

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ГАЗОТУРБОВОЗА

Ткаченко А.Ю. *, Филинов Е.П. **

*Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

**e-mail: tau@ssau.ru*

***e-mail: filinov@ssau.ru filinov.evg@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 20.11.2018

Проведены исследования возможных путей совершенствования силовой установки газотурбовоза с учетом ограничений, накладываемых особенностями применения газотурбинных двигателей (ГТД) на железнодорожном транспорте. Работа проводилась в несколько этапов: верификация математических моделей, используемых при выполнении проектного расчета и расчета эксплуатационных характеристик ГТД, с целью повышения идентичности их математическим моделям, используемым ПАО «Кузнецов»; исследование влияния числа ступеней компрессора низкого давления на эксплуатационные характеристики газотурбинной установки (ГТУ), используемой в составе газотурбовоза; разработка предложений по совершенствованию условий совместной работы узлов с целью сокращения расхода воздуха через ГТУ.

Ключевые слова: газотурбовоз, газотурбинная установка, математическая модель, климатические характеристики, этап концептуального проектирования.

Введение

В современном мире электрификации железных дорог уделяется огромное значение. Так, в Швейцарии электрифицировано почти 100% железных дорог (около 3000 км), в Швеции — свыше 60% (более 7500 км), в Италии — около 50% (более 8000 км). На электрической тяге осуществляется более 50% всех грузовых перевозок [1].

Электрификация железной дороги повышает пропускную и провозную способность, надёжность работы, сокращает эксплуатационные расходы, делает железнодорожный транспорт более комфортабельным. Кроме того, электрифицированные железные дороги являются более экологически чистыми [2—4].

Однако на сегодняшний день примерно половина железных дорог не электрифицирована, поэтому для привода локомотива необходимо использовать тепловые двигатели. Одним из возможных вариантов является применение газотурбинной установки [5, 6], когда мощность ГТУ передаётся на электрогенератор, а электродвигатели приводят в движение локомотив. В перспективе на газотурбовоз могут устанавливаться авиационные двигатели гражданской авиации, выработавшие

летный ресурс и доработанные для применения на железной дороге. Такой подход существенно снижает себестоимость перевозок и внедрения газотурбинных локомотивов в экономику страны [7—9].

В СССР работы по созданию газотурбовоза начались в 1954 году. Было разработано несколько моделей локомотивов и выпущены опытные экземпляры, проходившие испытания. В 1970-х проекты по созданию газотурбовозов были прекращены, так как они не могли конкурировать с электровозами и тепловозами [10]. В других странах локомотивы с газотурбинной установкой в настоящее время не используются из-за сложности проектирования.

В рамках Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. N 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства», в рамках подпрограммы «Институциональное развитие научно-исследовательского сектора» госу-

дарственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013—2020 годы» совместно с ПАО «Кузнецов» проводились исследования возможных путей совершенствования силовой установки газотурбовоза, с учетом ограничений, накладываемых особенностями применения газотурбинных двигателей на железнодорожном транспорте.

Работа проводилась в несколько этапов: верификация математических моделей, используемых при выполнении проектного расчета и расчета эксплуатационных характеристик ГТД, с целью повышения идентичности их математическим моделям, используемым на предприятии; исследование влияния числа ступеней компрессора низкого давления (НД) на эксплуатационные характеристики ГТУ, используемой в составе газотурбовоза; разработка предложений по совершенствованию условий совместной работы узлов с целью сокращения расхода воздуха через ГТУ [11–15].

Верификация математических моделей турбовального двигателя

В первую очередь необходимо произвести верификацию используемых в САЕ-системе АСТРА

[17, 18] математических моделей и проверить адекватность получаемых результатов. Для этого был выполнен расчет климатических характеристик ГТУ с исходным газогенератором и проведено сравнение результатов этого расчета с данными, полученными с ПАО «Кузнецов». В результате были построены графики для условий $H = 0$, $N_e = 6$ МВт (рис. 1).

Сопоставление результатов расчета климатических характеристик ГТУ на базе исходного газогенератора с данными, полученными от предприятия, позволяет говорить об идентичности математических моделей термогазодинамического расчета ПАО «Кузнецов» и математических моделей АСТРА и проводить дальнейшие исследования с приемлемой точностью.

