

УДК 621.452.3

Л. Г. БОЙКО, В. А. ДАЦЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА ПАРАМЕТРЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Получена математическая модель турбовального газотурбинного двигателя с двухкаскадным газогенератором, опирающаяся на повенцовое описание многоступенчатого компрессора, позволяющая оценить влияние влажности воздуха на его эксплуатационные характеристики. Выполнено сравнение характеристик осевого многоступенчатого компрессора при наличии влажной составляющей в воздухе на входе в двигатель и при ее отсутствии. Показан характер изменения основных параметров газотурбинного двигателя при наличии влагосодержания, выполнена количественная оценка.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, влагосодержание, математическая модель, осевой многоступенчатый компрессор.

Введение

Газотурбинные двигатели (ГТД) находят широкое применение в авиации, наземных установках для транспорта природного газа, а также в энергетике и многих других отраслях промышленности. В связи с этим, они могут работать в различных климатических условиях. При их эксплуатации нужно учитывать влияние параметров рабочего тела на входе в ГТД. Одним из таких параметров является влажность воздуха.

Влага, попадающая в проточную часть двигателя, претерпевает фазовые превращения. Частично испаряясь, с повышением температуры в компрессоре она образует смесь сухого воздуха с ненасыщенным паром. Далее на выходе из камеры сгорания влагосодержание рабочего тела увеличивается за счет водяного пара, содержащегося в перегретом состоянии в продуктах сгорания. Его количество будет изменяться в соответствии с режимом работы ГТД и расходом подводимого топлива. Состояние водяного пара в турбине будет зависеть от параметров ее рабочего процесса.

Очевидно, что детальное описание термогазодинамических процессов образования парогазовой смеси и изменения ее состояния в тракте газотурбинного двигателя представляется достаточно сложным.

В соответствии с имеющимися публикациями [1 – 4] учет влияния влажности проводится с помощью полуэмпирических соотношений, позволяющих корректировать величину приведенных параметров двигателя в зависимости от значений газовых постоянных и массовых долей сухого и влажного воздуха в смеси на входе в двигатель. Так в рабо-

те [1] вводятся поправки к частоте вращения ротора. В работе [2] для учета влияния влажности предложены корректировочные коэффициенты к величинам приведенных значений расхода воздуха и частоты вращения, учитывающие различия в значениях показателей изоэнтропии и газовых постоянных для сухого воздуха и паров воды.

Повышение значения газовой постоянной ведет к увеличению скорости звука, снижению чисел Маха потока и приведенной частоты вращения ротора. Следствием этого при изменении плотности потока на входе является снижение степени повышения давления и КПД компрессора, а также уменьшение тяги или мощности в зависимости от типа ГТД.

В исследовании [3] для анализа проявления влажности воздуха использовалась система имитационного моделирования рабочих процессов в газотурбинных двигателях и энергетических установках DVIgWT. Ссылаясь на геометрическое и кинематическое подобие лопаточных машин, автор рассчитывает зависимости путем введения поправочных коэффициентов к критериям подобия для компрессоров и турбин. В используемом подходе при определении характеристик лопаточных машин не учитываются их геометрические параметры и в случае отсутствия опытных данных используются обобщения, что не позволяет в полной мере провести детальный анализ физических процессов в данных узлах.

В работе [5] при математическом моделировании характеристик компрессора установлено, что их напорные ветви при работе на влажном воздухе смещаются в сторону уменьшенных расходов. Однако влияние влажности на двигатель в целом не рассмотрено.

Цель работы: исследование влияния влажности воздуха на параметры газотурбинного двигателя.

Постановка задачи и ее решение

В связи с вышесказанным возникает необходимость разработки метода расчета, позволяющего оценить влияние влажности воздуха на характеристики ГТД, опираясь на геометрические и газодинамические параметры его узлов.

