

УДК 621.557

А.А. Шишин^{1,2}, А.В. Титов¹, Б.М. Осипов¹¹Казанский государственный энергетический университет «КГЭУ», г. Казань, Россия²ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение», г. Казань, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИКОВОГО ФОРСИРОВАНИЯ ГТУ ПУТЕМ ПОДВОДА В ПРОТОЧНУЮ ЧАСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Рассмотрены вопросы повышения эффективности конверсионного газотурбинного двигателя (ГТД) с подводом воды и пара в проточную часть. Проведен анализ различных вариантов ГТУ с подводом воды и пара в проточную часть. На базе полученной математической модели ГТД, с учетом всех технических характеристик и параметров двигателя, выполнены расчетные исследования влияния подвода воды и пара на характеристики конверсионного ГТД. Показано, что подвод воды и пара в различные сечения проточной части ГТД, оказывает влияние на основные показатели работы (эффективный КПД и мощность) газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: конверсионный газотурбинный двигатель, подвод воды и пара, математическая модель, газопаровой цикл, STIG.

Введение

Одним из перспективных вариантов технического перевооружения теплоэнергетики является внедрение газотурбинных установок (ГТУ) на базе конверсионных газотурбинных двигателей.

Конверсионные ГТД и ГТУ на их основе отличаются полной заводской готовностью, высокой маневренностью, готовностью к пуску и степенью автоматизации, что позволяет применять их как в базовом режиме, так и в целях резервирования, пиковом и полупиковом режимах, в связи с чем актуальны вопросы повышения их мощности и эффективности. [1]

Цель работы.

Целью настоящей работы является анализ влияния подвода воды и пара в проточную часть конверсионного газотурбинного двигателя на основные показатели его работы.

Основной материал.

Хорошими показателями по повышению тепловой эффективности при одновременном снижении удельной стоимости характеризуются энергоустановки, работающие по газопаровым циклам – STIG (Steam Injected in Gas Turbine), где в качестве дополнительного рабочего тела используется водяной пар, генерируемый в процессе утилизации тепла отработанных газов газовой турбины (ГТ) [2]. В частности, достаточно распространены и перспективны энергоустановки с подводом в камеру сгорания (КС) пара, производимого в котле-утилизаторе. Схема газо-

паровой (ГПУ) энергоустановки с подводом пара в камеру сгорания представлена на рис. 1.

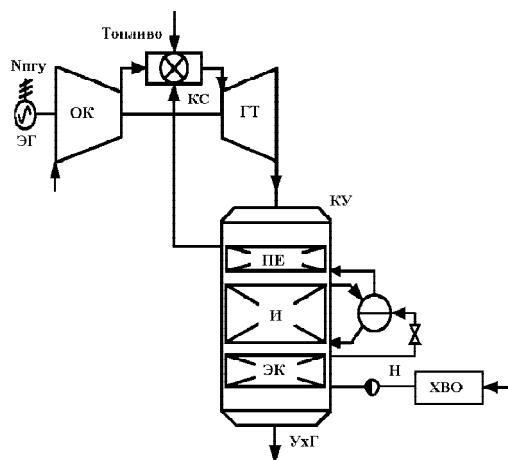


Рис. 1. Тепловая схема ГПУ – STIG
 В – воздух; ОК – осевой компрессор;
 КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина;
 КУ – котел - утилизатор; ЭГ – электрогенератор;
 ПЕ – пароперегреватель; И – испаритель;
 ЭК – экономайзер; ХВО – химводоочистка;
 УхГ – уходящие газы, Н – насос

Большой интерес для перспективных схем ГТУ представляют технические решения, направленные на снижение относительной мощности компрессора. Поэтому для них целесообразно использовать подвод воды в компрессор, когда благодаря интенсивному испарению воды в его тракте существенно снижается температура сжимаемого воздуха, что особенно актуально в жаркое время

года, когда проблематично покрытие пиковой потребности в электроэнергии.

Полезный эффект в данном случае достигается уменьшением работы сжатия в компрессоре за счет понижения температуры сжимаемого воздуха при испарении впрыскиваемой воды. В результате происходит снижение потребляемой мощности компрессора и увеличение эффективного КПД установки. Увеличение расхода рабочего тела, обусловленное подводом воды, ведет к заметному повышению удельной мощности газовой турбины и энергоустановки в целом. [3]

Эффективность влажного сжатия, в первую очередь, зависит от интенсивности испарения и теплообмена капель с потоком воздуха, которая начинает резко возрастать при уменьшении эффективного диаметра распыла капель до 2-3 мкм.

