



DOI 10.5862/JEST.219.4

УДК 621.51

А.Л. Беркович, В.Г. Полищук, А.В. Назаренко

ФОРСИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ОПТИМАЛЬНЫМ ВПРЫСКОМ ВОДЫ В КОМПРЕССОР

A.L. Berkovich, V.G. Polischuk, A.V. Nazarenko

BOOSTING GAS TURBINE POWER PLANTS THROUGH OPTIMAL WATER INJECTION INTO COMPRESSOR

Статья посвящена решению важнейших вопросов газотурбостроения — улучшению показателей работы ГТУ, снижению энергопотребления на привод отдельных компрессоров и повышению их производительности за счет использования впрыска воды в компрессор. Приводится краткое описание комплекса разработанных в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого программ расчета параметров работы газотурбинной установки с впрыском воды в компрессор. Представлены результаты расчетных исследований влияния впрыска на параметры газотурбинной установки ГТК-10. Полученные результаты позволяют организовать оптимальный впрыск как для испарительного охлаждения воздуха в процессе его сжатия, так и для промывки компрессора «на ходу» и снижения окислов азота в уходящих газах. Разработанная программа апробирована в широком диапазоне мощностных характеристик газотурбинных установок, на которых проводились натурные и экспериментальные исследования. Результаты расчетов имеют хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований.

ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА; КОМПРЕССОР; ВПРЫСК ВОДЫ; МОЩНОСТЬ; ЭКОНОМИЧНОСТЬ; ОПТИМИЗАЦИЯ ВПРЫСКА; ПРОМЫВКА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА; ОКИСЛЫ АЗОТА.

The article is dedicated to one of the most important issues of the gas turbine industry – improvement of gas turbine power plant performance, reduction in power consumption for the drive of separate compressors and increase in their productivity through the use of water injection into the compressor. The article provides brief description of a set of parameter calculation programs for the gas turbine power plant performance with compressor-inlet water injection. The complex was developed at St. Petersburg State Polytechnic University. Certain results of the computational study of injection effects on GTK-10 gas turbine are presented to illustrate possibilities of the complex application. The obtained results enable organizing the best option to use injection as for the evaporative cooler during air compression as for the online compressor water wash; and also to control nitrogen oxide emission in exhaust gases. The program, developed by the authors, is tested on a wide range of power characteristics of gas turbines, which are used in full-scale and experimental studies. The calculation results showed good agreement with experimental results.

GAS TURBINE POWER PLANT; COMPRESSOR; WATER INJECTION; POWER; EFFICIENCY; OPTIMIZATION OF FUEL INJECTION; COMPRESSOR BLADES FLUSHING; NITROGEN OXIDES.

Введение

Исследования по впрыску воды перед компрессором и в его проточную часть получили широкое распространение в мировой энергетике как один из весьма эффективных способов улучшения параметров работы газотурбинных установок (ГТУ). Положительное

воздействие впрыска обусловлено увеличением мощности и коэффициента полезного действия (КПД) ГТУ вследствие испарительного охлаждения воздуха в процессе его сжатия в компрессоре, промывки лопаток компрессора от отложений и уменьшения выбросов окислов азота NO_x с уходящими газами (см. например [1–3]).

Организация впрыска воды с максимальной его эффективностью требует разработки расчетных методов, позволяющих детально изучить процессы движения и испарения воды и их влияние на параметры компрессора и ГТУ в целом. Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого (СПбПУ) накоплен значительный опыт применения впрыска воды в компрессоры натуральных ГТУ и создан экспериментально апробированный комплекс программ, позволяющий выполнять расчеты процессов движения и испарения воды, влияния их на параметры работы компрессора и ГТУ в целом.

Цель работы — с помощью усовершенствования разработанного авторами ранее комплекса программ для расчета термодинамических и экологических характеристик газотурбинной установки показать возможности улучшения показателей установок при организации оптимального впрыска воды на входе в компрессор и в его проточную часть.

