

ИССЛЕДОВАНИЕ ВПРЫСКА ВОДЫ И ПОДВОДА ПАРА В ПРОТОЧНУЮ ЧАСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ГТЭ-65

А.А. ШИШИН*, А.В. ТИТОВ*, Б.М. ОСИПОВ*, В.В. КРИВОНОСОВА**

*Казанский государственный энергетический университет

** ОАО «Силовые машины» (ЛМЗ)

Рассмотрены вопросы повышения эффективности газотурбинной установки (ГТУ) с подводом воды и пара в проточную часть. Представлены результаты расчетного исследования увеличения КПД и номинальной мощности газотурбинной энергетической установки ГТЭ-65 с впрыском воды и подводом пара в проточную часть.

Ключевые слова: парогазовая установка, газотурбинная установка, впрыск воды и подвод пара, математическая модель.

Одним из перспективных направлений развития современной энергетики является применение на тепловых электростанциях надежных и экологически чистых парогазовых установок (ПГУ - STIG), с впрыском воды и подводом пара в воздушный и/или газовый тракт энергетической газотурбинной установки (ГТУ). Такие установки характеризуются относительной простотой технологического процесса и высокими показателями экономичности [1].

Варианты тепловых схем ПГУ-STIG с отводом парогазовой смеси в атмосферу (открытая схема) показаны на рис. 1.

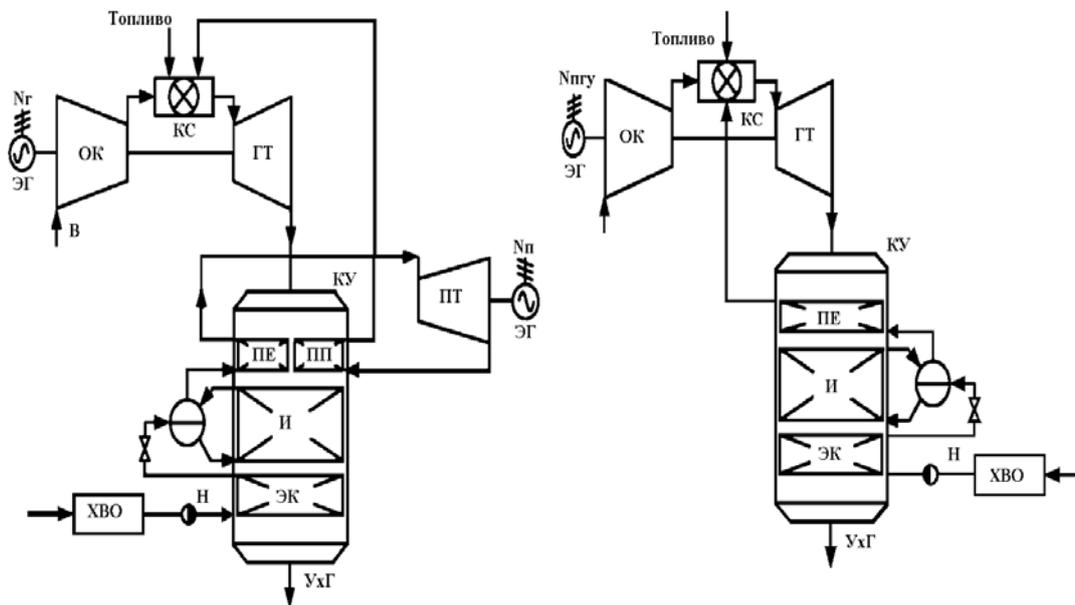


Рис. 1. Тепловые схемы ПГУ – STIG: В – воздух; ОК – осевой компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; КУ – котел-утилизатор; ПТ – паровая турбина; ЭГ – электрогенератор; ПЕ – пароперегреватель; ПП – промежуточный пароперегреватель; И – испаритель; ЭК – экономайзер; ХВО – химводоочистка; УхГ – уходящие газы; Н – насос

© А.А. Шишин, А.В. Титов, Б.М. Осипов, В.В. Кривоносова

Проблемы энергетики, 2012, № 9-10

В летнее время года мощность газовых турбин резко падает с повышением температуры воздуха. Форсировать ГТУ можно либо охлаждением воздуха в тракте компрессора, либо вводом в расширительную часть тракта ГТУ дополнительного рабочего тела – воды или водяного пара. Впрыск воды во входное устройство (ВУ) ГТУ позволит снизить температуру воздуха на входе в компрессор, уменьшая, тем самым, работу компрессора на сжатие, и повысить мощность газовой турбины, что особенно актуально в жаркое время года, когда проблематично покрытие пиковой потребности в электроэнергии.