Для использования в качестве объекта исследования разработан эскизный проект турбовального газотурбинного двигателя с двухкаскадным газогенератором, имеющего следующие параметры:

- эффективная мощность $N_e=17,6$ МВт;
- суммарная степень повышения давления в компрессоре $\pi_k^*=19,7$, степень повышения давления компрессора низкого давления (КНД) $\pi_{к\text{ ннд}}^*=4,47$, степень повышения давления компрессора высокого давления (КВД) $\pi_{к\text{ влд}}^*=4,45$;
- температура газа перед турбиной $T_T^*=1362$ К;
- расход воздуха $G_B=70,0$ кг/с.

Схема двигателя представлена на рисунке 1.

Целью данного исследования является разработка метода моделирования термогазодинамических параметров и эксплуатационных характеристик газотурбинного двигателя, позволяющего оценить влияние влажности воздуха на входе, с учетом геометрических параметров компрессорных машин, полученных при проектировании.

Для определения параметров ГТД использована поузловая математическая модель, разработанная в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Для описания процессов в многоступенчатых компрессорах низкого и высокого давления применен повенцовый подход [6]. Там же представлены модели других узлов ГТД.

Математическая модель осевого многоступенчатого компрессора является составной частью общей модели газотурбинного двигателя.

Расчет характеристик компрессоров низкого и

высокого давления выполняется с помощью методов поверочного повенцового расчета дозвукового течения по среднемассовым параметрам, построенного на основе метода расчета двумерного течения в многоступенчатых компрессорах, использованного ранее в работе [7].

При расчете течения в многоступенчатом осевом компрессоре делаются следующие допущения:

- геометрические параметры решеток профилей задаются на среднегеометрическом радиусе;
- не учитывается теплообмен между рабочим телом и конструктивными элементами проточной части;
- эффекты вязкости течения в межлопаточных каналах учитываются с помощью коэффициентов потерь давления и углов отставания, определяемых на основании обобщенных полуэмпирических зависимостей.

В качестве исходных данных задаются геометрические параметры лопаточных венцов (входного направляющего аппарата, рабочих колес и направляющих аппаратов): конструктивные углы лопаток на входе и выходе $\beta_{1л}$, $\beta_{1л'}$ ($\alpha_{2л}$, $\alpha_{3л}$), угол установки профиля γ , хорда профиля b , максимальная толщина профиля S_{max} , координата положения максимальной толщины вдоль хорды X_c , форма средней линии профиля, число лопаток $Z_{л}$, радиальный зазор $\Delta r_{р. \text{ заз}}$ и др., а также параметры рабочего тела на входе в компрессор.

Метод расчета параметров многоступенчатого осевого компрессора дает возможность на основании заданной геометрии проточной части и лопаточных венцов определить:

- параметры потока на среднем радиусе за венцами компрессора в широком диапазоне режимов;
- суммарные характеристики ступеней, групп ступеней и компрессора в целом;
- влияние изменения геометрических параметров венцов, в том числе поворотных направляющих аппаратов, и проточной части на суммарные характеристики венцов и компрессора в целом;

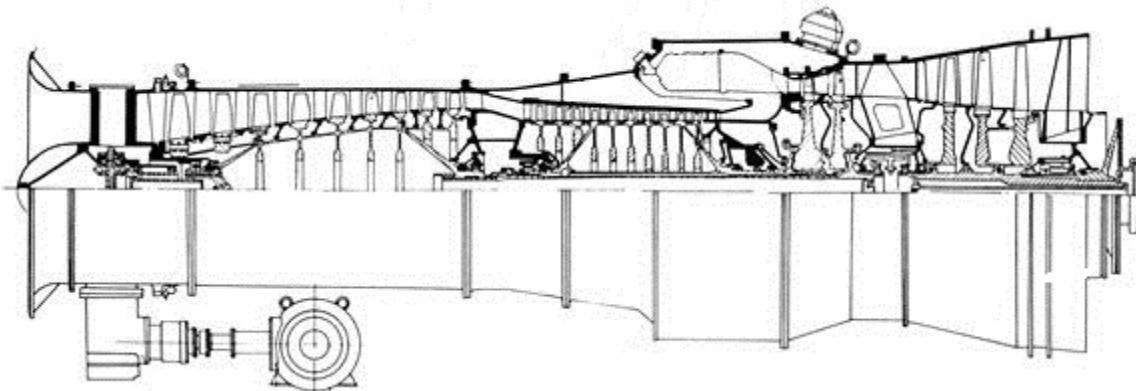


Рис. 1. Схема газотурбинного двигателя

– влияние изменения расхода отбираемого (перепускаемого) воздуха из проточной части на параметры потока за лопаточными венцами, характеристики ступеней и характеристики многоступенчатого компрессора.