Перспективным направлением тут можно назвать, в первую очередь, технологию SwirlFlash® [3], разработанную голландской фирмой Alpha Power Systems. Суть ее заключается во впрыске на вход компрессора через центробежные форсунки воды, перегретой относительно температуры насыщения. При выходе этой воды из каналов форсунок резко падает ее давление и в объеме образовавшихся капель происходит взрывное вскипание, в результате которого они дробятся на более мелкие капли. В 2001 году эта технология впервые была реализована на одной из электростанций в Голландии, и в настоящее время внедряется в газотурбинной энергетике.

С точки зрения снижения температуры по тракту компрессора и уменьшения работы на сжатие воздуха следует упомянуть схему, Top Hat [7]. Данная схема предусматривает регенерацию тепла в ГТУ подогревом компримированного воздуха отработанными газами ГТ при одновременном осуществлении «влажного» сжатия путем распределенного впрыска воды в компрессор по технологии Swirlflash (распыл перегретой воды). Проведенный сравнительный анализ эффективности и удельной мощности ГТУ показывает, что Top Hat-цикл имеет существенно более высокие значения КПД и удельной мощности по сравнению с простыми циклами. [7]

В 2005 г. фирма General Electric (GE) ввела в промышленную эксплуатацию первую современную газовую турбину LMS100 с использованием технологии промежуточного охлаждения воздуха в компрессоре ГТУ. Эта ГТУ обеспечивает на сегодня самый высокий КПД в открытом цикле. Уникальная особенность LMS100 заключается в использовании промежуточного охлаждения в пределах секции сжатия воздуха в компрессоре. Разработки в этой области начали проводиться давно.

В последнее время компания GE уже успешно использовала запатентованную технологию

«SPRINT»[8], предусматривающую промежуточное охлаждение рабочего тела за счет разбрызгивания парообразной среды между компрессорами низкого и высокого давления газовой турбины LM6000, одной из самых популярных конверсионных газовых турбин в диапазоне 40–50 МВт.

Применение компанией GE авиационных газовых турбин с высокой степенью сжатия обеспечило необходимую базу для производства LMS100 мощностью порядка 100 МВт, с КПД в открытом цикле более 46%. Это представляет следующий этап эволюции газовых турбин с увеличением КПД практически на 10%-ое по сравнению с другими газовыми турбинами. [8]

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 испаряясь, охлаждает 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 подвода воды в газовый тракт после компрессора выполнялись в нашей стране на установках, работающих на газоперекачивающих станциях. В настоящее время циклы ГТУ с подводом пара (STIG) исследуются в НПФ ОАО «Мосэнерго», ММПФ «Салют», ОИВТ РАН. [4]

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования подвода воды и пара был выбран газотурбинный двигатель НК-16-18СТ. Двигатель НК-16-18СТ в настоящее время является одним из наиболее надежных и высокоресурсных отечественных двигателей.

Исследование подвода воды и пара, в проточную часть газотурбинного двигателя, производилось на базе математической модели ГТД, полученной с помощью программного комплекса «АС ГРЭТ» [9], с учетом всех технических характеристик и параметров двигателя. [6]

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

Система уравнений, решаемых при исследовании подвода воды и пара в различные сечения проточной части двигателя НК-16-18СТ, будет выглядеть следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} f(G_в, K_{\pi_{квд}}, K_{\pi_{кнд}}, \pi_{тст}, n_{обвд}, n_{обнд}) &= \Delta G_{вквд} \\ f(G_в, K_{\pi_{квд}}, K_{\pi_{кнд}}, \pi_{тст}, n_{обвд}, n_{обнд}) &= \Delta G_{вкнд} \\ f(G_в, K_{\pi_{квд}}, K_{\pi_{кнд}}, \pi_{тст}, n_{обвд}, n_{обнд}) &= \Delta G_{втвд} \\ f(G_в, K_{\pi_{квд}}, K_{\pi_{кнд}}, \pi_{тст}, n_{обвд}, n_{обнд}) &= \Delta G_{втнд} \\ f(G_в, K_{\pi_{квд}}, K_{\pi_{кнд}}, \pi_{тст}, n_{обвд}, n_{обнд}) &= \Delta G_{вст} \\ f(G_в, K_{\pi_{квд}}, K_{\pi_{кнд}}, \pi_{тст}, n_{обвд}, n_{обнд}) &= \Delta P_{вых} \end{aligned} \right\} (1)$$