Влияние числа ступеней компрессора НД на дроссельные характеристики ГТУ

Одним из направлений повышения эффективности эксплуатации ГТУ, предназначенной для использования в составе газотурбовоза, является сокращение расхода воздуха через установку, которое позволит снизить потери полного давления во всасывающем тракте за счет более рациональных условий работы воздушных фильтров. Далее

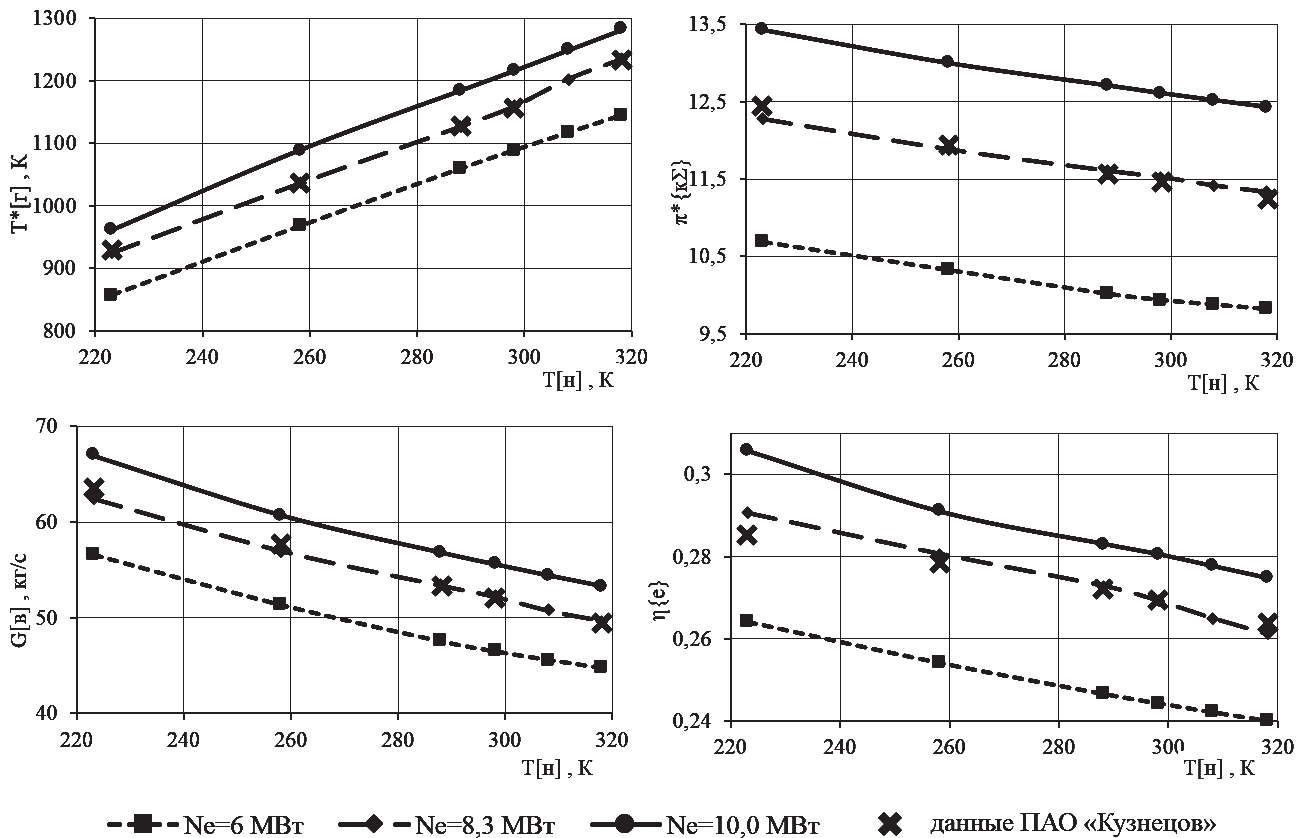


Рис. 1. Результаты сопоставления климатических характеристик ГТУ по разным моделям

будет рассмотрена возможность снижения расхода воздуха через двигатель при условии сохранения эффективной мощности газотурбинной установки за счет снятия одной и двух первых ступеней компрессора НД [19, 20].

Рассмотрим, какие изменения повлечет за собой снятие первой ступени компрессора низкого давления. В соответствии с уравнениями, описывающими условия совместной работы узлов двигателя, можно (с незначительными допущениями) сделать вывод, что положение линии рабочих режимов на характеристике компрессора НД при сокращении числа ступеней останется неизменным. Изменения коснутся, главным образом, характеристики полученного (четырёх— или трёхступенчатого) компрессора НД. Чтобы определить соответствующие характеристики компрессоров с сокращенным числом ступеней, будем использовать данные о распределении параметров по ступеням, предоставленные заказчиком.

Будем считать, что характеристика компрессора НД со снятой первой ступенью (четырёхступенчатого) в относительном виде сохранится практически неизменной, а для того, чтобы получить характеристику компрессора в образмеренном виде, рассмотрим следующие соображения. Имея данные о КПД $\eta_{ст i}^*$ и степени повышения давле-

ния $\pi_{ст i}^*$ каждой ступени исходного компрессора и полагая, что эти значения сохраняются примерно постоянными, в расчетной точке можно определить соответствующие значения $\pi_{кнд}^*$ и $\eta_{кнд}^*$ четырехступенчатого компрессора НД в целом. В отсутствие первой ступени температура на входе во вторую ступень снизится, и для того, чтобы определить новое значение приведенной частоты вращения $n_{кнд.пр.нов}$ в расчетной точке, достаточно определить значение частоты вращения исходного компрессора, приведенное по параметрам на входе в его вторую ступень. По этим параметрам производится образмеривание характеристики четырехступенчатого компрессора и выполняется проектный термогазодинамический расчет.

