

УДК 621.515.003

Ф.Г. Сорогин<sup>1</sup>, Ю.Ф. Басов<sup>1</sup>, П.Д. Жеманюк<sup>1</sup>, В.П. Трофимов<sup>1</sup>,  
А.В. Минячихин<sup>2</sup>, И.И. Петухов<sup>2</sup>, Ю.В. Шахов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Мотор Сич», Украина

<sup>2</sup> Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГТП Д-336-2 С РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА

Рассмотрены различные способы охлаждения циклового воздуха как средство повышения энергетической эффективности газотурбинных приводов. Обоснованы преимущества для этих целей мелкодисперсного распыла охлаждающей воды при высокой температуре входного воздуха. В этом случае проточная часть привода остается без изменений, а незначительные доработки выполняются только в воздухозаборном тракте. Определены допустимые расходы воды, преимущества жидкостной и пневматической форсунок. Приводятся расчетные данные о влиянии распыла воды на входе в компрессор на климатическую характеристику газотурбинного привода Д-336-2 с номинальной мощностью 6,3 МВт.

**Ключевые слова:** газотурбинный привод, цикловой воздух, испарительное охлаждение, распыл воды, климатическая характеристика.

### Введение

Задача поддержания требуемых технических параметров, экономичности и надежности наземных газотурбинных приводов (ГТП) вне зависимости от климатических условий работы и сезона была и остается актуальной. Особенно значимым является снижение выходной мощности и эффективного КПД ГТП при высокой температуре входного воздуха в летний период. Характер этой зависимости для ГТП Д-336-2 приведен на рис. 1 [1, 2].

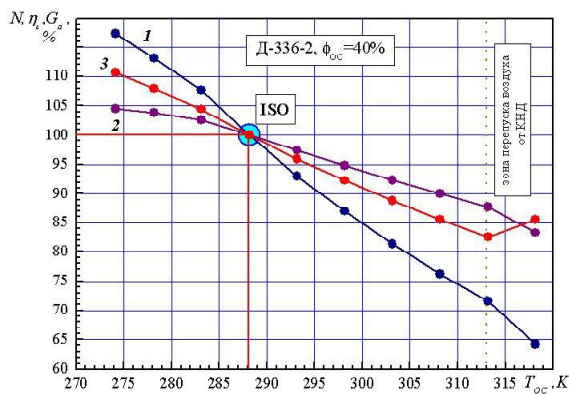


Рис. 1. Климатическая характеристика ГТП Д-336-2: 1 — мощность, 2 — эффективный КПД, 3 — расход воздуха

При температуре входного воздуха 313К мощность привода  $N$  снижается на 28,4%, а эффек-

тивный КПД  $\eta_e$  на 12,3% по сравнению с показателями на номинальном (по параметрам ISO) режиме.

Компенсировать такое падение можно за счет установки ГТП с заведомо завышенной при нормальных условиях выходной мощностью либо большего числа ГТП. Однако энергетическая эффективность этих приводов также снижается с ростом температуры входного воздуха.

Охлаждение циклового воздуха в значительной мере устраняет указанные негативные последствия. Системы охлаждения можно классифицировать по месту расположения и типу. В последнем случае различают конвективные (рекуперативные) и испарительные (контактные) системы охлаждения.

Конвективное охлаждение осуществляется в поверхностном теплообменнике и предполагает использование парокомпрессионной или абсорбционной холодильной машины (ХМ). При этом принципиально реализуется охлаждение воздуха любой влажности. Однако удельная стоимость 1 кВт «восстановленной» мощности для конвективных систем с парокомпрессионной ХМ оценивается в 290\$, с абсорбционной водоаммиачной ХМ — 275\$ и бромисто-литиевой ХМ — 350\$ [3].

В действительности сезонное использование ХМ и внесение значительных изменений в конструкцию воздухозаборной части ГТП приводят к значительно большей величине удельной стоимости «восстановленной» мощности. Кроме того,

при охлаждении влажного воздуха ниже «точки росы» возможен также срыв крупных капель с водяной пленки, образующейся в этом случае на теплообменной поверхности.

