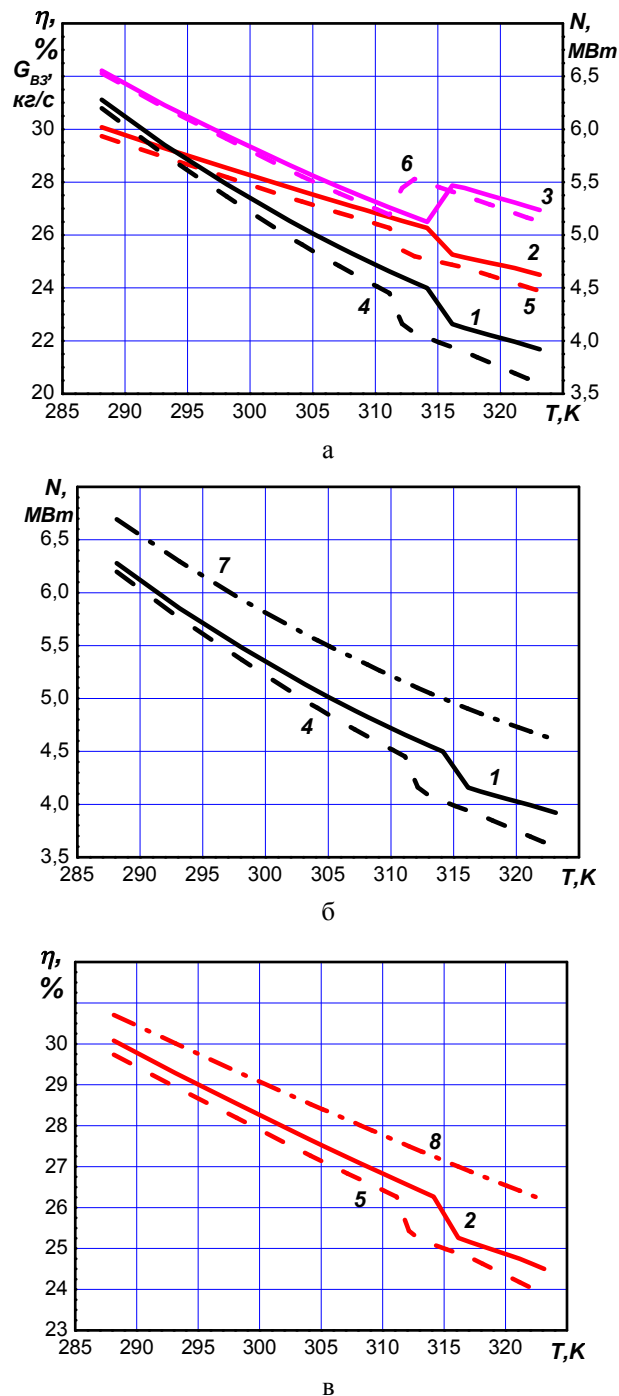


Рис. 4. Климатическая характеристика ГТД Д-336-2 с отбором воздуха и с охлаждением:

- а – влияние отборов воздуха; б – мощность;
- в – эффективный КПД; 1, 4, 7 – мощность;
- 2, 5, 8 – эффективный КПД; 3, 6 – расход входного воздуха; 1, 2, 3 – исходный привод; 4, 5, 6 – с отбором воздуха 200г/с; 7, 8 – с охлаждением и отбором

Другим негативным фактором, связанным с отбором воздуха, является «недобор» мощности ΔN ГТД из-за уменьшения расхода рабочего тела через

турбины. Если не учитывать охлаждение распыливающего потока воздуха, то эта величина не зависит от места отбора воздуха и определяется расходом распыливающего воздуха $G_{вз}$ и удельной работой цикла ГТД $I_{уд}$ ГТД, приведенной в таблице для соответствующих значений температуры. Резкое снижение удельной работы при температуре 323,15 К обусловлено открытием клапанов перепуска воздуха компрессора низкого давления.

Результаты расчета энергетических показателей ГТД Д-336-2 с учетом изменения характеристик элементов при отборе циклового воздуха для различных температур окружающего воздуха представлены на рис. 4, а. Здесь и далее рассматривался отбор 0,2 кг/с воздуха после четвертой ступени КВД. Более существенное снижение мощности наблюдается для высоких температур окружающего воздуха.

Анализ проводился при давлении окружающего воздуха 0,101 МПа, относительной влажности 60% и фиксированной температуре 1280 К газа перед рабочими лопатками турбины высокого давления. Частота вращения свободной турбины составляла 7200 об/мин. Скорость воздуха на входе определялась по характеристикам привода Д-336-2 и заданной площади проходного сечения всасывающей шахты.

Охлаждение воздуха за счет испарения распыленной воды не только компенсирует потери мощности из-за отборов воздуха для нужд РСО, но и дает значительное повышение мощности (рис. 4, б) и КПД (рис. 4, в) при высоких атмосферных температурах.