Определение характеристики компрессора НД со снятыми двумя первыми ступенями (трехступенчатого) производится аналогичным образом.

Характеристики трех-, четырех- и пятиступенчатого компрессоров НД с нанесенной на них линией рабочих режимов представлены на рис. 2.

Для того чтобы исследовать влияние числа ступеней компрессора НД, был выполнен расчет дроссельных характеристик ГТУ на земле ($H = 0$) в стандартных атмосферных условиях. На основа-

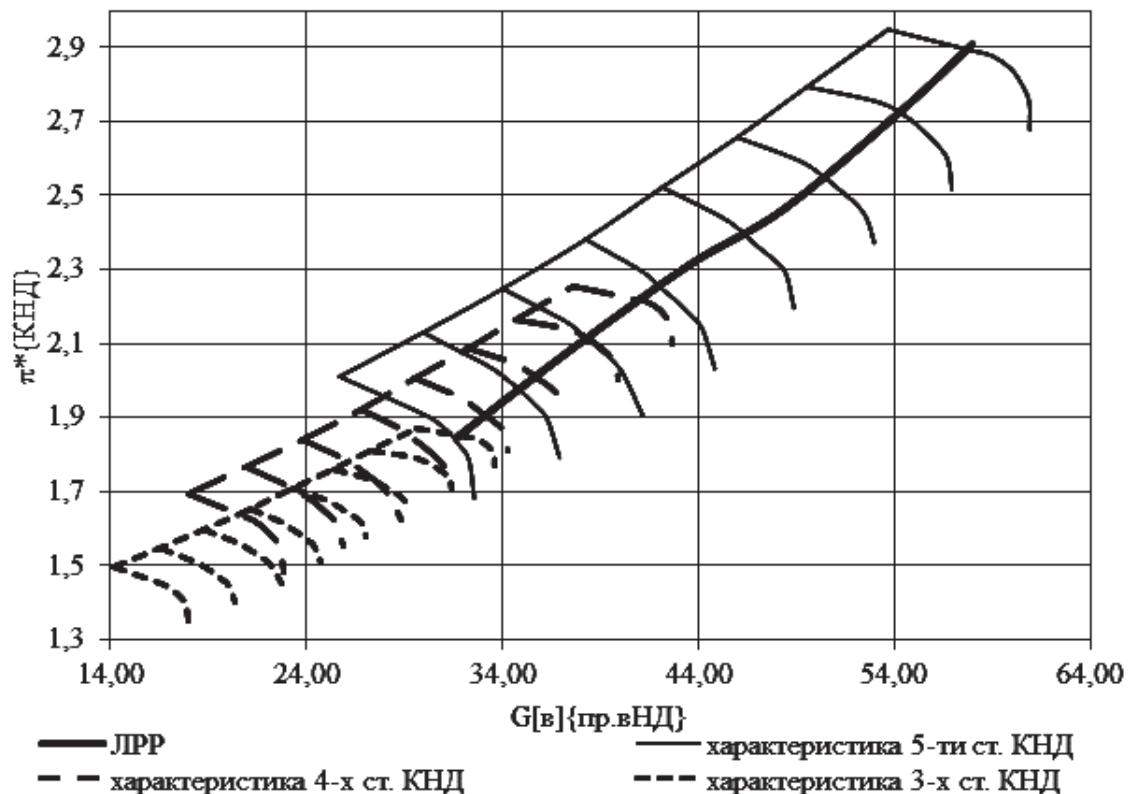


Рис. 2. Взаимное расположение характеристик трех-, четырех- и пятиступенчатого компрессора НД и линии совместной работы

нии полученных результатов были сделаны выводы о том, что без доработок (изменения условий совместной работы узлов ГТУ за счет коррекции пропускных способностей сопловых аппаратов турбин) изменять число ступеней компрессора не целесообразно.

Влияние изменения пропускных способностей сопловых аппаратов турбины НД и свободной турбины на параметры ГТУ с трех-, четырех- и пятиступенчатым компрессором НД

Для определения влияния изменения пропускных способностей сопловых аппаратов турбины НД и свободной турбины на параметры ГТУ с трех-, четырех- и пятиступенчатым компрессором НД произведен расчет параметров ГТУ на земле ($H=0$), в стандартных атмосферных условиях на трех режимах, задаваемых уровнем эффективной мощности ($N_e = 10$ МВт, $N_e = 8,3$ МВт и $N_e = 6$ МВт), с варьированием пропускной способности соплового аппарата турбины НД $\delta A(\text{ТНД})$ в диапазоне 0...-15% и пропускной способности соплового аппарата свободной турбины $\delta A(\text{СТ})$ в диапазоне 0...-30%. Примеры расчетов ГТУ с пятиступенчатым компрессором НД приведены на рис. 3; с четырехступенчатым – на рис. 4; с трехступенчатым – на рис. 5. Необходимо отметить, что для ГТУ с трехступенчатым компрессором НД в диапазоне достижимых величин температуры газа перед турбиной невозможно обеспечить эф-

фективную мощность $N_e = 10$ МВт, поэтому ниже представлены результаты расчетов только для $N_e = 8,3$ МВт и $N_e = 6$ МВт.