Расчетные исследования по программе

В статье представлены основные положения программ, разработанных в СПбПУ [5–7]. Базовой является программа расчетов процессов движения и испарения капель воды в потоке воздуха в проточной части компрессора; в основу этих расчетов положены дифференциальные уравнения для трехмерного пространства, заимствованные из [4].

Расчеты выполнялись в общепринятой цилиндрической системе координат с осью вращения вдоль оси компрессора. По ходу расчетов определялись окружные, радиальные и осевые величины скоростей капель. В процессе решения системы уравнений находились скорости, координаты в трехмерном потоке воздуха, количество воды, испарившейся с поверхности капель и смоченных поверхностей проточной части компрессора, количество капель, осевших на лопатки и корпус компрессора.

Наличие воды в проточной части компрессора является причиной появления дополнительных потерь энергии потока воздуха, связанных с разгоном капель и перемещением пленки на поверхностях лопаток и корпуса, и торможения лопаток рабочих колес ударяющимися о них каплями. Оценка величины этих потерь также была выполнена в данной программе.

Разработанный комплекс программ включает в себя также систему уравнений, позволяющих вычислить параметры компрессора при наличии воды в проточной части. Расчет производится последовательно по ступеням компрессора при постоянных частотах вращения. В расчете учитываются изменение как коэффициента расхода ступеней из-за водоиспарительного охлаждения и, как следствие, коэффициентов напора и КПД ступеней, так и дополнительные потери от влажности. В конце расчетов определяется общая степень повышения давления и КПД компрессора. При этом выражение для КПД компрессора h_k имеет вид

$$h_k = (l_{2s} - l_1) / (l_2 - l_1 + G_{исп} r) l,$$

где l_1 — энтальпия воздуха перед компрессором; l_2 — то же за компрессором; l_{2s} — то же за компрессором при изоэнтропическом сжатии воздуха; $G_{исп}$ — количество испарившейся воды в компрессоре, отнесенное к 1 кг воздуха; r — скрытая теплота парообразования воды.

В дополнение к описанным выше программам были разработаны следующие:

программа для вычисления траектории движения струи воды в потоке газа, ее длины и диаметров капель, образующихся после распада струи. Программа необходима для проектирования струйного впрыска воды в проточную часть компрессора;

программы для оценки степени эрозии и вибрации лопаток компрессора, а также возможности задевания ими корпуса компрессора;

программа для определения параметров работы газотурбинного цикла с впрыском воды в компрессор при заданной температуре газов перед турбиной.

Расчеты по указанным программам были выполнены для ряда ГТУ различного типа [8]. В статье представлены основные результаты расчета параметров работы установки ГТК-10-4, широко применяемой на магистральных газопроводах, с помощью усовершенствованного разработанного авторами ранее комплекса программ расчетов термодинамических и экологических характеристик ГТУ. Компрессор установки ГТК-10-4 состоит из 10 ступеней. Расход воздуха через компрессор — 86 кг/с; степень повышения давления — 4,6; частота вращения — 5200 оборотов в минуту. Установка снабжена регенератором.

Расчеты оптимального впрыска воды в компрессор выполнялись для следующих случаев :

- для различных количеств воды $G_{\text{впр}}$;
- перед различными ступенями $N_{\text{ст}}$ компрессора;

- для капель различного размера, в том числе и для очень малых (менее 1 мкм), образующихся при распыле перегретой воды;

- при разной относительной высоте смоченной части лопаток в месте ввода воды — $H = 0,5-0,9$.

В качестве возможных мест ввода воды рассматривались впрыски перед лопаточным аппаратом компрессора и в направляющие аппараты 3 и 7 ступеней. Эти места впрыска конструктивно доступны для установки устройств впрыска. Величина H в месте впрыска является отношением смоченной части высоты лопаток, отсчитываемой от их корня, к полной высоте лопаток. По ходу движения влаги величина H вычисляется с учетом радиального смещения капель в нижней и верхней смоченных частях лопаток.

