

УДК 621.515.003

**Ф. Г. СОРОГИН¹, П. Д. ЖЕМАНЮК¹, В. П. ТРОФИМОВ¹, Ю. В. ШАХОВ²,
И. И. ПЕТУХОВ², А. В. МИНЯЧИХИН²**¹ *АО "Мотор Сич", Запорожье*² *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", Харьков, Украина***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА ГТП**

Повышение эффективности газотурбинного привода при высоких температурах окружающего воздуха может достигаться за счёт его охлаждения. Определённые преимущества здесь имеют распылительные системы охлаждения (РСО). Представлены описание опытного образца РСО с пневматическими форсунками и схема экспериментальной установки для его исследования при стендовых испытаниях ГТП. Результаты экспериментов подтвердили работоспособность системы. Измеренные значения температур по тракту ГТП согласуются с расчетными данными. По результатам экспериментов предложены направления модернизации системы измерений и методики проведения опытов, задачи дальнейших исследований. Обоснована необходимость доработки воздушного тракта стендового КВОУ с целью реализации режима "влажного" сжатия в компрессоре.

Ключевые слова: газотурбинный привод, цикловой воздух, распылительная система охлаждения, стендовые испытания, эффективность охлаждения.

Введение

Мощность и топливная эффективность газотурбинного привода (ГТП) уменьшаются с повышением температуры входного воздуха. Например, мощность ГТП Д-336-2 при температуре 313 К снижается на 28,4% относительно номинальной, отвечающей параметрам ISO [1, 2]. Компенсировать такое падение можно за счёт установки ГТП с заведомо завышенной номинальной мощностью. Однако стоимость их выше, а эффективность также снижается с ростом температуры входного воздуха.

В связи с этим достаточно широко используются системы охлаждения циклового воздуха, среди которых по удельной (на единицу компенсированной мощности) стоимости преимущества имеют распылительные системы охлаждения (РСО) [2, 3]. Эффект охлаждения здесь определяется долей испаренной в охлаждаемый воздух воды. Ограничение по испарению связано с достижением точки росы в охлаждаемом влажном воздухе [2]. Существенно расширить возможности для испарения воды позволяет "влажное" сжатие в компрессоре, когда капли попадают в его проточную часть.

Для распыла воды используются как гидравлические, так и пневматические форсунки [3]. Основными преимуществами последних являются больший удельный расход и меньшие гидравлические потери в воздухозаборном тракте ГТП, простота монтажа в эксплуатируемых КВОУ [2]. Именно поэтому опытный образец РСО создан на базе пневматических форсунок.

1. Цель работы

Сложность рабочего процесса в РСО и потребность его реализации для конкретных условий эксплуатации определили необходимость экспериментального исследования опытного образца РСО. Целью исследования является не только оценка эффективности системы и анализ влияющих факторов, но и отработка методики испытаний РСО в составе ГТУ, формирование задач по модернизации элементов и системы измерения.

**2. Схема стенда
и система измерений**

Схема РСО, смонтированной в КВОУ штатного стенда для испытаний ГТП, с указанием расположения средств измерения представлена на рисунке 1. Система состоит из блока пневматических форсунок БФ, установленных сразу за участком шумоглушения КВОУ, накопительного бака НБ, водяного насоса Н1, теплообменного аппарата ТА, фильтров грубой ФГО1 и тонкой очистки ФТО1, трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры и контрольно-измерительной аппаратуры.

В обозначениях средств измерения буква указывает измеряемый параметр, например, давление - Р, температуру - Т, объем или объемный расход - V. Для измерения использовались манометры и датчики давления, термометры сопротивления, турбин-