где $G_в$ - расход воздуха на входе в двигатель;

$K_{\pi_{квд}}$ - параметр, характеризующий положение на напорной ветке компрессора высокого давления (КВД);

$K_{\pi_{кнд}}$ - параметр, характеризующий положение на напорной ветке компрессора низкого давления (КНД);

$\pi_{тст}$ - значение степени понижения давления в СТ;

$n_{обвд}$ - обороты вала высокого давления;

$n_{обнд}$ - обороты вала низкого давления;

$\Delta G_{вквд}$ - рассогласование между величиной расхода воздуха, подошедшего к входному сечению КВД G_1 и рассчитанного по характеристике - $G_{1х}$;

$\Delta G_{вкнд}$ - рассогласование между величиной расхода воздуха, подошедшего к входному сечению КНД G_1 и рассчитанного по характеристике - $G_{1х}$;

$\Delta G_{втвд}$ - невязка между подошедшим расходом газа к входному сечению турбины низкого давления (ТВД) - G_1 и определенным по пропускной способности - $G_{1р}$;

$\Delta G_{втнд}$ - невязка между подошедшим расходом газа к входному сечению турбины низкого давления (ТНД) - G_1 и определенным по пропускной способности - $G_{1р}$;

$\Delta G_{гст}$ - невязка между подошедшим расходом газа к входному сечению СТ - G_1 и определенным по пропускной способности - $G_{1р}$;

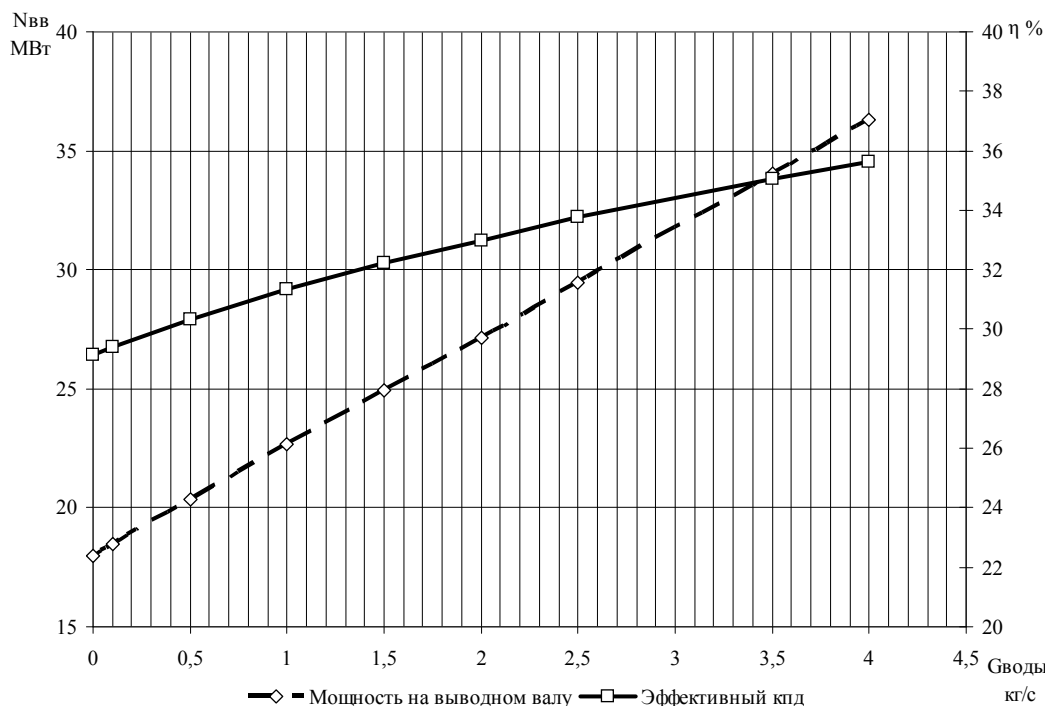
$\Delta P_{вых}$ - равенство статических давлений на входе и на выходе из двигателя.