Расчеты производились на кафедре турбогенераторов и авиационных двигателей (ТГиАД) СПбПУ. Результаты расчетов подробно приведены в [9]. Основные результаты расчетов следующие.

До момента сепарации капель от верхней части смоченной высоты лопаток на корпус компрессора величина H остается неизменной, так как траектории указанных капель практически одинаковы и смещены по высоте лопаток. После указанной сепарации H уменьшается, потому что верхняя граница смоченной части лопаток ограничена корпусом компрессора, а нижняя — смещается вверх из-за движения капель в радиальном направлении (рис. 1).

В компрессоре установки ГТК-10 испарение воды происходит преимущественно с поверхности лопаточных аппаратов. Влияние дисперсности впрыскиваемой воды согласно результатам расчетов практически отсутствует. Это объясняется интенсивной сепарацией капель всех размеров на лопатки компрессора. Далее по потоку воздуха их размер и поведение определяется только процессами дробления стекающих с лопаток пленок и срывом капель с поверхности лопаток, которые одинаковы для всех сепарировавшихся капель.

Количество испарившейся воды в ступенях компрессора установки ГТК-10 при впрыске в различные ступени разного количества воды показано на рис. 2. Максимальное количество испарившейся воды наблюдается в случае впрыска в третью ступень компрессора. Меньшее значение $G_{\text{исп}}$ в случае впрыска перед лопатками компрессора связано с плохой испаряемостью из-за невысокой температуры воздуха и интенсивной сепарацией воды на корпус компрессора. Впрыскиваемая же в седьмую ступень вода по сравнению с впрыском в третью попадает в зону более высоких температур воздуха и подвержена меньшей сепарации на корпус компрессора. Однако из-за меньшего количества ступеней, оставшихся до конца проточной части, окончательная величина $G_{\text{исп}}$ остается примерно той же.

Впрыск воды в проточную часть компрессора вызывает существенное снижение температуры воздуха за ним — 23–24 °С на каждый процент впрыскиваемой воды. Вместе с тем такое снижение температуры увеличивает температурный напор в регенераторе, что существенно интенсифицирует процесс теплообмена в нем. В результате более глубоко утилизируется тепло уходящих газов. Температура же воздуха за регенератором вследствие этого снижается в значительно меньшей степени, чем за компрессором — на 13–15 °С при $G_{\text{впр}} = 1\%$. Это обстоятельство важно для увеличения КПД установки.

Результаты расчетов по количеству испарившейся воды, по дополнительным потерям от влажности и по другим параметрам воздуха использовались для расчета параметров работы отдельных ступеней. В этом расчете находились изменения коэффициентов расхода, напора и КПД ступеней, вызываемые впрыском воды. Затем определялись параметры компрессора в целом. В результате впрыска воды изодромы компрессора смещались в сторону более высоких степеней повышения давления и расходов.

Впрыск воды в компрессор вследствие испарительного охлаждения воздуха в процессе его сжатия заметно повышает КПД компрессора, а соответственно, КПД и мощность установки. На рис. 3 и 4 показаны относительные изменения КПД и мощности установки в результате впрыска воды в различные места проточной ча-