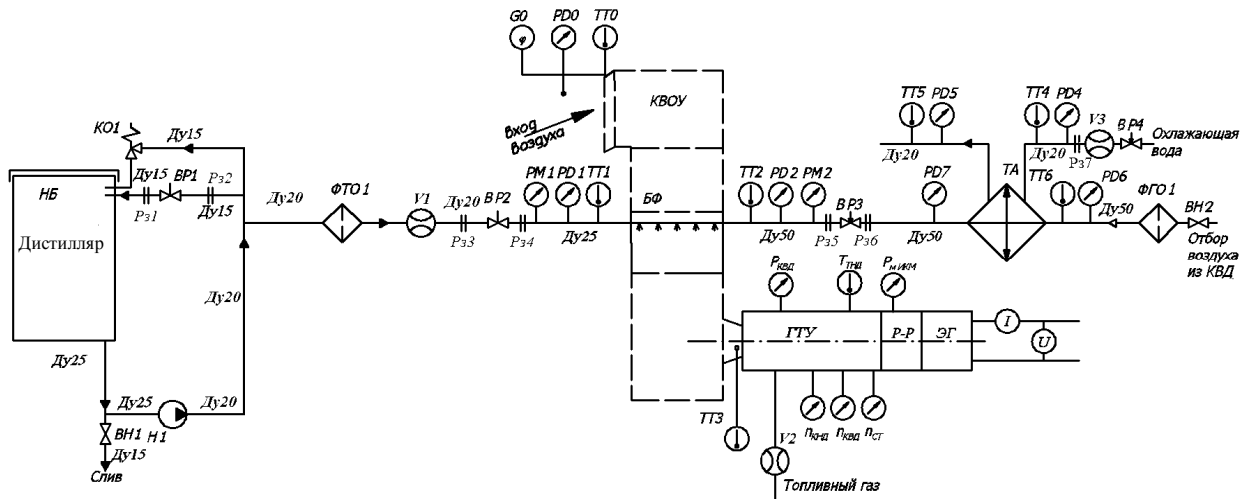


Рис. 1. Распылительная система охлаждения в составе стенда для испытаний ГТП

ные расходомеры. Соответствующие цифры и нижние индексы отмечают место измерения.

Воздух на форсунки отбирается от компрессора ГТП. Ввиду высокой его температуры в схеме предусмотрен теплообменный аппарат ТА для охлаждения воздуха. В качестве холодного теплоносителя используется водопроводная вода, расход которой измеряется расходомером У3 и регулируется вентилем ВР4. Расход сжатого воздуха, подаваемого в пневматические форсунки, регулируется дистанционно управляемой заслонкой ВР3 (см. рис. 1).

Накопительный бак НБ объемом 0,5 м³ перед проведением эксперимента заполняется предварительно подготовленной дистиллированной водой через верхнюю горловину. Температура подаваемой в форсунки воды не оказывает заметного влияния на процесс охлаждения воздуха, расход и качество распыла пневматической форсунки. Поэтому на стенде регулирование температуры воды не предусмотрено. Расход воды регулируется вентилями ВР1 и ВР2. Для слива воды из накопительного бака и водяной магистрали используется вентиль ВН1.

Параметры циклового воздуха перед ГТП определяются в двух сечениях. На входе в КВОУ измеряется атмосферное давление стендовым барометром БАММ-1 (датчик PD0), относительная влажность и температура - датчиками G0 и TТ0 метеостанции типа Atomic W839110. Метеостанция обеспечивает также измерения атмосферного давления, что дублирует показания стендового барометра. Далее входящими в состав САУД ГТП четырьмя штатными термометрами ТТ3 измеряется температура циклового воздуха на входе в ГТП. Расход циклового воздуха вычисляется с использованием программы расчета характеристик испытываемого ГТП для конкретного режима его работы.

Для измерения, преобразования и регистрации сигналов датчиков использовались как штатные элементы испытательного стенда, так и специальная информационно-измерительная система, сформированная из оборудования фирмы ОВЕН. Показания датчиков, расположенных непосредственно на ГТП или необходимых для определения его мощности и расхода топливного газа, выводятся на соответствующие стендовые мониторы и заносятся в штатные протоколы стендовых испытаний.

Информационно-измерительная система включает в себя два универсальных восьмиканальных измерителя-регулятора, комплект датчиков, преобразователь интерфейсов и компьютер. К первому измерителю-регулятору может подключаться до пяти датчиков температуры и три датчика абсолютного давления, а ко второму до восьми датчиков избыточного давления. Измерительные каналы опрашиваются последовательно, частота смены каналов 1 с. При отключении части каналов время опроса, соответственно, сокращается.

Информационно-измерительная система позволяет как снимать показания датчиков с цифрового табло, так и записывать их на электронный носитель. Такая запись осуществляется с помощью программного обеспечения OWEN PROCESS MANAGER разработки фирмы ОВЕН.

3. Методика и результаты экспериментального исследования РСО

Исследование РСО выполнялось без изменений в штатном алгоритме управления стендовой САУД ГТП. В данных экспериментах использовался режим с поддержанием постоянной выходной мощности модифицированного ГТП АИ-336-8.