В современных газотурбинных установках подвод пара непосредственно в двигатель преследует две цели:

- повышение мощности и КПД установки («энергетический впрыск»);
- снижение выбросов оксида азота NO_x («экологический впрыск»).

В результате смешения газа и пара в потоке объем рабочего тела, проходящего через турбину, увеличивается при неизменной мощности воздушного компрессора, что приводит к значительному повышению мощности турбины.

Использование водяного пара в качестве охлаждающего агента высокотемпературных элементов проточной части ГТУ (вместо обычно применяемого воздуха) позволяет увеличить эффективность охлаждения и избежать больших затрат мощности на сжатие охлаждающего воздуха.

Ведущие зарубежные фирмы в своих стационарных газотурбинных установках широко используют ввод воды и пара для увеличения мощности и снижения оксидов азота в уходящих газах.

Один из вариантов развития газотурбинной технологии с впрыском воды подводом пара осуществлен в системе SPRINT, предусматривающей промежуточное охлаждение воздуха между ступенями компрессора ГТУ в процессе сжатия путем инъекции (впрыска) воды – мельчайших капель размером менее 25 мк. Понижение температуры воздуха при этом уменьшает работу сжатия. В ГТУ типа LM2500 + (General Electric) использование этой технологии увеличивает массовый расход воздуха через компрессор на 23%, повышает электрическую мощность на 28%, а КПД производства электроэнергии – до 40 % (показатели «брутто»).

Фирма Siemens применила в компрессорах своих ГТУ так называемое влажное сжатие: водная аэрозоль направляется на вход компрессора для увеличения расхода рабочего тела и снижения удельной работы сжатия воздуха. Опресненная вода фильтруется и направляется в водяной коллектор. Группа регулирующих электрических клапанов подает эту воду через форсунки во входной воздухопровод компрессора. При сжатии смеси воздуха и воды последняя испаряется, охлаждая воздух в первых ступенях компрессора. Такое техническое решение по данным фирмы снижает расход топлива в ГТУ на 1,5 %, а генерацию оксидов азота на 20 - 40 % [1].

Экспериментальные исследования впрыска воды в газовый тракт после компрессора выполнялись в нашей стране на установках, работающих на газоперекачивающих станциях. В стационарных энергетических ГТУ применение впрыска пара в камеру сгорания (КС) впервые было осуществлено на ГТУ типа ГТ-100 (ПО ЛМЗ) на Краснодарской ТЭЦ и на ГРЭС №3 ОАО «Мосэнерго» [7].

В качестве объекта исследования впрыска воды и подвода пара была выбрана газотурбинная установка ГТЭ-65 разработки ОАО «Силловые машины».

Современная стационарная газотурбинная установка ГТЭ-65 предназначена для привода электрического генератора при несении базовой, полупиковой и пиковой нагрузок как автономно, так и в составе парогазового цикла. Установка выполнена по

простой тепловой схеме в виде одновального двухпорного турбокомпрессора с частотой вращения ротора 5441 об/мин и приводом электрогенератора через редуктор.

Газотурбинная установка ГТЭ-65 имеет широкую область применения как при техническом перевооружении существующих энергетических объектов, так и при строительстве новых. Наиболее актуально применение ГТЭ-65 на объектах, имеющих существенные габаритные ограничения на размещаемое оборудование. ГТЭ-65 может быть применена в различных типах ПГУ как для модернизации старых, так и для строительства новых электростанций [3].

Исследование впрыска воды и подвода пара в различные сечения проточной части установки производилось с помощью программного комплекса «ГРАД ЭУ» [5] на базе математической модели ГТЭ-65 с учетом всех ее технических характеристик и параметров.

Математическая модель составляется на основании конструктивной схемы установки ГТЭ-65. В соответствии с ней вычерчивается функциональная схема (рис. 2), которая включает в себя: входное устройство (ВУ), компрессор (К), агрегаты (А), переходной канал (ПК), камеру сгорания (КС), переходной канал (ПК), турбину (Т), выходной патрубок (ВП).