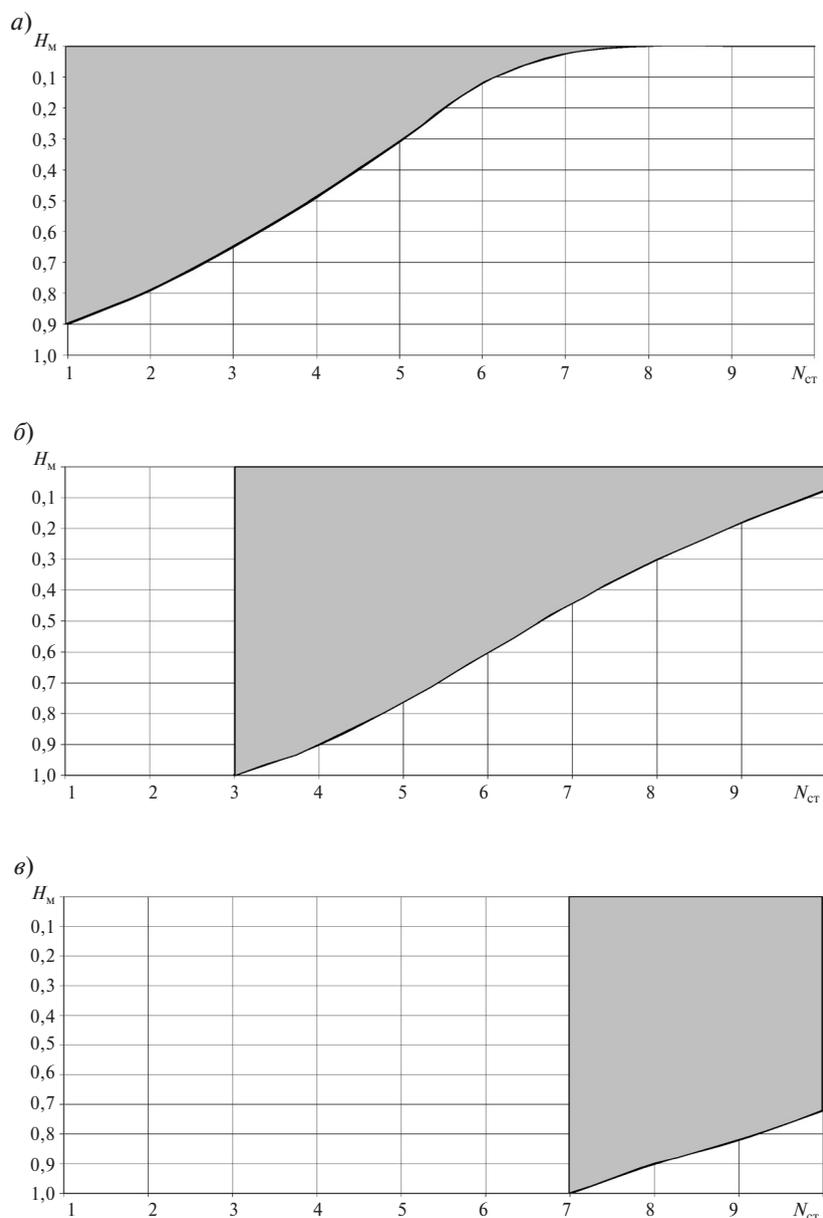


Рис. 1. Распределение относительной величины смачиваемой части лопаток H_M (заштрихованная область) по ступеням N_{CT} компрессора установки ГТК-10: а — впрыск перед компрессором; б — впрыск в 3 ступень; в — впрыск в 7 ступень

сти компрессора при температуре наружного воздуха $T_{нв} = 15^\circ\text{C}$. Максимальная эффективность впрыска воды перед входным направляющим аппаратом (ВНА) компрессора имеет место при $G_{впр} = 0,2-0,3\%$. Здесь относительный прирост КПД установки — $dh_e = 1,65\%$, полезной мощности — $hN_e = 6,3\%$. При впрыске воды в направляющий аппарат 3 ступени (НА-3) прирост КПД установки достигает 1,2% относитель-

ного, что происходит при $G_{впр} = 0,4\%$. Относительный прирост полезной мощности остается примерно тем же. Если впрыск воды осуществляется в направляющий аппарат 7 ступени (НА-5), то прирост КПД установки достигает 0,4% относительных при $G_{впр} = 0,6\%$, прирост мощности — 4,2%.