Включение РСО осуществляется вручную. Сначала в теплообменник ТА (см. рис. 1) подается охлаждающая вода с заданным расходом, контролируемым по расходомеру V3. Далее открывается отбор сжатого воздуха, который перед подачей в форсунки охлаждается в теплообменнике ТА. На рабочем режиме давление воздуха поддерживается постоянным с помощью регулирующей задвижки ВР3.

После этого насосом Н1 в форсунки РСО подается дистиллированная вода. Ее расход фиксируется по показаниям расходомера V1 и задается с учетом расхода циклового воздуха, режима сжатия в компрессоре ("сухой" или "влажный"), температуры и относительной влажности атмосферного воздуха. Для регулирования расхода воды используются вентили ВР1 и ВР2.

Конструкция подводящих трубопроводов, арматуры и форсунок позволяет подавать в РСО сжатый воздух и без охлаждения. В этом случае требуется несколько увеличить расход дистиллированной воды. Такой режим является предметом дальнейших экспериментов.

При отборе части циклового воздуха, как и при испарительном его охлаждении, режим работы ГТП меняется. В данной серии экспериментов после таких воздействий САУД ГТП согласно заложенному алгоритму возвращает ГТП на режим работы, соответствующий заданной мощности 5,8 МВт при неизменных оборотах свободной турбины за счет регулирования расхода топливного газа.

Выключение РСО осуществляется в обратном порядке. При этом расход воды уменьшается плавно, что упрощает работу САУД ГТП. После выключения насоса Н1 закрывается вентиль ВН2 на магистрали отбора сжатого воздуха из компрессора. В последнюю очередь закрывается вентиль ВР4 подачи охлаждающей воды в теплообменник ТА.

Определенным осложнением при проведении экспериментов с РСО стало наличие установленных на каркасе защитных сеток перед входом в ГТП и в нижней части КВОУ. При их отсутствии есть риск попадания в проточную часть ГТП механических частиц. Кроме того, убрать их технически сложно.

Испытания ГТП с РСО в составе стендового КВОУ проводились дважды. В первый день температура атмосферного воздуха составляла 13,5°C при относительной влажности 68%, во второй 17,4°C и 66% соответственно. Испарение капель в цикловом воздухе приводит к его охлаждению. Минимально возможная температура циклового воздуха перед входом в ГТП с РСО отвечает температуре адиабатного увлажнения, определяемой условием насыщения циклового воздуха парами воды. Процесс этот в диаграмме энтальпия-влажность представлен на рис. 2. Начальному состоянию воздуха отвечает

точка "0", состоянию насыщения – точка "3". Эти номера соответствуют сечениям на схеме рис. 1.

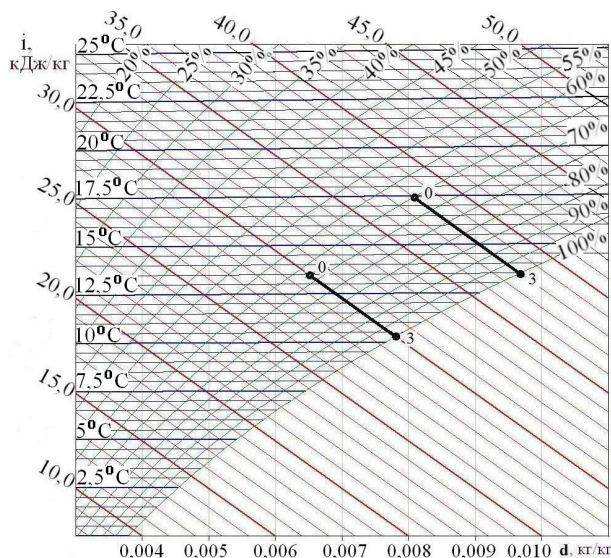


Рис. 2. Процесс испарительного охлаждения влажного воздуха перед входом в ГТП

Верхняя и нижняя прямые на рис. 2 отвечают указанным атмосферным условиям в дни испытаний. В первом случае температура воздуха снижается от 17,4°C до 13,6°C при испарении в цикловый воздух около 0,049 кг/с воды. Во втором - от 13,5°C до 10,4°C при испарении около 0,042 кг/с воды. Расходы испаренной воды определены с учетом расчетных значений расхода циклового воздуха.

Экспериментальные значения температуры t_3 на входе в ГТП согласуются с указанной температурой адиабатного увлажнения с погрешностью $\pm 0,15$ К как при расходе воды 0,049 кг/с, так и при более высоких значениях, необходимых для реализации режимов "влажного" сжатия в компрессоре. Неиспарившаяся влага не оказывает заметного влияния, так как ее доля мала, а средняя температура испаряющихся капель близка к температуре примыкающего воздуха [3].