При впрыске воды с температурой $t = 15^\circ\text{C}$ на входе в компрессор (перед ВНА), максимальное возможное количество воды, которое теоретически возможно испарить в компрессоре до входа в камеру сгорания составляет 4 кг/с.

Подвод пара производится поочередно непосредственно в камеру сгорания, перед турбиной высокого давления и перед силовой турбиной. Для расчетов выбираем следующие параметры пара: $P = 1,5\text{МПа}$, $t = 350^\circ\text{C}$.

Максимальное количество подвода пара в двигатель определяется из условия пропускной способности газовой турбины.

Результаты расчетов в виде зависимостей КПД и мощности ГТД от количества подводимого вещества в проточную часть представлены на рис. 2 - 5.



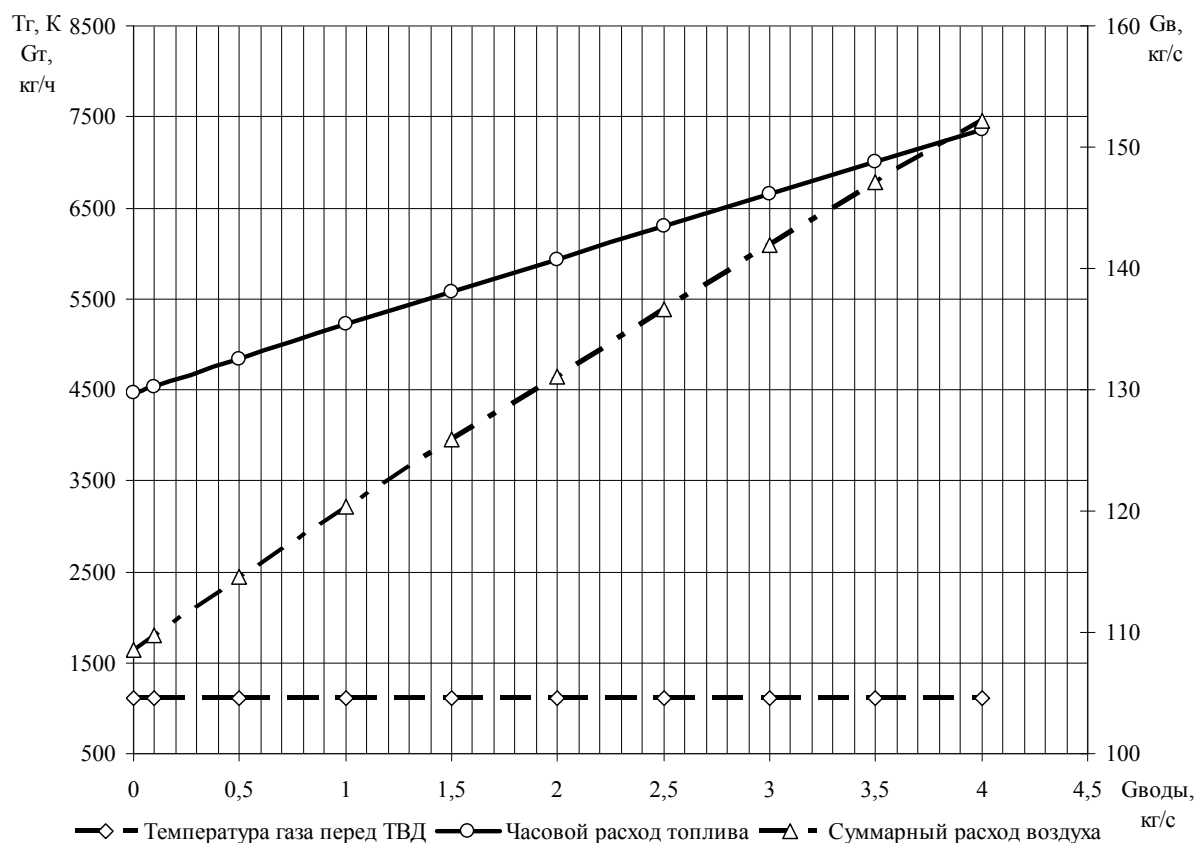


Рис. 2. Изменение параметров НК-16-18СТ при впрыске воды перед КНД и температурой газа в камере сгорания 1100 К