В установках, параметры работы которых меньше номинальных (например, из-за трещин

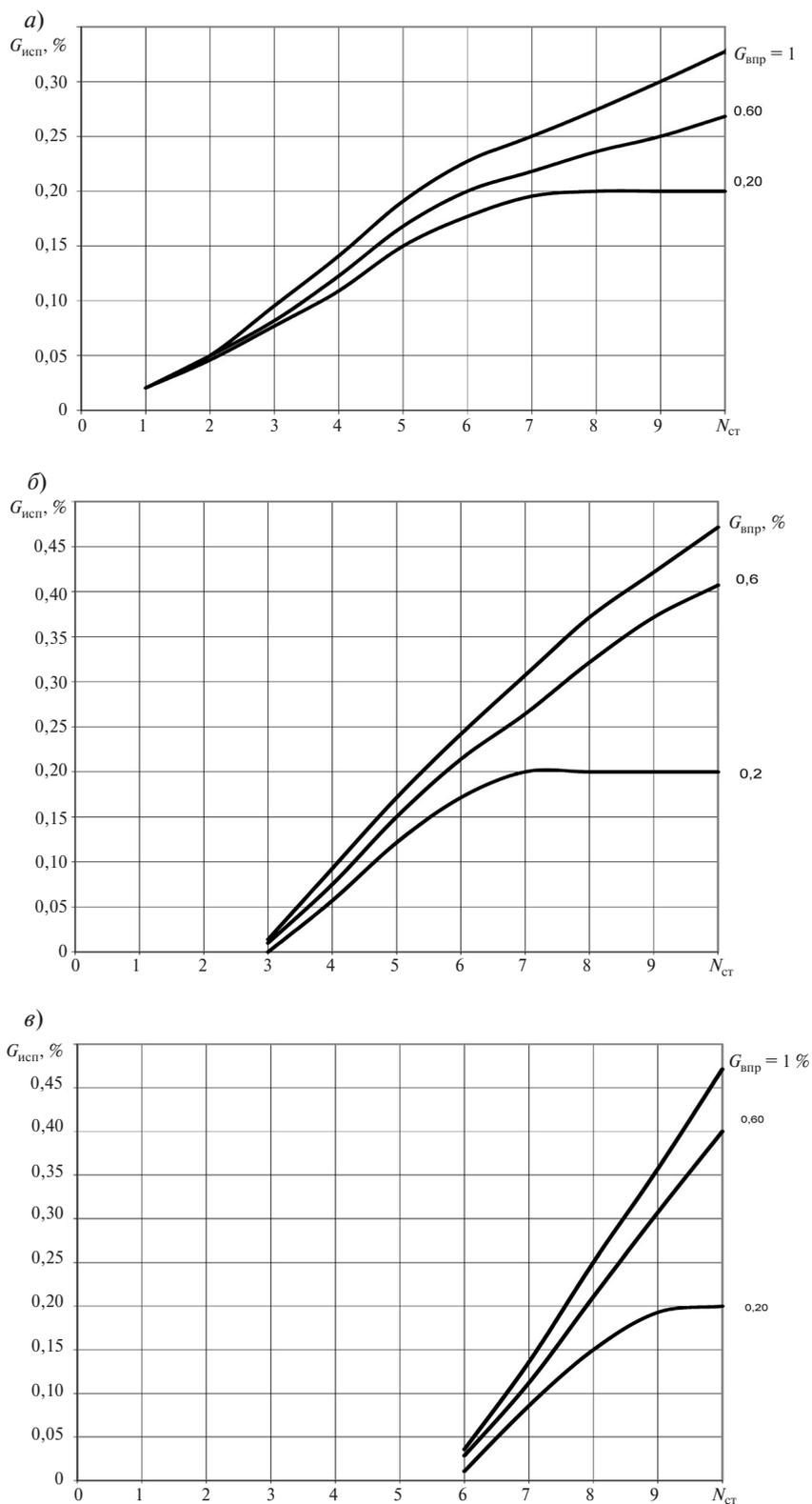


Рис. 2. Распределение количества испарившейся воды $G_{исп}$ по ступеням $N_{ст}$ при впрыске различного количества воды $G_{впр}$ в первую (а), в третью (б) и в седьмую (в) ступени компрессора установки ГТК-10