Параметры влажного воздуха определяются с учетом значений газовых постоянных и массовых долей водяного пара и сухого воздуха в нем.

Результаты расчета

Результат расчета характеристик девятиступенчатого компрессора низкого давления и десятиступенчатого компрессора высокого давления при стандартных атмосферных условиях на входе и влагосодержании $d=0,04$ представлены на рисунках 2, 3, где $\bar{n}_{пр.} = n_{пр.} / n_{пр.р.}$, $\bar{G}_{впр.} = G_{впр.} / G_{впр.р.}$ –

относительные приведенные к стандартным атмосферным условиям значения частоты вращения и расхода воздуха.

Из графиков следует, что при увеличении влагосодержания напорные ветви на характеристиках смещаются в сторону меньших расходов. При этом на расчетном режиме КНД степень повышения давления падает на 14,1%. Для КВД на расчетном режиме степень повышения давления снижается на 15,2%.

Для количественной оценки влияния влажности воздуха на параметры ГТД используется математическая модель двигателя с повенцовым описанием компрессора и его характеристик. На рисунках 4...6 показаны зависимости удельного расхода топлива C_e , КПД η_e , мощности N_e от приведенных значений частоты вращения $\bar{n}_{пр.}$

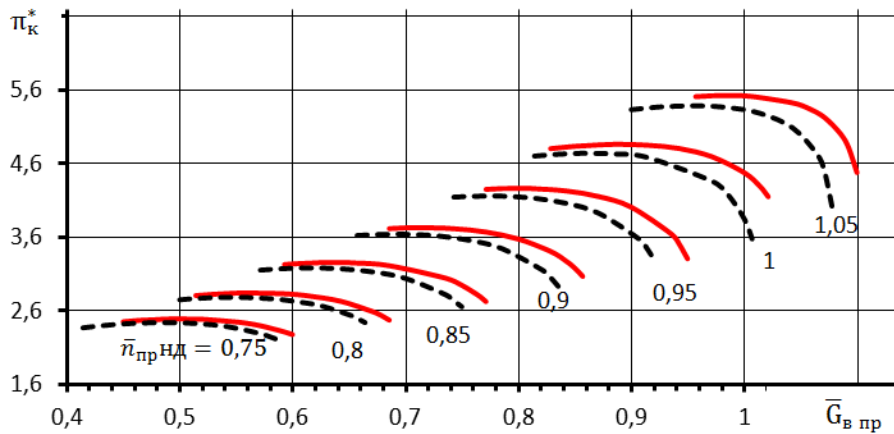


Рис. 2. Изменение степени повышения давления КНД в зависимости от приведенных значений расхода и частоты вращения при различных значениях влагосодержания: $d=0$ - —, $d=0,04$ - - - - -