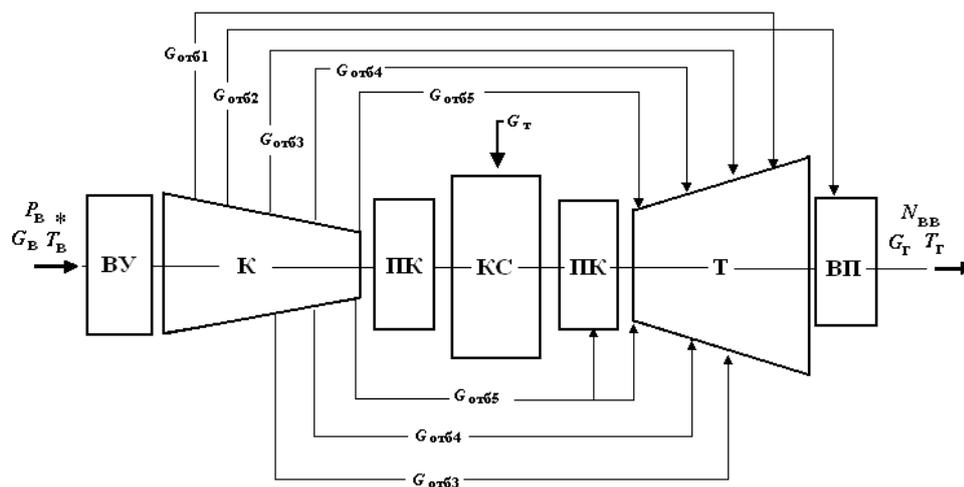


Рис. 2. Функциональная схема ГТЭ-65

В функциональной схеме обозначают передачу информации между узлами по газу, валу, отборам и подводам рабочего тела. Необходимо учесть возможные места отборов и подводов воздуха, впрыска воды и пара в различные сечения проточной части двигателя, баланс мощностей, наличие или отсутствие характеристик отдельных узлов [4].

С помощью исходных данных составляется система уравнений, на решении которых основан вычислительный процесс данного комплекса.

Так при расчете установки ГТЭ-65 в исходном варианте без впрыска система уравнений будет состоять из следующих параметров:

$$\begin{aligned}
 f(G_{\text{в}}, G_{\text{отб}}, \pi_{\text{т турб}}, K_{\text{т}}, G_{\text{прив.турб}}) &= \Delta P_{\text{вых}}; \\
 f(G_{\text{в}}, G_{\text{отб}}, \pi_{\text{т турб}}, K_{\text{т}}, G_{\text{прив.турб}}) &= \Delta G_{\text{т турб}}; \\
 f(G_{\text{в}}, G_{\text{отб}}, \pi_{\text{т турб}}, K_{\text{т}}, G_{\text{прив.турб}}) &= \Delta G_{\text{в компр}}; \\
 f(G_{\text{в}}, G_{\text{отб}}, \pi_{\text{т турб}}, K_{\text{т}}, G_{\text{прив.турб}}) &= \Delta G_{\text{т вых}}; \\
 f(G_{\text{в}}, G_{\text{отб}}, \pi_{\text{т турб}}, K_{\text{т}}, G_{\text{прив.турб}}) &= \Delta T_{\text{сА турб}};
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где G_b – расход воздуха на входе в двигатель; $T_{ГКС}$ – температура в камере сгорания; $G_{прив}$ – приведенный расход через турбину, характеризующий ее пропускную способность; K_π – параметр, характеризующий положение на напорной ветке компрессора; $\Delta P_{вых}$ – равенство статических давлений на входе и на выходе из двигателя; $\Delta G_{вк}$ – рассогласование между величиной расхода воздуха, подошедшего к входному сечению компрессора G_1 и рассчитанного по характеристике – G_{1X} ; $\Delta G_{ГТ}$ – невязка между подошедшим расходом газа – G_1 и определенным по пропускной способности G_{1P} ; $\Delta G_{ГПК}$ – невязка по заданному расходу газа через выходное сечение.

Определены основные параметры газотурбинной установки ГТЭ-65: $Ne_{вв}=63,35$ МВт, $\eta_{эф}=33,757\%$.