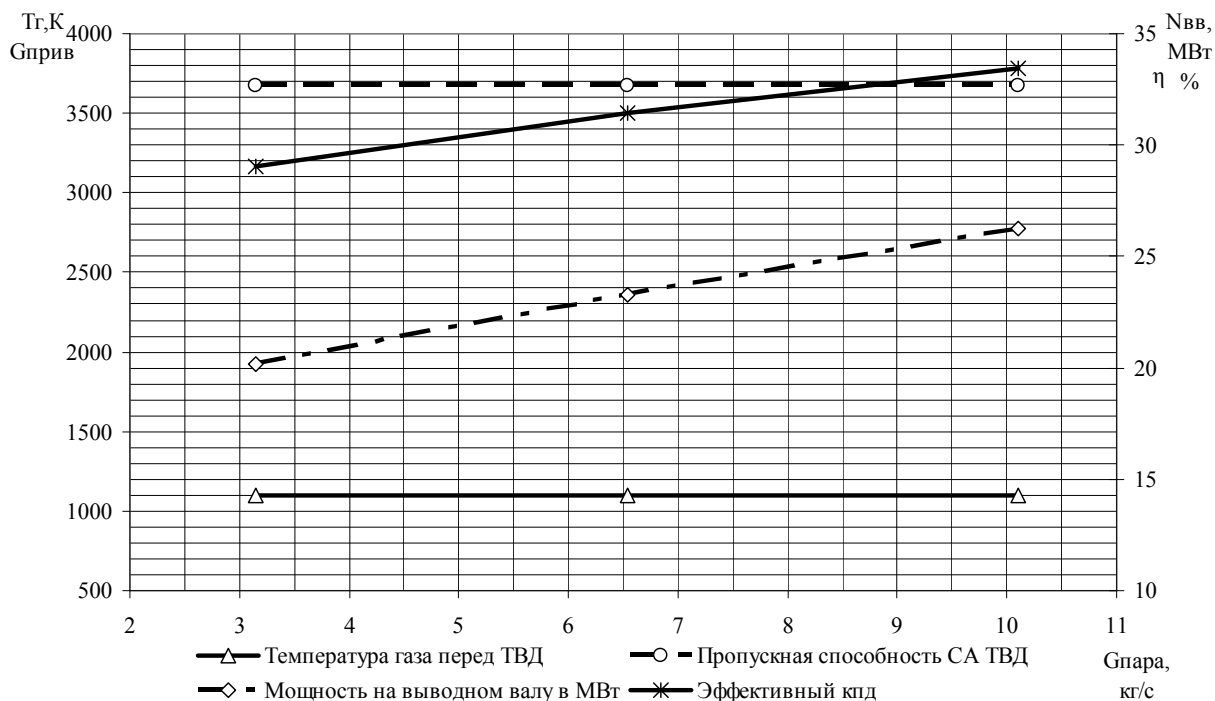


Рис. 3. Изменение параметров НК-16-18СТ при подводе пара в КС и температурой газа в перед ТВД равной 1100 К