Контактное охлаждение осуществляется за счет испарения воды в охлаждаемый воздух и значительно дешевле конвективного. В зависимости от способа организации процесса контактные системы можно разделить на панельные (увлажняющие) [2] и распылительные. Главным недостатком испарительных панелей является большая степень загромождения проточной части и, как следствие, значительные гидравлические потери, которые сохраняются и в случае, когда охлаждение воздуха не требуется. Поэтому больший интерес представляют распылительные системы охлаждения (РСО), реализующие испарительное охлаждение воздуха путем распыла мелкодисперсной влаги с помощью форсунок различного типа.

### 1. Цель работы

В данной работе рассмотрено влияние охлаждения циклового воздуха перед компрессором путем ввода распыленной воды на характеристики ГПП Д-336 -2. Определены эффективный КПД и мощность в области устойчивой работы ГПП. Выполнен анализ преимуществ использования форсунок различных схем в составе РСО.

### 2. Распылительные системы охлаждения

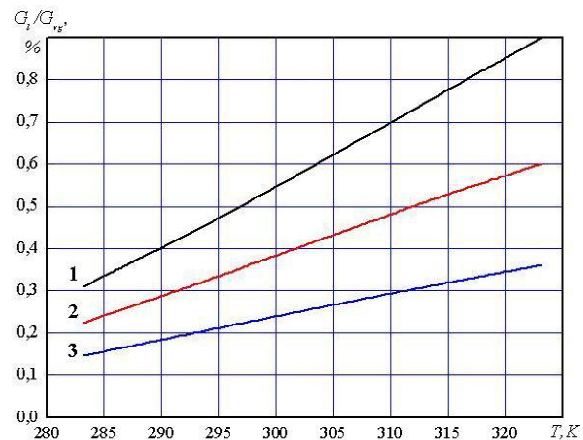
Контактное охлаждение циклового воздуха, реализуется за счет испарения капель дистиллированной воды, распыленных в охлаждаемом воздухе с помощью гидравлических или пневматических форсунок. По месту расположения различают РСО входного воздуха, РСО «влажного» или «мокрого» сжатия, межступенчатые, межкасадные и смешанные РСО [4]. РСО входного воздуха обеспечивает испарение всех капель до входа в компрессор. В РСО «мокрого» сжатия испарение основной массы капель продолжается в компрессоре. При этом реализуется процесс сжатия с одновременным охлаждением воздуха, что термодинамически предпочтительнее, однако, существует риск повреждения лопаток компрессора. Межкасадные РСО обеспечивают подачу воды между компрессорами низкого и высокого давления (КНД и КВД), что диктует необходимость изменений конструкции ГПП и в ряде случаев является неприемлемым. Смешанные РСО объединяют несколько видов охлаждения.

В равновесном процессе испарить во влажный воздух заданной температуры  $T$  и относительной влажности  $\phi$  можно только вполне определенное количество воды (рис. 2а). Оно определяется достижением состояния насыщения для парогазо-

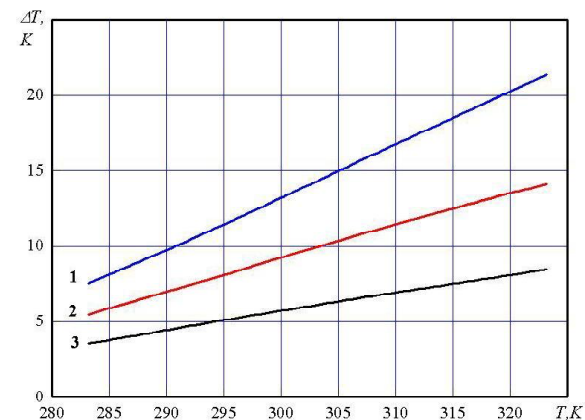
вой смеси. Превышение этого расхода приведет к сохранению неиспарившихся капель вниз по потоку.

Доля испарившейся воды определяет достижимое значение охлаждения воздуха (рис. 2б). При относительной влажности 20% и начальной температуре 320 К охлаждение составляет 20 К.