Индикатором изменения режима работы ГТП и реализации "влажного" сжатия в компрессоре может служить измеряемая в эксперименте температура $t_{\text{ТНД}}$ продуктов сгорания после ТНД. При отборе воздуха на форсунки РСО для поддержания неизменной мощности ГТП увеличивается расход топливного газа. Соответственно возрастает относительно базового режима температура перед ТВД и другие вниз по потоку, в том числе $t_{\text{ТНД}}$. В эксперименте увеличение составляет 11 К, что удовлетворительно согласуется с данными, полученными по программе расчета характеристик ГТП.

При подаче воды с расходом 0,049 кг/с, обеспечивающим полное испарение капель до входа в

ГТП, температура продуктов сгорания после ТНД снижается на 10 К и практически совпадает со значением для базового режима. В то же время расход топливного газа уменьшается незначительно. Подобный результат дает и программа расчета характеристик ГТП.

Подача в 2-3 раза большего количества воды с целью реализации "влажного" сжатия в проведенных экспериментах к снижению температуры после ТНД не привела. Не менялся и расход топливного газа.

В то же время в случае испарения всей жидкости в процессе "влажного" сжатия температура после ТНД уменьшается более чем на 20 К, заметно снижается и расход топливного газа. Результаты расчета по уменьшению температуры в данном случае являются вполне достоверными, так как непосредственно согласуются с уравнениями теплового баланса.

Такое несоответствие расчетных и опытных данных объясняется тем, что собственно "влажного" сжатия в экспериментах реализовать не удалось. Подаваемая сверх 0,049 кг/с вода на вход в ГТП не попадала. Наиболее вероятной причиной является осаждение мелких капель на волокнах сеток.

О заметном вкладе сетки в охлаждение циклового воздуха свидетельствует охлаждение циклового воздуха после прекращения подачи воды в РСО. При подаче воды снижение температуры до входа в ГТП составляет около 4 К, после прекращения подачи - около 2 К. Похожее соотношение эффектов охлаждения и для температуры $t_{\text{ТНД}}$ после ТНД.

Выводы

Выполненные стендовые испытания подтвердили работоспособность созданной РСО. Температура циклового воздуха перед входом в ГТП при распыле воды снижается до минимально возможной равновесной температуры адиабатного увлажнения. Расчетные и опытные значения расхода воды совпадают в пределах погрешности измерения, что свидетельствует о полном испарении распыленной воды на этих режимах. Уменьшение измеряемой на стенде температуры воздуха после ТНД составило при этом около 10 К, что также согласуется с расчетными данными для ГТП с испарительной системой охлаждения.

Эффективность охлаждения собственно в РСО по результатам выполненных экспериментов оценить затруднительно из-за наличия защитных сеток в нижней части КВОУ и непосредственно перед входом в ГТП. Осаждающаяся на их волокнах влага также участвует в процессе испарительного охлаждения аналогично работе испарительных панелей.

Сразу после прекращения подачи воды в РСО в условиях, когда волокна сетки еще насыщены влагой, снижение температуры циклового воздуха составляло 1,8...2 К.

Для уточнения вклада испарительного охлаждения на сетке следует увеличить продолжительность работы ГТП после отключения подачи воды до достижения параметров "сухого" режима, контролируя изменение во времени характерных температур. При этом должны быть учтены инерционные свойства ГТП и датчиков температуры. Наиболее информативным по вкладу сетки в охлаждение циклового воздуха будет прямое сопоставление результатов испытаний ГТП с РСО при наличии и отсутствии сеток.

Наличие сеток не позволяет реализовать работу ГТП с "влажным" сжатием в компрессоре. Повышение расхода воды через форсунки для реализации этого режима практически не меняет измеряемые температуры воздуха и другие параметры, характеризующие работу ГТП. Дополнительный расход воды на вход в ГТП не попадает. Образованные при распыле капли оседают на волокнах сетки и насыщают ее влагой, которая полностью испариться не может. Избыточная вода далее стекает вниз в виде крупных капель или пленок и накапливается на полу КВОУ.

В то же время большинство конструкций отечественных КВОУ в том или ином виде содержат защитную сетку. Поэтому значительный интерес представляет специальное исследование системы РСО-сетка, как комплекса испарительного охлаждения воздуха до входа в ГТП.