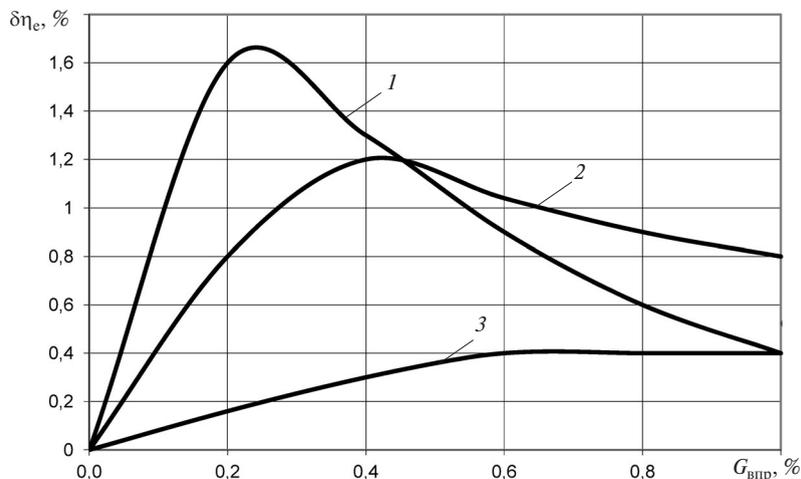


Рис. 3. Зависимости относительного изменения эффективного КПД установки ГТК-10–4 от количества впрыскиваемой воды в разные места проточной части компрессора: 1 — впрыск перед ВНА; 2 — впрыск в НА третьей ступени; 3 — впрыск в НА седьмой ступени

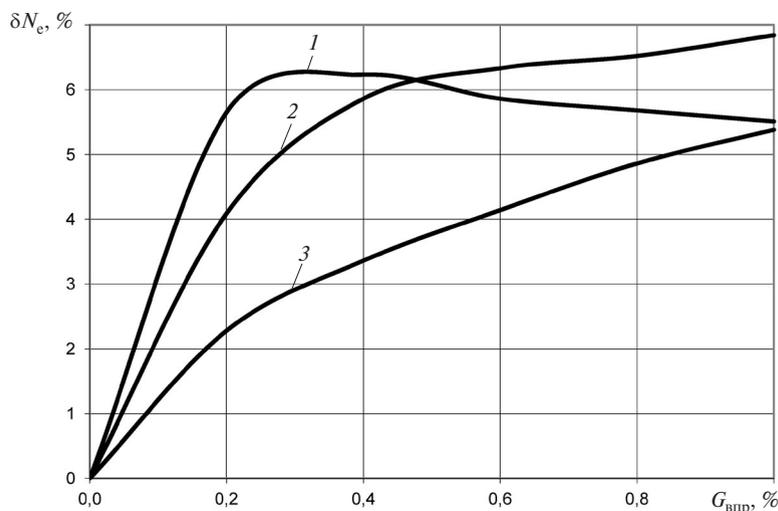


Рис. 4. Зависимость относительного изменения полезной мощности установки ГТК-10–4 от количества впрыскиваемой воды в разные места проточной части компрессора: 1 — впрыск перед ВНА; 2 — впрыск в НА третьей ступени; 3 — впрыск в НА седьмой ступени

в регенераторе, высоких температур наружного воздуха и др.), следует ожидать большего положительного воздействия впрыска. Приращения мощности и КПД в этом случае могут быть в 1,5–2 раза выше указанных.

В случае впрыска в промежуточные ступени более высокая плотность воздуха обуславливает снижение степени сепарации капель на корпус

компрессора и меньший размер капель, образующихся после дробления пленки, стекающей с выходных кромок лопаток. По этим причинам интенсивность испарения воды в проточной части увеличивается. Не успевшая испариться вода в виде пленки на корпусе компрессора вытекает из лопаточного аппарата и испаряется по пути воздуха в регенератор.