На основании проведенных расчетов можно предложить следующие наиболее рациональные варианты коррекции пропускных способностей сопловых аппаратов турбины НД и свободной турбины:

- для ГТУ с пятиступенчатым компрессором НД: $\delta A(\text{ТНД}) = -5\%$ и $\delta A(\text{СТ}) = -10\%$;
- для ГТУ с четырехступенчатым компрессором НД: $\delta A(\text{ТНД}) = -10\%$ и $\delta A(\text{СТ}) = -20\%$;
- для ГТУ с трехступенчатым компрессором НД: $\delta A(\text{ТНД}) = -15\%$ и $\delta A(\text{СТ}) = -30\%$.

Влияние коррекции пропускных способностей сопловых аппаратов турбины НД и свободной турбины на дроссельные характеристики ГТУ

Был выполнен расчет дроссельных характеристик ГТУ с пяти-, четырех- и трехступенчатым компрессором НД при условии коррекции пропускных способностей сопловых аппаратов турбины НД и свободной турбины в соответствии с рекомендациями предыдущего раздела. Проведено сравнение полученных результатов с дроссельными характеристиками ГТУ без коррекции пропускных способностей сопловых аппаратов. Пример сравнения представлен на рис. 6.

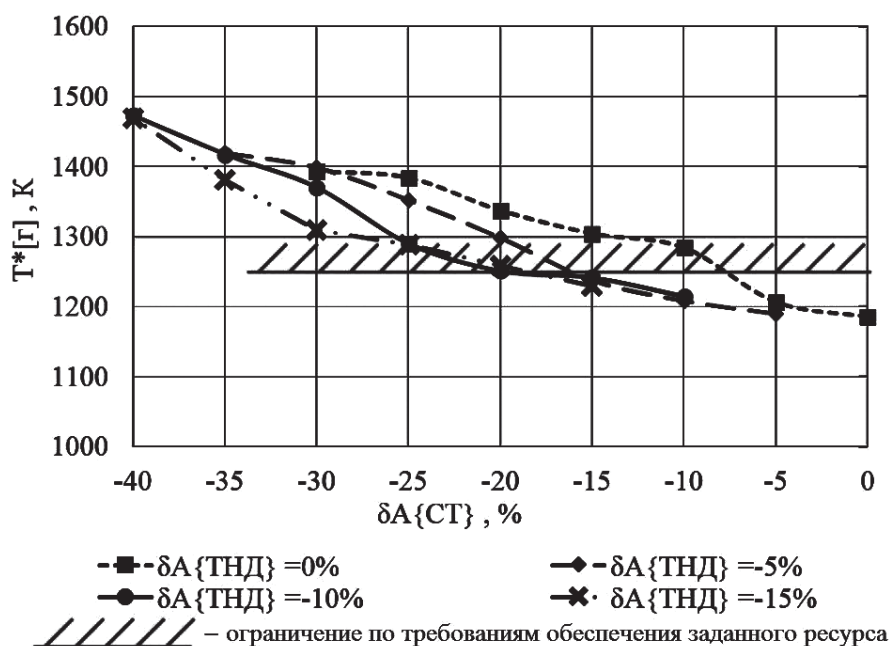


Рис. 3. Влияние изменения пропускных способностей сопловых аппаратов турбины НД и свободной турбины на параметры ГТУ с пятиступенчатым компрессором НД (САУ $H=0$), $N_e = 10$ МВт