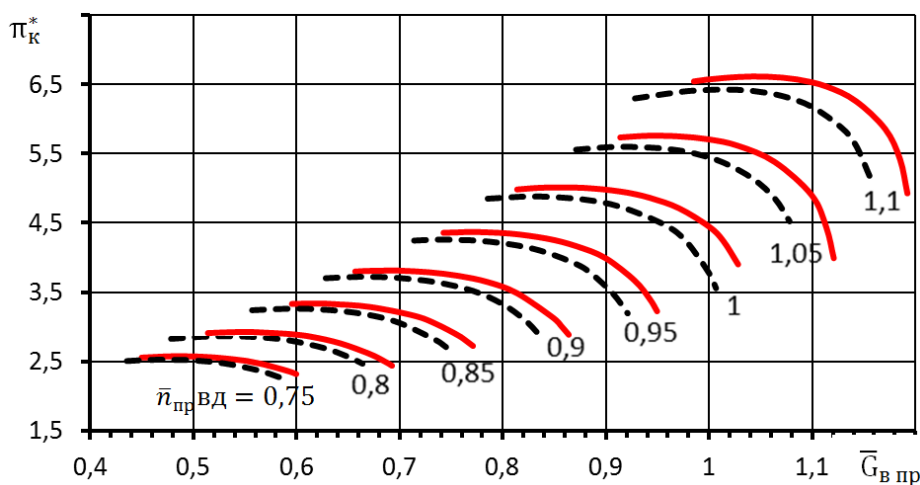


Рис. 3. Изменение степени повышения давления КВД в зависимости от приведенных значений расхода и частоты вращения при различных значениях влагосодержания: $d=0$ - —, $d=0,04$ - - - - -

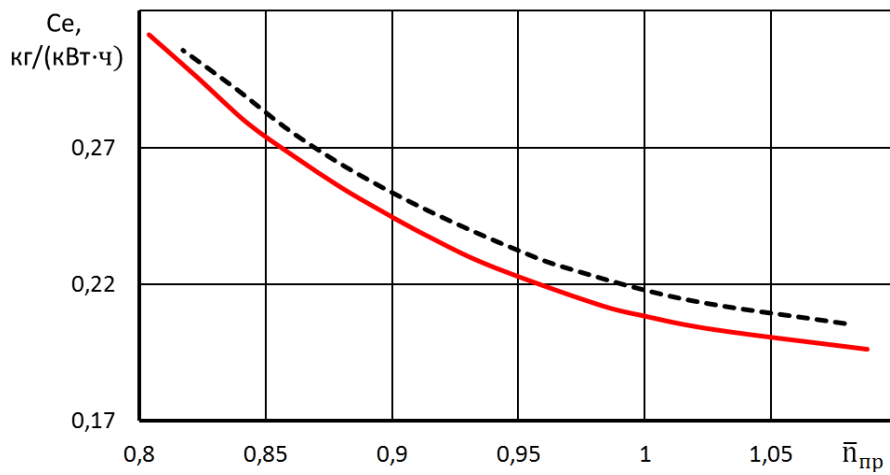


Рис. 4. Зависимость удельного расхода топлива от приведенной частоты вращения при различных значениях влагосодержания: $d=0$ - —, $d=0,04$ - - - - -

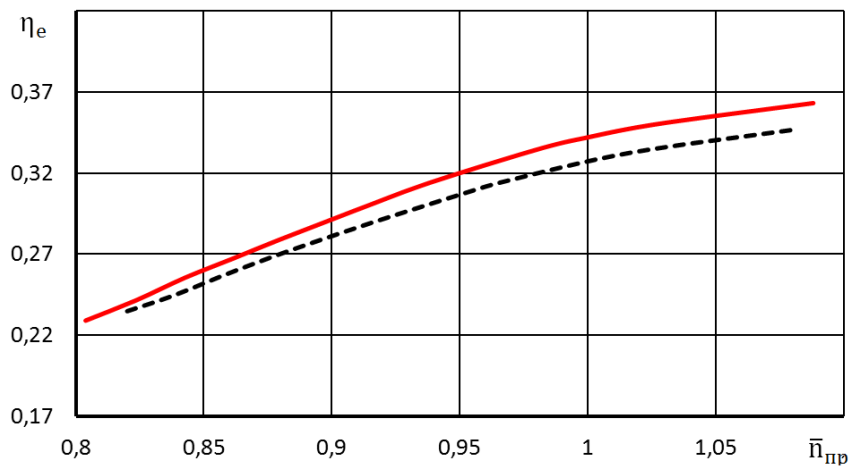


Рис. 5. Зависимость КПД газотурбинного двигателя от приведенной частоты вращения при различных значениях влагосодержания: $d=0$ - —, $d=0,04$ - - - - -