Выводы

Программы расчетов, разработанные в СПбПУ, позволяют дать рекомендации по оптимальному впрыску воды в проточную часть компрессора различной конструкции. Оптимизация впрыска имеет следующие цели:

получить максимально возможное приращение мощности и коэффициента полезного действия установки. Так, например, в установке ГТК-10 одновременный впрыск оптимального количества воды перед компрессором, в 3 и 7 ступени компрессора увеличивает КПД установки на 3,2 %, мощность — на 16,8 %. Общее количество впрыскиваемой воды при этом составляет 1,2 % от расхода воздуха;

достичь более полной промывки поверхностей лопаток компрессора «на ходу», без останова работы установки. В данном случае возможна промывка всех ступеней компрессора:

правильно выбрать устройства для ввода воды в различные ступени компрессора. Рекомендуется впрыск воды осуществлять через отверстия в корпусе компрессора, ориентированные способом, описанным в работе [8];

уменьшить опасность эрозии и вибрацию лопаток компрессора, а также задевание рабочими лопатками корпуса компрессора;

оценить снижение коэффициента запаса по помпажу компрессора, происходящего при впрыске воды;

определить степень уменьшения содержания окислов азота в уходящих газах ГТУ с указанным впрыском воды;

на основе анализа работоспособности различных ГТУ с впрыском воды в компрессор выявить требования к качеству впрыскиваемой воды и представить необходимую для этого химическую водоподготовку [9].

Изложенные в работе [9] материалы показывают, как с помощью разработанного комплекса программ может быть существенно повышена эффективность впрыска воды в компрессор ГТУ.

Подобные расчетные исследования должны проводиться индивидуально для каждого типа ГТУ и условий ее работы. Из известных публикаций о подобных исследованиях можно указать работу [10].

К настоящему времени комплекс программ расчета, разработанных на кафедре ТГиАД, прошел дальнейшую оптимизацию. Это позволяет более точно выбрать места установки устройств впрыска воды в проточную часть компрессора, а также уточнить расходы впрыскиваемой через них воды. Выполненная оптимизация впрыска воды в компрессор позволяет увеличить мощность и КПД ГТУ не только за счет повышения интенсивности испарительного охлаждения воздуха в процессе его сжатия в компрессоре, но и вследствие промывки от отложений большей площади лопаток компрессора во время его работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III).** Inlet fogging of gas turbine engines. Pt I. Fog droplet thermodynamics, heat transfer, and practical considerations // *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power.* 2004. Vol. 126, №3. P. 545–558.
2. **Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III).** Inlet fogging of gas turbine engines. Pt II. Fog droplet sizing analysis, nozzle types, measurement, and testing // *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power.* 2004. Vol. 126, №3, P. 559–570.
3. **Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III).** Inlet fogging of gas turbine engines. Pt III. Fog behavior in inlet ducts, computational fluid dynamics analysis and wind tunnel experiments // *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power.* 2004. Vol. 126, №3, P. 571–580.
4. **Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В., Бородачев В.Я., Волинский М.С., Прудников А.Г.** Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1964. С. 526.
5. **Беркович А.Л., Розеноер Е.Е.** Форсировка ГТУ впрыском воды в компрессор, Обзор / М.: ЦНИИ-ТЭИТЯЖМАШ // *Энергетическое машиностроение.* Сер. 3. 1989. Вып. 4. С. 36.
6. **Беркович А.Л., Розеноер Е.Е.** Расчет параметров осевого компрессора с впрыском воды в проточную часть // *Изв. вуз. Энергетика.* 1990. № 8. С. 107–110.
7. **Беркович А.Л.** Параметры осевого компрессора с вводом воды в проточную часть // *Изв. вузов. Энергетика.* 1995. № 1. С. 67–70.
8. **Беркович А.Л., Полищук В.Г., Канащенко Е.М.** Впрыск воды в компрессор газотурбинной установки ГТК-10–4 // *Компрессорная техника и пневматика.* 2007. №5. С. 34–37.
9. **Беркович А.Л., Полищук В.Г., Рассохин В.А.**

Впрыск воды в компрессор ГТУ., Изд-во СПбГПУ, 2010. 155 с.