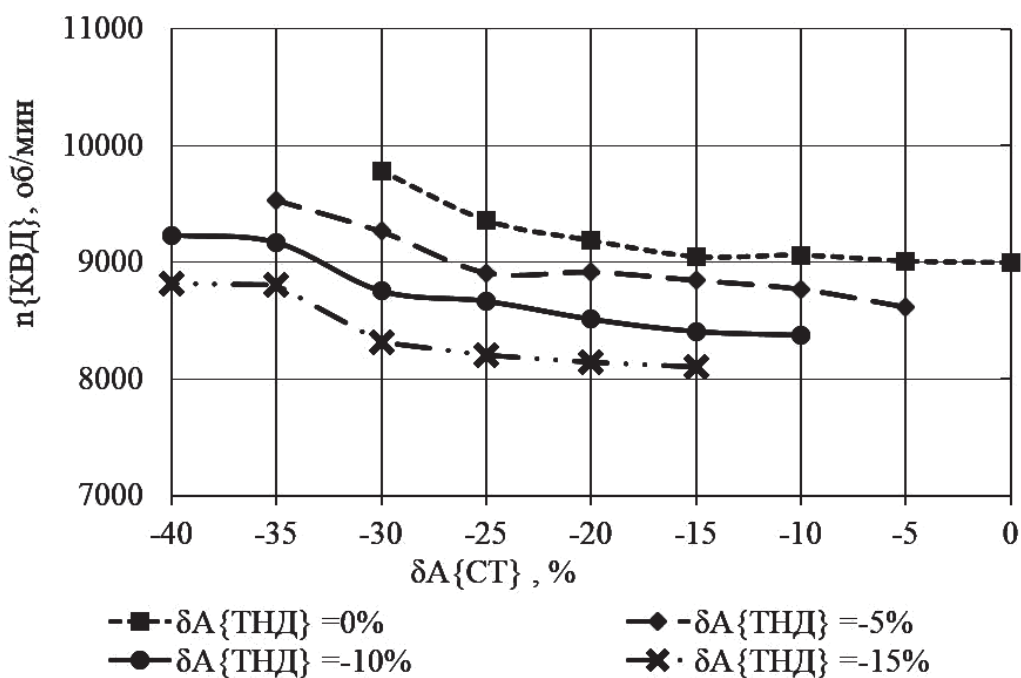


Рис. 4. Влияние изменения пропускных способностей сопловых аппаратов турбины НД и свободной турбины на частоту вращения ротора высокого давления ГТУ с четырехступенчатым компрессором НД ($CAU H=0$), $N_e = 8,3$ МВт

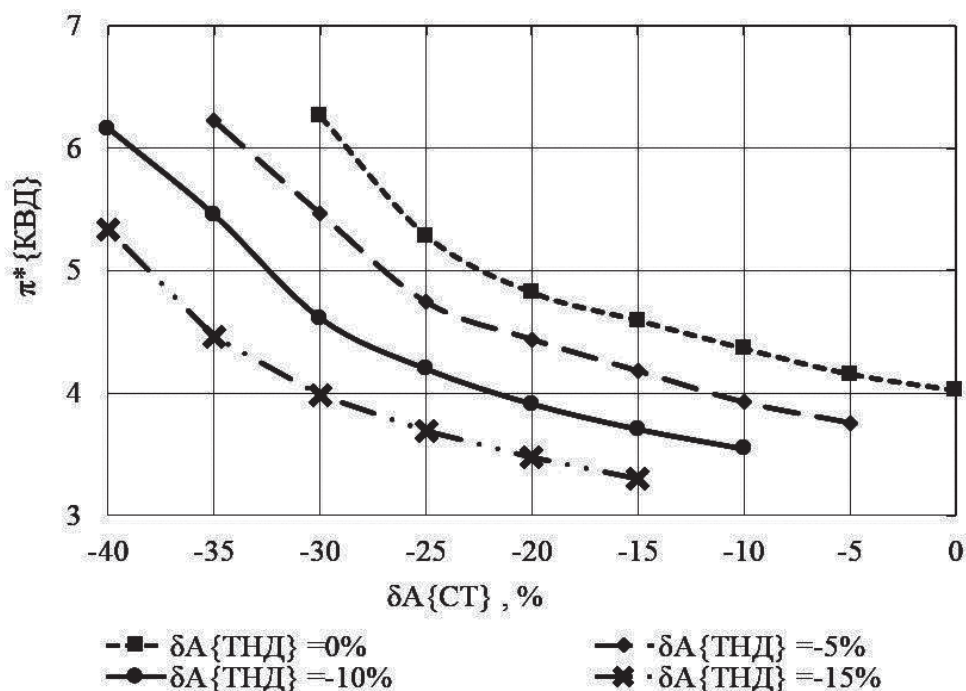


Рис. 5. Влияние изменения пропускных способностей сопловых аппаратов турбины НД и свободной турбины на степень повышения давления компрессора высокого давления ГТУ с трехступенчатым компрессором НД ($CAU H=0$), $N_e = 6$ МВт

Выводы

В результате проведенных исследований были получены следующие основные научные результаты:

- произведена верификация математических моделей, используемых при выполнении проектного расчета и расчета эксплуатационных характеристик ГТД, с целью повышения идентичнос-