Результаты экспериментов позволяют уточнить и дополнить некоторые методики. Так, измеряя влажность отбираемого для РСО воздуха, можно напрямую определить долю испаряемой воды, так как влажность атмосферного воздуха уже измеряется. Такой способ в случае "влажного" сжатия в компрессоре будет точнее, чем косвенный, основанный на расчете характеристик ГТП.

С учетом этого измерения можно также определить или уточнить долю неиспарившихся до входа в ГТП капель на режимах, когда расход воды ниже того, что обеспечивает насыщение циклового воздуха ее парами до входа в ГТП. Для этого дополнительно необходимо использовать температуру, измеряемую на входе в ГТП.

Остался экспериментально не изученным вопрос влияния температуры воздуха, подаваемого в форсунки, на эффективность РСО. Соответствующие исследования следует выполнить на режиме с расходом воды ниже того, который отвечает достижению состояния насыщения воздуха парами воды при отсутствии влаги на полу КВОУ. При положи-

тельных результатах из схемы промышленной РСО можно исключить теплообменник, для охлаждения воздуха, и систему подготовки и подачи охлаждающей воды.

Литература

1. Эффективность газотурбинного привода с охлаждением циклового воздуха [Текст] / И. И. Петухов, А. В. Минячихин, Р. Л. Зеленский [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – №8 (16). – С. 13-15.

2. Анализ эффективности ГТП Д-336-2 с распылительной системой охлаждения циклового воздуха [Текст] / Ф. Г. Сорогин, Ю. Ф. Басов, П. Д. Жеманюк [и др.] // *Газотурбинные технологии*. – 2011. – № 9(86). – С. 24-27.

3. Распылительные системы охлаждения циклового воздуха газотурбинного привода и их эффективность [Текст] / Ю. Ф. Басов, П. Д. Жеманюк, И. И. Петухов [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7(64). – С. 38-43.

Поступила в редакцию 30.05.2015, рассмотрена на редколлегии 19.06.2015

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

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПИЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ЦИКЛОВОГО ПОВІТРЯ ГТП

Ф. Г. Сорогін, П. Д. Жеманюк, В. П. Трофімов, Ю. В. Шахов, І. І. Петухов, А. В. Мінячихін

Підвищення ефективності газотурбінного привода при високих температурах навколишнього повітря може досягатися за рахунок його охолодження. Певні переваги тут мають розпилювальні системи охолодження (РСО). Представлено опис дослідного зразка РСО з пневматичними форсунками і схема експериментальної установки для його дослідження при стендових випробуваннях ГТП. Результати експериментів підтвердили працездатність системи. Виміряні значення температур по тракту ГТП узгоджуються з розрахованими даними. За результатами експериментів запропоновано напрями модернізації системи вимірювань та методики проведення дослідів, завдання подальших досліджень. Обґрунтовано необхідність доопрацювання повітряного тракту стендового КПОУ з метою реалізації режиму "вологого" стиснення в компресорі.

Ключові слова: газотурбінний привід, циклове повітря, розпилювальна система охолодження, стендові випробування, ефективність охолодження.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE GAS TURBINE UNIT CYCLIC AIR SPRAY COOLING SYSTEM

F. G. Sorogin, P. D. Zhemanyuk, V. P. Trofimov, Y. V. Shakhov, I. I. Petukhov, A. V. Minyachikhin

Gas turbine unit (GTU) effectiveness increase at the high ambient air temperature can be achieved by cyclic air cooling. Spray cooling system (SCS) has some advantages. Description of the SCS prototype with pneumatic nozzles and the experimental facility for its investigation at the gas turbine unit bench tests are presented. The experimental results confirmed the system efficiency. The measured temperature values for GTU air-gas channel are consistent with the calculated data. Directions of the measuring system modernization and experiment conducting methods, the further research tasks are suggested according to the experiment results. The necessity of the bench SCS air tract improvement for implement of the "wet" compression regime in the compressor is substantiated.

Key words: gas turbine unit, cycle air, spray cooling system, bench test, cooling efficiency.

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

Жеманюк Павел Дмитриевич – канд. техн. наук, технический директор, АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина, e-mail: motor@motorsich.com.

Трофимов Владимир Петрович – заместитель технического директора по наземной технике, АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина, e-mail: trofymov@motorsich.com.

Шахов Юрий Васильевич – ст. науч. сотр. каф. аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: k205@mail.ru.

Петухов Илья Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ilya2950@gmail.com.

Минячихин Артем Владимирович – мл. науч. сотр. каф. аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: artemteh@gmail.com.