РСО входного воздуха, в отличие от других систем, характеризуется простотой конструкции и эксплуатации. Она может монтироваться с минимальными доработками существующего воздухозаборного тракта ГПП. При этом задача испарения всех капель до входа в компрессор может быть решена за счет надлежащего выбора расстояния до входа в компрессор, расхода охлаждающей воды, конструкции форсунок и их расположения по сечению всасывающей шахты.



а)



б)

Рис. 2. Характеристики равновесного процесса испарительного охлаждения влажного воздуха  
1 —  $\phi = 20\%$ ; 2 —  $40\%$ ; 3 —  $80\%$ . а) расход испаряемой воды; б) снижение температуры воздуха

Важнейшим элементом РСО входного воздуха является форсунка, которая должна обеспечивать дисперсность распыла воды не хуже 40 мкм [4]. Выполненные исследования показали, что наиболее подходящими являются форсунки двух типов - гидравлическая струйная с игольчатым рассекателем (рис. 3) и пневматическая.

Важным преимуществом гидравлической форсунки является то, что здесь не используется второй поток (сжатый воздух). Это упрощает экспериментальную отработку, и систему подачи и регулирования расхода.



Рис. 3. Струйная форсунка с рассекателем игольчатого типа

Однако при приемлемых параметрах распыла давление воды перед форсункой составляет до 20 МПа, а расход не более 10 г/с. Малый расход через форсунку и незначительные размеры факела распыла определяют необходимость введения в проточную часть воздухозаборного тракта трубной решетки, позволяющей равномерно распределить необходимое количество форсунок. Наличие такой решетки в проточной части является причиной дополнительных постоянных гидropотерь на входе воздуха в ГТП.

Значительные технологические сложности возникают также в процессе изготовления форсунки, в частности цилиндрического сопла диаметром 150...300 мкм. Любые нарушения формы отверстия ведут к искажению факела распыла. На этот параметр также влияет взаимное положение сопла и игольчатого рассекателя.

Малые проходные сечения форсунки делают обязательным введение в состав системы фильтров тонкой очистки. Наличие высоконапорного насоса также является фактором, осложняющим эксплуатацию РСО с форсункой данного типа.

Пневматические форсунки работают при давлении менее 0,5 МПа и характеризуются относительно большими проходными сечениями по воздуху и воде. Это позволяет обеспечить больший по сравнению со струйной форсункой еди-

ничный расход воды, тем самым сократив количество форсунок в составе РСО.

Большая дальнобойность пневматической форсунки (длина факела распыла) позволяет реализовать размещение выходного сечения форсунки заподлицо со стенкой воздухозаборного тракта. В результате воздухозаборный тракт не меняется и в выключенном состоянии РСО дополнительных потерь давления на входе в ГТП не создает. Снижается также вероятность выхода из строя форсунок вследствие засорения. Подключение форсунок к источникам сжатого воздуха и воды осуществляется снаружи шахты воздухозаборного тракта, что также упрощает обслуживание РСО.

Осложняет использование пневматических форсунок необходимость в сжатом воздухе. Включение в состав РСО отдельного компрессора с расходом не менее 12,5 м<sup>3</sup>/мин снижает надежность системы. Поэтому целесообразно брать сжатый воздух от компрессора ГТП, используя один из технологических отборов, предусмотренных его конструкцией.

Более предпочтительным является отбор воздуха из компрессора низкого давления (КНД), поскольку в пневматических форсунках достаточно иметь сжатый воздух умеренного давления. Однако в существующих ГТП семейства Д-336 этот ресурс ограничен и на стадии отработки РСО использоваться не может.

Более безопасно на данном этапе использовать отбор из компрессора высокого давления (КВД) для антиобледенительной системы. Перед пневматической форсункой давление воздуха понижается путем дросселирования, а температура снижается в теплообменнике. Его тепловая нагрузка соответствует испарению дополнительного расхода воды, составляющего примерно 20% от основного.

В результате экспериментов отработана конструкция пневматической форсунки с центральным газовым соплом и периферийной подачей воды. Дополнительное влияние на факел распыла оказывал завихритель, установленный в воздушное сопло. При приемлемом качестве распыла расход воды через единичную форсунку составил около 25 г/с.