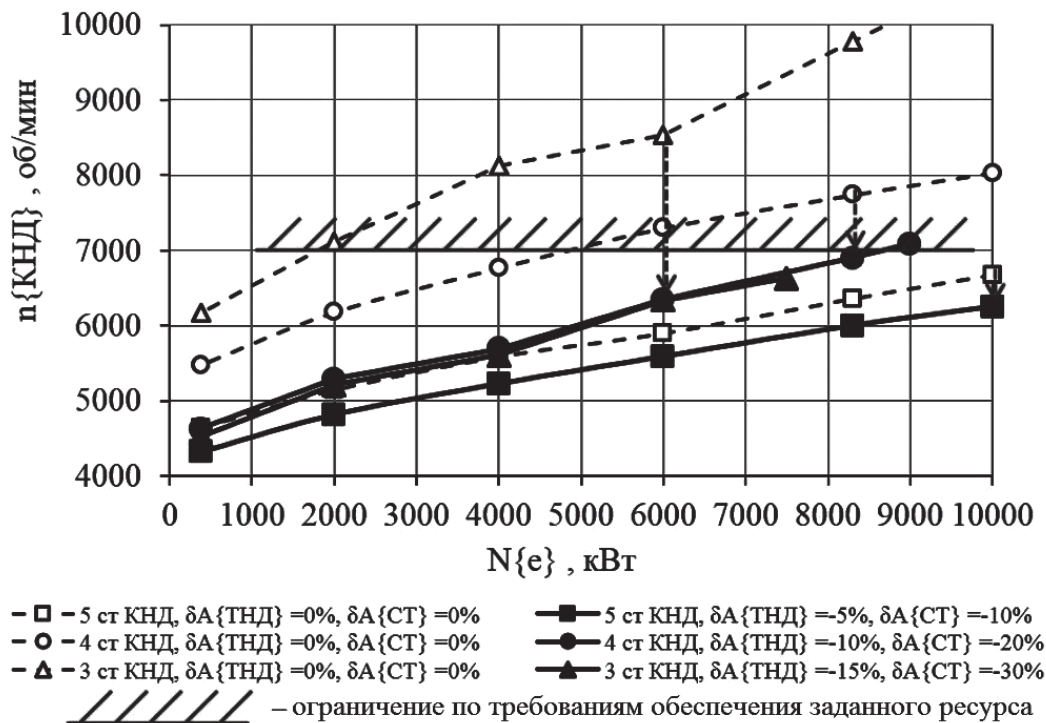


Рис. 6. Изменение частоты вращения ротора НД по дроссельной характеристике ГТУ с трех-, четырех- и пятиступенчатым компрессором НД, с исходными значениями пропускных способностей сопловых аппаратов турбин и с учетом их коррекции (САУ $H=0$)

ти их математическим моделям, используемым на предприятии: сопоставление результатов расчета климатических характеристик ГТУ на базе исходного газогенератора с данными, полученными от заказчика, позволяет говорить об идентичности математических моделей термогазодинамического расчета;

- произведено исследование влияния числа ступеней компрессора НД на эксплуатационные характеристики ГТУ, используемой в составе газотурбовоза. На основании полученных результатов можно заключить, что без доработок (изменения условий совместной работы узлов ГТУ за счет коррекции пропускных способностей сопловых аппаратов турбин) изменять число ступеней компрессора НД не целесообразно;

- разработаны предложения по совершенствованию условий совместной работы узлов с целью сокращения расхода воздуха через ГТУ. Наиболее рациональные варианты коррекции пропускных способностей сопловых аппаратов турбины НД и свободной турбины:

- для ГТУ с пятиступенчатым компрессором НД: $\delta A\{\text{ТНД}\} = -5\%$ и $\delta A\{\text{СТ}\} = -10\%$;

- для ГТУ с четырехступенчатым компрессором НД: $\delta A\{\text{ТНД}\} = -10\%$ и $\delta A\{\text{СТ}\} = -20\%$;

- для ГТУ с трехступенчатым компрессором НД: $\delta A\{\text{ТНД}\} = -15\%$ и $\delta A\{\text{СТ}\} = -30\%$.

За счет коррекции пропускных способностей турбины НД и свободной турбины можно добиться снижения расхода воздуха через ГТУ на 13 кг/с (27%) для варианта с трехступенчатым компрессором НД на режиме $N_e = 6$ МВт, на 9,3 кг/с (17%) для варианта с четырехступенчатым КНД на режиме $N_e = 8,3$ МВт и на 4,7 кг/с (8%) — для варианта с пятиступенчатым компрессором НД на режиме $N_e = 8,3$ МВт; при этом варианты с трех- и четырехступенчатым компрессором НД без коррекции пропускных способностей сопловых аппаратов турбин на соответствующих режимах работы имеют недопустимо высокую величину частоты вращения компрессора НД.

Библиографический список

1. Рыжкова А.Д., Шубин А.А. Анализ концепции многофункционального комплекса для выполнения работ на электрифицированных участках железных дорог // Научно-технические проблемы в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции (6–12 декабря 2013). — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. Т. 4. С. 92-95.