При впрыске воды и пара в проточную часть ГТЭ-65 система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} f(G_b, G_{отб}, N_{агр}, K_\pi, G_{прив.турб}) &= \Delta K_{у\ компр}; \\ f(G_b, G_{отб}, N_{агр}, K_\pi, G_{прив.турб}) &= \Delta P_{вых}; \\ f(G_b, G_{отб}, N_{агр}, K_\pi, G_{прив.турб}) &= \Delta T_{СА\ турб}; \\ f(G_b, G_{отб}, N_{агр}, K_\pi, G_{прив.турб}) &= \Delta G_{ГТурб}; \\ f(G_b, G_{отб}, N_{агр}, K_\pi, G_{прив.турб}) &= \Delta G_{Вкомпр}. \end{aligned} \quad (2)$$

где G_b – расход воздуха на входе в двигатель; $G_{отб}$ – количество отбираемого или подводимого воздуха (газа); $N_{агр}$ – потребляемая мощность для привода агрегатов; $G_{прив.турб}$ – приведенный расход через турбину, характеризующий ее пропускную способность; K_π – параметр, характеризующий положение на напорной ветке компрессора; $\Delta K_{у\ компр}$ – коэффициент устойчивости компрессора; $\Delta P_{вых}$ – равенство статических давлений на входе и на выходе из двигателя; $\Delta T_{СА\ турб}$ – температура газов на входе в турбину; $\Delta G_{Вкомпр}$ – рассогласование между величиной расхода воздуха, подошедшего к входному сечению компрессора G_1 и рассчитанного по характеристике G_{1X} ; $\Delta G_{ГТурб}$ – невязка между подошедшим расходом газа G_1 и определенным по пропускной способности G_{1P} .

При впрыске воды с температурой 15°C на входе в компрессор (перед ВНА) максимальное количество воды, которое теоретически возможно испарить в компрессоре до входа в камеру сгорания, составляет $7,91$ кг/с.

$$D_{воды} = (G_b C_{pв} (t_{воз} - t_{кип}) / (C_{pводы} (t_{кип} - t_{вод}) + r), \quad (3)$$

где G_b – расход воздуха на входе в двигатель, кг; $C_{pв}$ – теплоемкость воздуха, КДж/кг·К; $t_{воз}$ – температура воздуха, $^\circ\text{C}$; $t_{кип}$ – температура кипения воды, $^\circ\text{C}$; $C_{pводы}$ – теплоемкость воды, $^\circ\text{C}$; $t_{воды} = 15^\circ\text{C}$ – температура впрыскиваемой воды; r – теплота парообразования, КДж/кг.

Пар подводится в камеру сгорания и перед турбиной. Параметры пара: $P=1,5$ МПа, $t=200^\circ\text{C}$. Максимальное количество подвода пара определяется из условия пропускной способности газовой турбины.

Результаты расчетов в виде зависимостей КПД, мощности ГТУ, часового расхода топлива от количества впрыскиваемого вещества в различные сечения проточной части установки показаны на рис. 3 – 6.