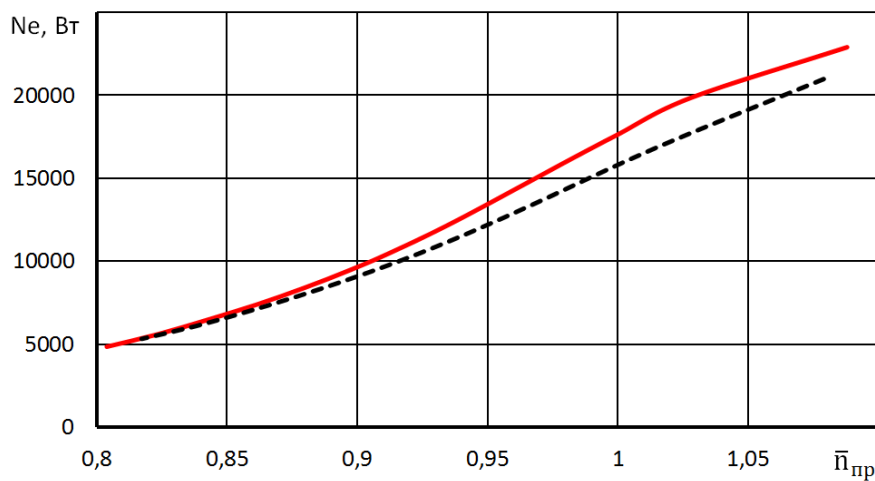


Рис. 6. Зависимость мощности от приведенной частоты вращения при различных значениях влагосодержания: $d=0$ - —, $d=0,04$ - - - - -

Полученные дроссельные характеристики ГТД свидетельствуют о том, что при работе двигателя на влажном воздухе ($d=0,04$) на расчетном режиме: мощность N_e уменьшается на 4,02%, удельный расход топлива C_e увеличивается на 2,93%, КПД снижается на 2,83%.

Заключение

Получена математическая модель турбовального ГТД с использованием повенцового описания многоступенчатого компрессора, учитывающая геометрические параметры проточной части и лопаточных венцов, позволяющая оценить влияние влажности.

Проведена количественная оценка влияния наличия влажной составляющей атмосферного воздуха на параметры двигателя. Установлено, что при влагосодержании $d=0,04$ на расчетном режиме для исследуемого двигателя мощность N_e уменьшается на 4,02%, удельный расход топлива C_e возрастает на 2,93%, КПД снижается на 2,83%.

Литература

1. Нечаев, Ю. Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1. [Текст] / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров. – М. : Машиностроение, 1977. – С. 158 – 159.

2. Литвинов Ю. А. Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных турбореактивных двигателей [Текст] / Ю. А. Литвинов, В. О. Боровик. – М. : Машиностроение, 1979. – 285 с.

3. Горюнов И. М. Оценка влияния влагосодержания воздуха на параметры ГТД [Текст] / И. М. Горюнов // Вестник УГАТУ. – 2006. – №2 (10). – С. 84 – 86.

4. Effects of the intake air humidity on the gas turbine performance monitoring [Text] / H. Hanachi, J. Lie, A. Banerjee, Y. Chen // Proceedings of ASME Turbo Expo 2015 : Turbine Technical Conference and Exposition, Monreal, June 15-19 2015. GT2015-43026. – 8 p.

5. Эзрохи Ю. А. Математическое моделирование авиационных ГТД с повенцовым описанием лопаточных машин в системе двигателя [Текст] / Ю. А. Эзрохи // Авиационное двигателестроение. – 1995. – № 1. – С. 28 – 51.

6. Бойко, Л. Г. Разработка метода расчета характеристик турбовального двигателя с повенцовым описанием многоступенчатого осевого ком-

прессора [Текст] / Л. Г. Бойко, Е. Л. Карпенко // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 3. – С. 143-146.

7. Метод расчета двумерного течения в многоступенчатом осевом компрессоре [Текст] / Л. Г. Бойко, В. Н. Ершов, Г. А. Гирич, В. Н. Яневич // Изв. вузов. – 1989. – № 5. – С. 56 – 60.