2. Бартош Е.Т. Газовая турбина на железнодорожном транспорте. – М.: Транспорт, 1972. – 144 с.
3. Strack D. Union Pacific Railroad Roster of Diesel and Turbine Locomotives, 1934-2009. – Utah Rails, 2015. URL: <http://utahrails.net/up-diesel-roster/up-diesel-roster-01.php>
4. Duffy M.C. The Gas Turbine in Railway Traction // Transactions of the Newcomen Society. 1998. Vol. 70. No. 1, pp. 27–58. DOI: 10.1179/tns.1998.002
5. Шмидт И.А., Кавалеров Б.В., Один К.А., Шигапов А.А. Сопряжение программных сред в задачах моделирования и тестирования систем управления энергетическими газотурбинными установками // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5 (42). С. 25–31.
6. Губарев В.Я., Кирилин А.Ю., Киселев А.В. Анализ схемы и цикла парогазовой установки при сжигании в камере сгорания газотурбинной установки доменного газа // Энергосбережение и эффективность в технических системах: Материалы V Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Системный анализ, управление и обработка информации (информационные технологии)», Тамбов, 04-06 июня 2018. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2018. С. 248-249.
7. Краев В.М., Тихонов А.И. Современные оценки, прогнозы и перспективы развития авиационного двигателестроения: Монография. – М.: Логос, 2018. – 154 с.
8. Дудинских А.В., Фатихова Э.Р. Использование авиационного транспорта для обеспечения связности территорий РФ // Гагаринские чтения – 2018: Сб. тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции. – М.: Лухогринт, 2018. С. 107-108.
9. Гуров В.И., Иванов В.Л., Шестаков К.Н. Универсальная воздушно-турбинная энергетическая установка. Патент RU № 2395703 С2. Бюлл. № 21, 27.07.2010.
10. Gas Turbine Locomotives, GTEs. URL: <https://www.american-rails.com/gas-turbine-locomotive.html>
11. Вертепов А.Г., Вертепов А.А., Чинёнов В.В. Методическая унификация расчетов выходных показателей ГТУ // Газовая промышленность. 2010. № 3(643). С. 56-59.
12. Мураева М.А., Горюнов И.М. Совершенствование газотурбинного двигателя за счёт организации изотермического расширения в турбине // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 1. С. 51-61.
13. Лоскутников А.А., Горюнов И.М., Бакиров Ф.Г. Математическое моделирование КЭУ на основе ГТУ и ТОТЭ в компьютерной среде // Вестник УГАТУ. 2012. Т.16. № 2(47). С. 127-137.
14. Кузьмичев В.С., Кулагин В.В., Крупенич И.Н., Ткаченко А.Ю., Рыбаков В.Н. Методы оптимального проектирования ГТД на начальном этапе // Труды МАИ. 2012. № 59. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35106>
15. Кожин Д.Г., Кривошеев И.А., Горюнов И.М. Имитационное моделирование авиационных двигателей // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7642>
16. Горюнов И.М., Болдырев О.И. Направления развития современных математических моделей рабочих процессов газотурбинных двигателей // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5180>
17. Кузьмичев В.С., Кулагин В.В., Крупенич И.Н., Ткаченко А.Ю., Рыбаков В.Н. Формирование виртуальной модели рабочего процесса газотурбинного двигателя в CAE системе «АСТРА» // Труды МАИ. 2013. №67. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41518>
18. Григорьев В.А., Загребельный А.О., Кузнецов С.П. К вопросу оценки массы силовой установки в задаче оптимизации параметров рабочего процесса авиационного турбовинтового двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 103-106.
19. Ланский А.М., Лукачев С.В., Коломзаров О.В. Тенденции изменения геометрических размеров и интегральных параметров камер сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т.23. №3. С. 47-57.
20. Комаров О.В., Ревзин Б.С., Бродов Ю.М. Эффективность применения регулируемых силовых турбин в газотурбинных установках и двигателях регенеративного и простого циклов // Теплоэнергетика. 2006. № 2. С. 73-77.

GAS TURBINE UNIT EFFICIENCY UPGRADING FOR GAS-TURBINE LOCOMOTIVE OF A NEW GENERATION

Tkachenko A.Yu. *, Filinov E.P. **

*Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,
34, Moscovskoe shosse, Samara, 443086, Russia*

** e-mail: tau@ssau.ru*

*** e-mail: filinov@ssau.ru; filinov.evg@gmail.com*

Abstract

Up to now, at least half of the railways are not electrified. Thus, it is necessary to employ heat engines to set a locomotive into motion. Employing a gas turbine unit (GTU) is one of the possible options. The GTU power is transferred to the generator, and electric motors set the locomotive into motion. It is worth mentioning that in the future aircraft engines of the civil aviation with worked-out lifetime, and updated for the railway application may be installed on a gas-turbine locomotive. Such an approach would significantly reduce the transportation cost value and gas-turbine locomotives implementation to the national economy.

This work was performed in several stages:

– Mathematical models verification used while performing design calculations and GTD operational characteristics computing to increase their identity to the mathematical models employed by PJSC Kuznetsov;

– Studying the number of stages of a low-pressure compressor (LP) effect on the of a gas turbine unit performance employed as a part of the gas-turbine locomotive;

– Proposals development on improving the units' joint operation to reduce the air consumption through the gas turbine unit.