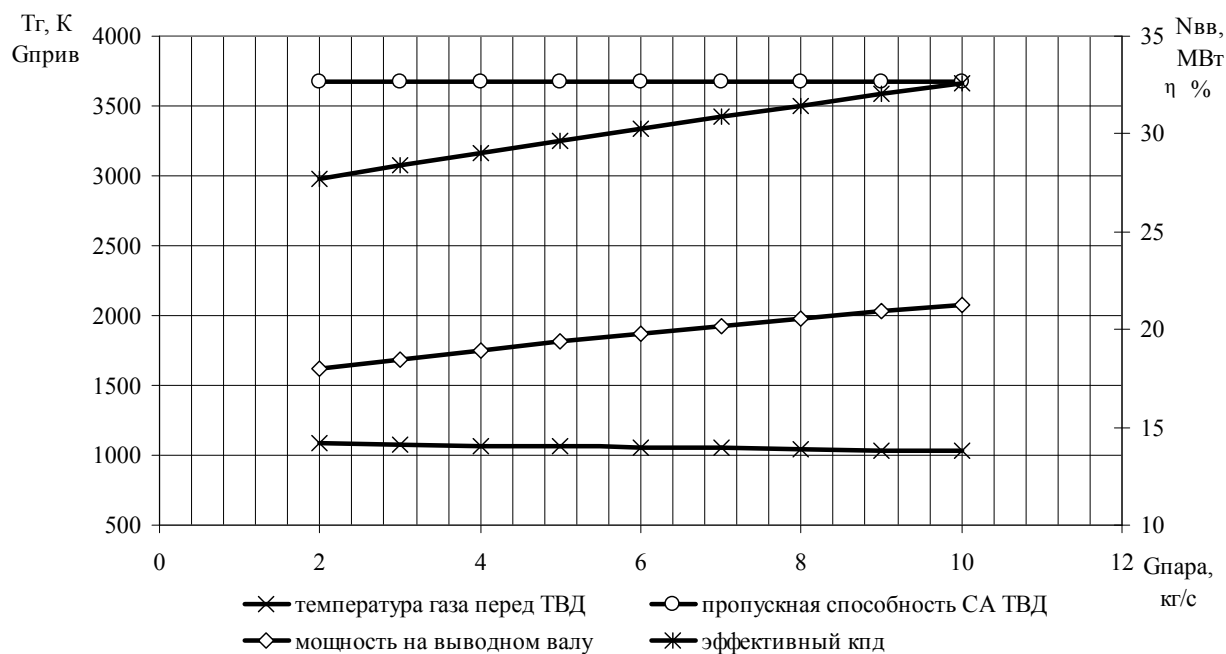


Рис. 4. Изменение параметров НК-16-18СТ при подводе пара перед ТВД и температурой газа в камере сгорания 1100К

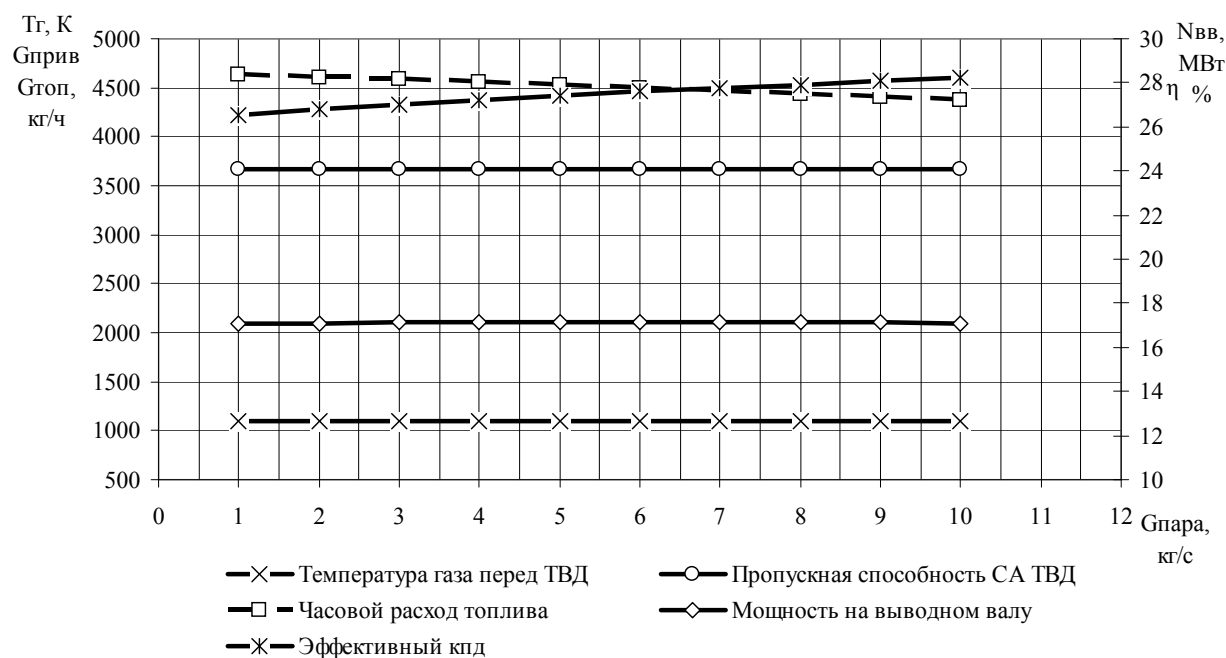


Рис. 5. Изменение параметров НК-16-18СТ при подводе пара перед СТ и температурой газа в камере сгорания 1100 К