References

1. Nechaev, Ju. N., Fedorov, R. M. *Teorija aviaционnyh gazoturbinnnyh dvigatelej*. Ch.1 [Theory of aviation gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, pp. 158 – 159.

2. Litvinov, Ju. A., Borovik, V. O. *Harakteristiki i jekspluatacionnye svojstva aviaционnyh turboreaktivnyh dvigatelej* [Characteristics and operational properties of aviation turbojet engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 285 p.

3. Gorjunov, I. M. Ocenka vlijanija vlagosoderzhaniija vozduha na parametry GTD [Evaluation of the influence of air moisture content on the parameters of the gas turbine engine]. *Vesnik UGATU*, 2006, no. 2, pp. 84 – 86.

4. Hanachi, H., Lie, J., Banerjee, A., Chen, Y. Effects of the intake air humidity on the gas turbine performance monitoring. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*. Monreal, June 15 – 19, 2015, GT2015-43026. 8 p.

5. Jezrohi, Ju. A. Matematicheskoe modelirovanie aviaционnyh GTD s povencovym opisaniem lopatochnnyh mashin v sisteme dvigatelja [Mathematical modeling of aviation GTE with blade – to – blade description of impeller machines in the engine system]. *Aviaционное dvigatelestroenie*, 1995, no. 1, pp. 28 – 51.

6. Bojko, L. G., Karpenko, E. L. Razrabotka metoda rascheta harakteristik turboval'nogo dvigatelja s povencovym opisaniem mnogostupenchatogo oseвого kompressora [Development of the method for calculating of the turboshaft engine characteristics with blade – to – blade description of the multistage axial compressor]. *Vestnik dvigatelestroenija*, 2007, no. 3, pp. 143-146.

7. Bojko, L. G., Ershov, V. N., Girich, G. A., Janevich, V. N. Metod rascheta dvumernogo techenija v mnogostupenchatom osevom kompressore [Method of calculation of the two-dimensional flow in the multistage axial compressor]. *Izv. vuzov*, 1989, no. 5, pp. 56 – 60.

Поступила в редакцию 9.04.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ НА ПАРАМЕТРИ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Л. Г. Бойко, В. А. Даценко

Отримано математичну модель турбовального газотурбінного двигуна з двокаскадним газогенератором, яка спирається на повінцевий опис багатоступеневого компресора, що дозволяє оцінити вплив вологості повітря на його експлуатаційні характеристики. Виконано порівняння характеристик осьового багатоступеневого компресора при наявності вологої складової в повітрі на вході в двигун і при її відсутності. Показаний характер зміни основних параметрів газотурбінного двигуна при наявності вмісту вологи, виконано кількісну оцінку.

Ключові слова: газотурбінний двигун, вологовміст, математична модель, осьовий багатоступеневий компресор.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AIR HUMIDITY ON GAS TURBINE ENGINE PARAMETERS

L. G. Boyko, V. A. Datsenko

The mathematical model of a turbo-shaft engine with a two-stage gas generator was obtained. This model is based on the multi-stage compressor blade – to - blade description, which makes it possible to evaluate the effect of air humidity on its performances. The characteristics of the axial multistage compressor in the presence of a moist component in the air at the engine entrance and in its absence were compared. The gas turbine engine main parameters were shown in the presence of moisture content. The quantitative estimation was made as well.

Keywords: gas turbine engine, moisture content, mathematical model, axial multistage compressor.

Бойко Людмила Георгиевна – д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедрою теорії авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: l.boyko@khai.edu.

Даценко Вадим Анатольевич – студент кафедри теорії авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: datsenkovadym@gmail.com.

Boyko Lyudmila Georgievna – Doctor of Techn. Sci., Professor, the Head of Aviation Engines Theory Chair of National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: l.boyko@khai.edu.

Datsenko Vadim Anatolievich – Student of the aircraft engines theory Chair of National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: datsenkovadym@gmail.com.