One of the ways to improve the operation efficiency of gas turbines for application as a part of the gas turbine locomotive consists in the air flow reduction through the unit, which would allow reduce the total pressure losses in the suction tract due to more rational operation conditions of the air filters. The possibility of air consumption reduction through the engine in condition of preserving the effective power of the gas turbine unit by eliminating one and two stages of the low pressure compressor will be discussed further.

The following main scientific results were obtained as a result of the study:

1) Mathematical models verification used while performing design calculations and GTD operational characteristics computing to increase their identity to

the mathematical models employed by PJSC Kuznetsov. Comparison of the results of GTU climatic characteristics computing, based on the initial gas generator, with data obtained at the PJSC Kuznetsov allows talking about the identity of mathematical models of thermo-gas-dynamic computation, performed by the PJSC Kuznetsov, and ACTPA mathematical models;

2) A study of the low-pressure compressor number of stages impact on the operational characteristics of the GTU employed as a part of the gas-turbine locomotive. Based the obtained results, a conclusion can be made on the inexpediency of changing the number of stages of the low-pressure compressor without refinements (changing the joint operation conditions of the GTU units by throughput efficiency correction of nozzles assembly);

3) Proposals on improving the joint operation conditions of the units to the effect of air consumption reduction through the GTU, and the most rational options of nozzles assembly of the low-pressure turbine and a free turbine were elaborated.

Keywords: gas-turbine locomotive, gas turbine unit, mathematical model, climatic characteristics, conceptual design stage.

References

1. Ryzhkova A.D., Shubin A.A. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Naukoemkie tekhnologii v priboro- i mashinostroenii i razvitie innovatsionnoi deyatel'nosti v vuze" (6–12 December 2013)*. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2013, vol. 4, pp. 92-95.
2. Bartosh E.T. *Gazovaya turbina na zheleznodorozhnom transporte* (Gas turbine for the railway transport), Moscow, Transport, 1972, 144 p.
3. Strack D. *Union Pacific Railroad Roster of Diesel and Turbine Locomotives, 1934-2009*. Utah Rails, 2015. URL: <http://utahrails.net/up-diesel-roster/up-diesel-roster-01.php>
4. Duffy M.C. The Gas Turbine in Railway Traction. *Transactions of the Newcomen Society*, 1998, vol. 70, no. 1, pp. 27–58. DOI: 10.1179/tns.1998.002

5. Shmidt I.A., Kavalerov B.V., Odin K.A., Shigapov A.A. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2009, no. 5(42), pp. 25-31.
6. Gubarev V.Ya., Kirin A.Yu., Kislekov A.V. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov "Energoberezhenie i effektivnost' v tekhnicheskikh sistemakh" (Tambov, 04-06 June 2018)*, Tambov, Izd-vo Pershina R.V., 2018, pp. 248-249.
7. Kraev V.M., Tikhonov A.I. *Sovremennye otsenki, prognozy i perspektivy razvitiya aviatsionnogo dvigatelestroeniya* (Modern estimates, forecasts and prospects of aviation engine-building development), Moscow, Logos, 2018, 154 p.
8. Dudinskikh A.V., Fatikhova E.R. *Materialy XLIV Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Gagarinskije chteniya – 2018"*, Moscow, Luxor-print, 2018, pp. 107-108.
9. Gurov V.I., Ivanov V.L., Shestakov K.N. *Patent RU № 2395703 C2*, 27.07.2010.
10. *Gas Turbine Locomotives, GTEs*. URL: <https://www.american-rails.com/gas-turbine-locomotive.html>
11. Vertepov A.G., Vertepov A.A., Chinenov V.V. *Gazovaya promyshlennost'*, 2010, no. 3(643), pp. 56-59.
12. Muraeva M.A., Goryunov I.M. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 51-61.
13. Loskutnikov A.A., Goryunov I.M., Bakirov F.G. *Vestnik UGATU*, 2012, vol. 16, no. 2(47), pp. 127-137.
14. Kuz'michev V.S., Kulagin V.V., Krupenich I.N., Tkachenko A.Yu., Rybakov V.N. *Trudy MAI*, 2012, no. 59. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35106>
15. Kozhinov D.G., Krivosheev I.A., Goryunov I.M. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7642>
16. Goryunov I.M., Boldyrev O.I. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2011, no. 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5180>
17. Kuz'michev V.S., Kulagin V.V., Krupenich I.N., Tkachenko A.Yu., Rybakov V.N. *Trudy MAI*, 2013, no. 67. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41518>
18. Grigoriev V.A., Zagrebelnyi A.O., Kuznetsov S.P. On the of power plant mass evaluation in the problem of aircraft turboprop operating procedure optimization. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 103-106.
19. Lanskii A.M., Lukachev S.V., Kolomzarov O.V. Small gas turbine engines combustion chambers geometric resizing and integral parameters changing trends. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 47-57.
20. Komarov O.V., Revzin B.S., Brodov Yu.M. *Teploenergetika*, 2006, no. 2, pp. 73-77.