2. Анализ полученных результатов

Проведенные исследования на математической модели двигателя НК-16-18СТ показали что:

1. Без дополнительных подводов двигатель НК-16-18СТ имеет мощность $N_e = 18$ МВт, с учетом входных и выходных потерь, отборов воздуха на охлаждение двигателя эффективный КПД $\eta_{эф} = 27,89\%$;

2. При максимальном впрыске воды на входе в КНД, при поддержании температуры в КС равной 1100 К, эффективный КПД увеличивается до 35,63%, мощность двигателя увеличивается до 36,29 МВт (см. рис. 2).

3. Подвод пара в зону горения, при условии поддержания температуры 1100К на входе в ТВД, ведет к повышению мощности ГТД до 26,231 МВт, эффективный КПД увеличивается до 33,461%, при этом геометрия проточной части ТВД остается неизменной (см. рис. 3).

4. Подвод пара перед ТВД, при условии постоянной температуры в КС равной 1100К, ведет к повышению мощности на валу силовой турбины до 21,26 МВт, эффективный КПД двигателя увеличивается до 32,574%. Геометрия проточной части турбины остается неизменной (см. рис. 4).

5. Подвод пара перед силовой турбиной, при условии постоянной температуры в КС, равной 1100 К, ведет к незначительному повышению эффективного КПД двигателя до 28,212%, при этом наблюдается снижение мощности двигателя на 0,952 МВт. Геометрия проточной части силовой турбины остается неизменной (см. рис. 5).

Литература

1. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения [Текст]/ Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко,

С.В. Лукачев, В.Е. Резник, Ю.И. Цыбизов. – Самара: СНЦ РАН, 2004.-266 с.

2. Фаворский О.Н. Технологические схемы и показатели экономичности ПГУ с впрыском пара в газовый тракт [Текст]/ О.Н. Фаворский, С.В. Цанев, Д.В. Карташев // Теплоэнергетика. - 2005.- №4.-С. 28-34.

3. Мусин М. Н. Проблемы организации процесса «влажного» сжатия при впрыске воды в компрессорах газотурбинных энергоустановок [Текст] / М. Н. Мусин, Ф. Г. Бакиров // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: Материалы конф. «УГА-ТУ». - 2–3 ноября 2010 г. – С. 152-154.

4. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций [Текст]: учеб. пособие для вузов/ С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов;/ под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд. МЭИ, 2002. – 584 с.

6. Автоматизированное проектирование двигателей [Текст]: учеб. пособие / Б.М. Осипов, А.В. Титов, А.П. Тунаков, А.С. Хамзин, В.Б. Явкин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. - 166 с.

7. Полежаев Ю.В. Концепция ОИВТ РАН энергетических газотурбинных установок [Текст] / Ю.В. Полежаев, Р.Р. Григорянц, Р.Р. Воронина // Журн. Энергетика Татарстана. – 2009. - №2. - С. 11-20.

8. Буров В.Д., Дудолин А.А., Евлашов А.В. Особенности применения газотурбинной установки сложного цикла в составе конденсационных парогазовых установок [Электронный ресурс] / В.Д. Буров, А.А. Дудолин, А.В. Евлашов. – Режим доступа: http://www.avid.ru/upload/pages/5914/sbornik_97-101.pdf

9. Программный комплекс ГРАД [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://grad.kai.ru>.

Поступила в редакцию 08.06.2012

A.A. Shishin, A.V. Titov, B.M. Osipov. Research of peak speeding up of the Gas-Turbine engine by the supply in the flowing part of various substances

Questions of increase of efficiency of the conversion gas-turbine engine (GTD) with a supply of water and pair in a flowing part are considered. The analysis of various options of GTU with a supply of water and pair is carried out to a flowing part. On the basis of the received GTD mathematical model, taking into account all technical characteristics and engine parameters, settlement researches of influence of a supply of water and steam on characteristics of conversion GTD are executed. It is shown that the supply of water and steam in various sections of a flowing part of GTD, influences the main indicators of work (effective efficiency and capacity) the gas-turbine engine.

Key words: conversion gas-turbine engine, supply of water and steam, mathematical model, gaz-steam cycle, STIG (Steam Injected in Gas Turbine).