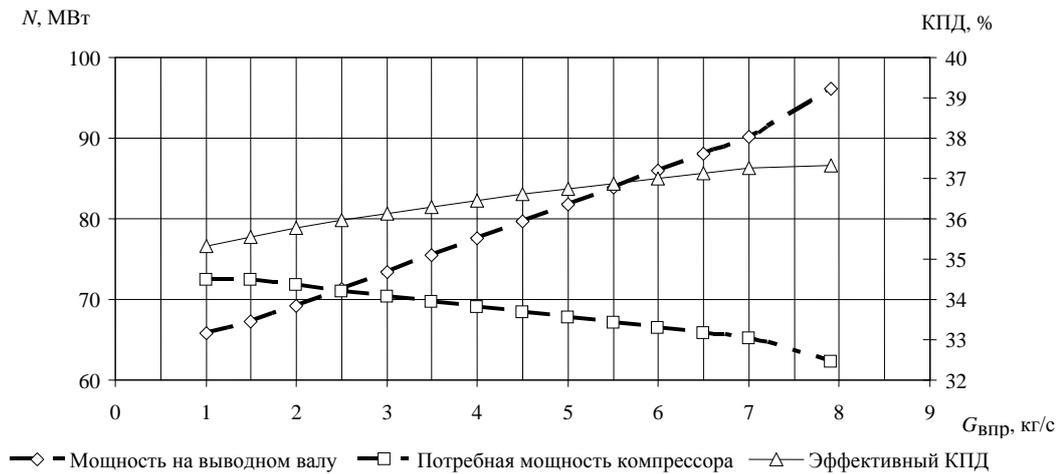


Рис.3. Изменение параметров ГТЭ-65 при впрыске воды во входное устройство

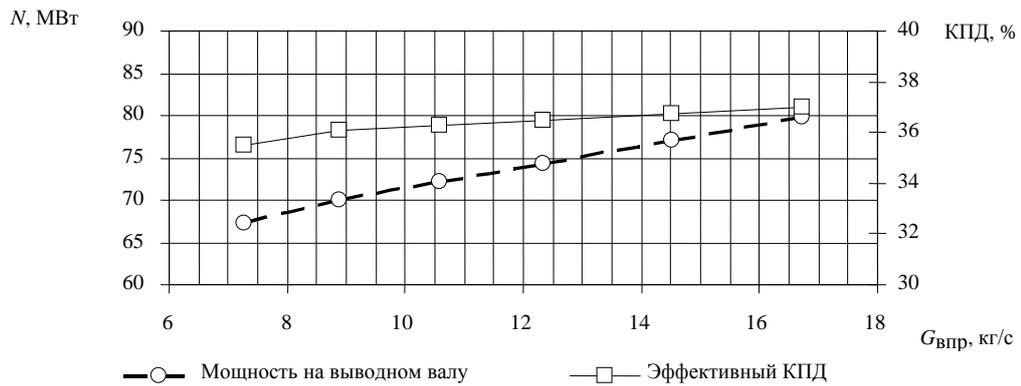


Рис.4. Изменение параметров ГТЭ-65 при подводе пара в зону горения с поддержанием температуры газа перед турбиной, равной 1553,15К

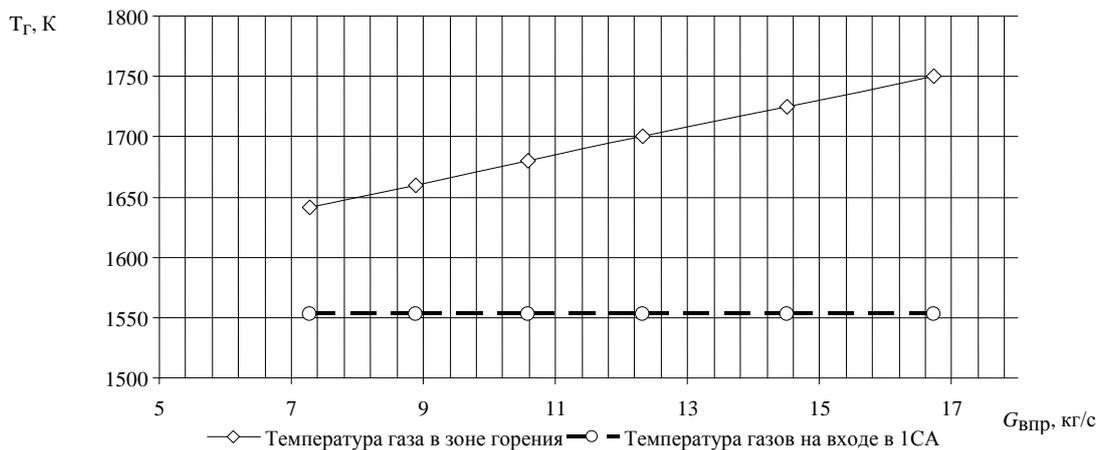


Рис.5. Изменение температуры газа в камере сгорания ГТЭ-65, с подводом пара в зону горения, при постоянной температуре газа перед турбиной