### 3. Климатическая характеристика ГТП

Более предпочтительной для ГТП представляется РСО с пневматическими форсунками. Для ГТП Д-336-2 достаточно иметь 6 описанных выше форсунок. Воздухозаборный тракт не загромождается конструктивными элементами РСО, поскольку как сами форсунки, так и магистрали подвода воды и воздуха располагаются вне проточной части. Поэтому анализ эффективности ГТП с РСО выполнялся без учета дополнительных потерь в воздухозаборном тракте. Правомер-

ность такого допущения будет проверена в ходе предстоящих экспериментов. Причиной дополнительных гидрпотерь является взаимодействие основного потока воздуха с факелами распыла форсунок.

Влияние отбора воздуха из КВД на мощность ГТП Д-336-2 характеризуется следующими показателями. Отбор 0,6 кг/с воздуха (2% на номинальном расходе) приводит к потере мощности около 250 кВт (4% на номинальном расходе). При повышении температуры входного воздуха эти потери в процентном отношении растут, сохраняя свою величину в абсолютном значении.

Анализ проводился при давлении окружающего воздуха 0,101 МПа и фиксированной температуре газа перед рабочими лопатками турбины высокого давления, равной 1280 К. Частота враще-

ния свободной турбины составляла 7200 об/мин. Скорость воздуха на входе определялась по характеристикам привода Д-336-2 и заданной площади проходного сечения всасывающей шахты.

Результаты расчета климатической характеристики ГТП Д-336-2 с РСО для исходной относительной влажности 40% представлены на рис. 4. Расход воды в РСО задавался таким, чтобы недоохлаждение входного воздуха до состояния насыщения составило 1 К. На рисунке приведены также характеристики «сухого» (без ввода воды) ГТП.

Резкий «провал» мощности «сухого» ГТП при температуре 40...45 °С обусловлен открытием клапанов перепуска воздуха компрессора низкого давления. При использовании РСО такое регулирование не потребовалось.

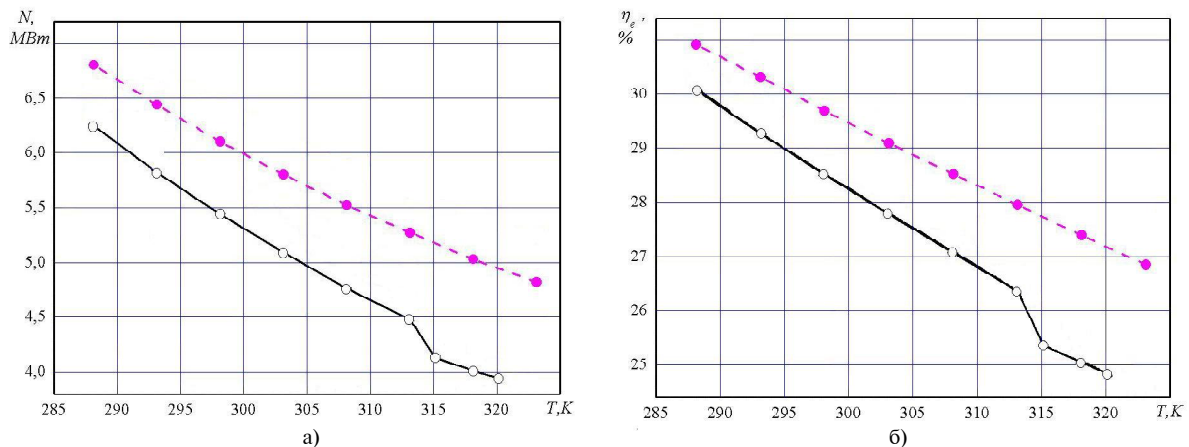


Рис. 4 Климатическая характеристика ГТП Д-336-2 с РСО на основе пневматических форсунок: относительная влажность воздуха  $\phi = 40\%$ ;  $\circ$  – исходный двигатель;  $\bullet$  – двигатель с РСО

## Выводы

Охлаждение циклового воздуха значительно увеличивает как мощность, так и эффективный КПД ГТП. Распылительные системы охлаждения по удельной стоимости и условиям эксплуатации являются наиболее приемлемыми для этих целей. Реализовать такие системы можно на основе как струйных, так и пневматических форсунок. Разработанные конструкции струйной и пневматической форсунок в результате проведения испытаний подтвердили возможность получения необходимой дисперсности распыла капель.