10. Григорьянц Р.Р., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А. [и др.]. Особенности поведения жидкой

фазы в высокооборотных компрессорах в конверсионных газотурбинных установках и их влияние на характеристики и эффективность «влажного» сжатия // Теплоэнергетика. 2007. №4. С. 55–62.

REFERENCES

1. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines. Pt I. Fog droplet thermodynamics, heat transfer, and practical considerations. *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power*. 2004. Vol. 126, №3. P. 545–558.

2. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines. Pt II. Fog droplet sizing analysis, nozzle types, measurement, and testing. *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power*. 2004. Vol. 126, №3. P. 559–570.

3. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines. Pt III. Fog behavior in inlet ducts, computational fluid dynamics analysis and wind tunnel experiments. *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power*. 2004. Vol. 126, №3. P.571–580.

4. Raushenbakh B.V., Belyy S. A., Bespalov I.V., Borodachev V.Ya., Volynskiy M.S., Prudnikov A.G. Fizicheskiye osnovy rabocheho protsessa v kamerakh sgoraniya vozduшно-reaktivnykh dvigateley [Physical fundamentals of working process in the combustion chambers of jet engines]. М.: Mashinostroyeniye, 1964. S. 526. (rus.)

5. Berkovich A.L., Rozenoyer Ye.Ye. Forsirovka GTU vpryskom vody v kompressor, Obzor. [Forcing GTU water injection into the compressor, Overview] TsNIITEITY-aZhMASH. *Energeticheskoye mashinostroyeniye*. Seriya 3. М., 1989. Вып. 4. S. 36.

6. Berkovich A.L., Rozenoyer Ye.Ye. Raschet parametrov oseвого kompressora s vpryskom vody v protochnuyu chast [Dimensioning axial compressor with water injection into the flow part. Math]. *Izv. vuzov, Energetika*, 1990. № 8. S. 107–110. (rus.)

7. Berkovich A.L. Parametry oseвого kompressora s vdom vody v protochnuyu chast [The parameters of the axial compressor with the introduction of water into the flow part], *Izv. vuzov, Energetika*. 1995. № 1. S. 67–70. (rus.)

8. Berkovich A.L., Polishchuk V.G., Kanashenko Ye.M. Vprysk vody v kompressor gazoturbinoy ustanovki GTK-10–4 [Water injection into the compressor gas turbine unit SCC-10–4]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. 2007. №5. S. 34–37/ (rus.)

9. Berkovich A.L., Polishchuk V.G., Rassokhin V.A. Vprysk vody v kompressor GTU [water injection into the gas turbine compressor]. Izd-vo Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politekhicheskogo Universiteta, 2010. S. 155. (rus.)

10. Grigoryants R.R., Zalkind V.I., Zeygarnik Yu.A. [и др.]. Osobennosti povedeniya zhidkoy fazy v vysokoborotnykh kompressorakh v konversionnykh gazoturbinykh ustanovok i ikh vliyaniye na kharakteristiki i effektivnost «vlazhnogo» szhatiya [Peculiarities of the behavior of the liquid phase in the high-speed compressors in conversion gas turbines and their impact on performance and efficiency, «wet» compression]. *Teploenergetika*. 2007. №4. S. 55–62. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕРКОВИЧ Аркадий Львович — кандидат технических наук ведущий инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: arkadij.berkovitch@yandex.ru

ПОЛИЩУК Владимир Григорьевич — кандидат технических наук доцент заведующий лабораторией Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: turbo@pef.spbstu.ru

НАЗАРЕНКО Андрей Владиславович — кандидат технических наук, технический директор ООО КОНСТА-XXI. Москва, улица Зои и Александра Космодемьянских д. 10. E-mail: turbo@pef.spbstu.ru

AUTHORS

BERKOVICH Arkadii L. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: arkadij.berkovitch@yandex.ru

POLISCHUK Vladimir G. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: turbo@pef.spbstu.ru

NAZARENKO Andrei V. — ООО KONSTA-XXI. Moskva, ulica Zoi i Aleksandra Kosmodemjanskih d. 10. E-mail: turbo@pef.spbstu.ru