Выводы

Преимуществами РСО с пневматическими форсунками являются отсутствие загромождения воздухозаборного тракта подводными элементами и простота монтажа системы. Отработанные конструкции пневматических форсунок позволяют получить необходимую дисперсность факела распыла. Для работы форсунок целесообразно использовать сжатый воздух, отбираемый из компрессора ГТД. В ГТД Д-336-2 на стадии отработки технологии может использоваться штатный отбор для антиобледенительной системы. Даже при максимальных отборах воздуха снижение мощности ГТД сравнительно мало и значительно перекрывается приростом мощности из-за испарительного охлаждения циклового воздуха. Например, при температуре 320 К такой прирост составляет около 20% относительных мощности ГТД Д-336-2 с неохлаждаемым цикловым воздухом. Расчетные показатели снижения мощности из-за отбора воздуха при высоких температурах и возможность исключения перепуска воздуха в КВД с охлаждением циклового воздуха в первую очередь нуждаются в экспериментальном подтверждении.

Литература

1. Эффективность газотурбинного привода с охлаждением циклового воздуха [Текст] / 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.
2. Анализ эффективности ГТД Д-336-2 с распылительной системой охлаждения циклового воздуха [Текст] / Ф.Г. Сорогин, Ю.Ф. Басов, П.Д. Жеманюк, В.П. Трофимов, А.В. Минячихин, И.И. Петухов, Ю.В. Шахов // *Газотурбинные технологии*. – 2011. – № 9. – С. 24 – 27.
3. Распылительные системы охлаждения циклового воздуха газотурбинного привода и их эффективность [Текст] / Ю.Ф. Басов, П.Д. Жеманюк, И.И. Петухов, А.В. Минячихин, Ф.Г. Сорогин, Ю.В. Шахов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 38 – 43.
4. Weiss, M.A. Atomization in high velocity airstream [Text] / M.A. Weiss, C.H. Worsham // *American Rocket Society Journal*. – 1959. – Vol. 29, N. 4. – P. 252 – 259.
5. Витман, Л.А. Распыливание жидкости форсунками [Текст] / Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 264 с.
6. Распыливание жидкостей [Текст] / В.А. Бородин, Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, В.А. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1967. – 264 с.

Поступила в редакцию 30.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Л. Угрюмов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ГТД Д-336-2 З ВІДБОРОМ ПОВІТРЯ ДЛЯ РОЗПИЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ

Ф.Г. Сорогін, Ю.Ф. Басов, Ю.В. Шахов, І.І. Петухов, А.В. Мінячихін

Пневматичні форсунки в складі розпилювальної системи охолодження циклового повітря газотурбінного привода мають ряд переваг перед рідинними. Однак для розпилу води потрібно стиснене повітря. Розглянуто вплив відбору стисненого повітря на енергетичну ефективність ГТД Д-336-2. Визначено допустимі витрати повітря і конкретизовані місця можливого його відбору. Проаналізована доцільність використання охолоджувачів стисненого повітря. Наведено розрахункові дані про вплив відбору повітря і розпилу води на кліматичну характеристику газотурбінного привода Д-336-2 з номінальною потужністю 6,3 МВт.

Ключові слова: газотурбінний привід, циклове повітря, випарне охолодження, пневматична форсунка, відбір повітря, кліматична характеристика.

EFFECTIVENESS ANALYSIS OF THE D-336-2 GTU WITH CYCLIC AIR RECUSATION FOR SPRAY COOLING SYSTEM

F.G. Sorogin, Y.F. Basov, Y.V. Shakhov, I.I. Petukhov, A.V. Minyachikhin

Pneumatic sprayers as the part of the GTU cyclic air spray cooling system have the advantages in comparison with hydraulic atomizers. But compressed air is required for water atomization. Cyclic air recusation influence on D-336-2 GTU energy efficiency is considered. Allowable cyclic air expenditure is determined and possible cyclic air recusation places are concretized. Practicability of the compressed air coolers using has been analyzed. The calculated data of the cyclic air recusation and water atomization influence on climate characteristics of the D-336-2 GTU with nominal capacity of 6.3 MW are presented.

Key words: gas turbine unit, cycle air, evaporative cooling, pneumatic sprayer, air recusation, climate characteristics

Сорогин Федор Геннадьевич – заместитель главного конструктора, АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина, e-mail: sku@motorsich.com.

Басов Юрий Фёдорович – главный конструктор по серийным изделиям, зам. начальника УТК АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина, e-mail: basov@motorsich.com.

Шахов Юрий Васильевич – ст. научн. сотр. кафедры аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: k205@mail.ru.

Петухов Илья Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: iIya2950@gmail.com.

Минячихин Артем Владимирович – мл. научн. сотр. кафедры аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: k205@d2.khai.edu.