Преимуществами РСО с пневматическими форсунками являются меньшие гидравлические потери в воздухозаборном тракте и простота монтажа. Более привлекательны они и для условий эксплуатации на компрессорных станциях. Для подачи воды используются низконапорные насосы, воздух может отбираться от компрессора ГТП, а в выключенном состоянии РСО не ухудшает гидравлические характеристики воздухозаборного тракта.

Приведенные данные о затратах мощности на получение сжатого воздуха не характерны для распылительных систем охлаждения ГТП семейства Д-336, а обусловлены только доступным на этапе отработки технологии местом отбора воздуха. При давлении воздуха 0,3 МПа эти затраты не превышают 100 кВт. Отбор воздуха с таким давлением для нужд РСО следует предусматривать на этапе проектирования ГТП.

В целом полученные результаты позволяют обоснованно выбирать параметры РСО и ее элементов, обеспечить повышение эффективности любого ГТП при высокой температуре циклового воздуха за счет испарения мелкодисперсных капель воды.

## Перечень ссылок

1. Петухов И.И. 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.



2. Петухов И.И. Применение испарительных панелей для системы охлаждения входного воздуха газотурбинного привода/ И.И.Петухов, А.В. Минячихин, Ф.Г.Сорогин, Р.Ю.Турна // Авиационно-космическая техника и технология. - 2006.- №7(33). - С.21-24.

3. Turbine Inlet Cooling from Exhaust Heat by Aqua Absorption/ASHRAE CTIC Symposium 2004 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www.energy-concepts.com/pdfs/SYMP-00147-2003.pdf](http://www.energy-concepts.com/pdfs/SYMP-00147-2003.pdf)

4. Басов Ю.Ф. Распылительные системы охлаждения циклового воздуха газотурбинного привода и их эффективность / 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.

Поступила в редакцию 30.05.2011

**Ф.Г. Сорогин, Ю.Ф. Басов, П.Д. Жеманюк, В.П. Трофімов, А.В. Мінячихін, І.І. Петухов, Ю.В. Шахов. Аналіз ефективності ГТП Д-336-2 з розпилювальною системою охолодження циклового повітря**

*Розглянуто різні способи охолодження циклового повітря як засіб підвищення енергетичної ефективності газотурбінних приводів. Обґрунтовано переваги для цих цілей мелко-дисперсного розпилу охолоджуючої води при високій температурі вхідного повітря. У цьому випадку проточна частина приводу залишається без змін, а незначні доопрацювання виконуються тільки в повітрязабірному тракті. Визначено допустимі витрати води, переваги рідинної та пневматичної форсунок. Наводяться розрахункові дані про вплив розпилу води на вході в компресор на кліматичну характеристику газотурбінного приводу сімейства Д-336-2 з номінальною потужністю 6,3 МВт.*

**Ключові слова:** газотурбінний привід, циклове повітря, випарне охолодження, розпил води, кліматична характеристика.

**F.G. Sorogin, Y.F. Basov, P.D. Zhemanyuk, V.P. Trofimov, A.V. Minyachikhin, I.I. Petukhov, Y.V. Shakhov. Effectiveness analysis of the D-336-2 GTU with cyclic air evaporative fog cooling system**

*The different ways of the cycle air cooling as means of the GTU energy efficiency improving are considered. Cooling water atomization at high temperature inlet air advantages are substantiated for these purposes. GTU air-gas channel of the remains unchanged, but minor improvements are done only in the intake tract. The advantages of liquid and pneumatic nozzles and admissible water charge are defined. The calculated data on the water atomization at the compressor inlet influence on the 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, water fog, climate characteristics.