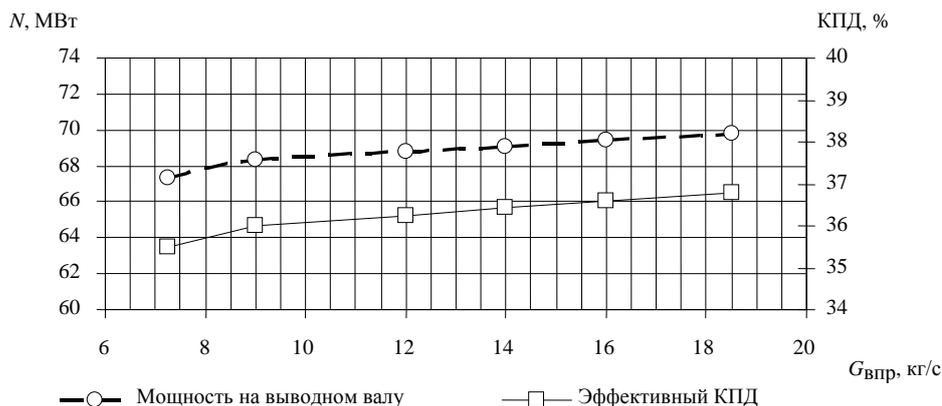


Рис.6. Изменение параметров ГТЭ-65 при подводе пара перед турбиной

Анализ результатов проведенных исследований показывает:

1. Максимально возможный впрыск воды в количестве 7,91 кг/с (теоретически возможно испарить в компрессоре до входа в камеру сгорания) с температурой 288,15 К (15°C) на входе в компрессор низкого давления позволяет повысить эффективный КПД на 3,56 % по сравнению с базовым двигателем. Потребная мощность на привод компрессора с увеличением впрыска снижается, мощность установки увеличивается до 96,13 МВт (см. рис. 4).

2. Подвод пара в зону горения, при условии поддержания температуры 1553К на входе в турбину, ведет к повышению мощности ГТЭ-65 до 79,8 МВт, эффективный КПД увеличивается до 36,97%, при этом геометрия проточной части турбины остается неизменной (см. рис. 5,6).

3. При подводе пара перед турбиной эффективный КПД установки увеличивается до 36,79%, мощность увеличивается до 69,79МВт. Геометрия проточной части турбины остается базовой (см. рис.7).

Summary

Questions of increase of efficiency of gas-turbine installation (GTU) with a supply of water and pair in a flowing part are considered. Presents the results of current research to increase efficiency and nominal power of gas turbine power plant of GTE-65 with injection of water and the supply of steam in the flow part.

Keywords: combined cycle gas turbine, gas turbine power plant, water injection and steam supply, the mathematical model.

Литература

1. Фаворский О.Н., Цанев С.В., Карташев Д.В. Технологические схемы и показатели экономичности ПГУ с впрыском пара в газовый тракт // Теплоэнергетика. 2005. №4.
2. Голованов А.В., Зейгарник Ю.А., Поляков А.Ф. Сравнительная эффективность парового и воздушного охлаждения лопаток газовых турбин // Теплоэнергетика. 1996. №10.
3. Лебедев А. С., Варламов И. С., Росляков М. В. Энергетическая газотурбинная установка среднего класса мощности ГТЭ-65 // Электрические станции. 2007. №1.
4. Результаты моделирования тепловых схем ГТУ с помощью программы ГРАД Б.М. Осипов, А.В. Титов, В.В. Кривоносова, А.П. Петров. Казанский Государственный Энергетический Университет, Россия ОАО «Силовые машины» Филиал «Ленинградский Металлический завод», Россия.
5. CAD/CAM центр – программный комплекс «ГРАД». Руководство программиста. Казань:

Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева (КАИ) 1998 г.

6. Осипов Б.М., Титов А.В., Тунаков А.П. и др. Автоматизированное проектирование двигателей: Учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. 166 с.

7. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов / Под ред. С.В. Цанева. М.: Издательство МЭИ, 2002. 584 с.

Поступила в редакцию

16 июня 2012 г.

Титов Александр Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, профессор, зав. кафедрой «Газотурбинные энергоустановки и двигатели» (ГТЭУД) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8 (843) 2141134. E-mail: al.v.titov@mail.ru.

Осипов Борис Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Газотурбинные энергоустановки и двигатели» (ГТЭУД) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8 (917) 2845107. E-mail: osipov@cadcam.kstu-kai.ru.

Шишин Александр Анатольевич – аспирант кафедры «Газотурбинные энергоустановки и двигатели» (ГТЭУД) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8 (927) 0365435. E-mail: shishinaleksandr@rambler.ru.

Кривоносова Виктория Владимировна – начальник группы теплогидравлических и газодинамических расчетов Специального конструкторского бюро газовых турбин ОАО «Силовые машины» «Ленинградский металлический завод» в Санкт-Петербурге. E-mail: v.v.krivososova@lmz.ru.