



Рис. 1. Пути реакции  $C_{16}H_{10} + OH$

В работе были найдены наиболее вероятные пути реакции  $C_{16}H_{10} + OH$ , оптимальные геометрии и частоты колебаний участвующих в процессе соединений, и получены поверхности потенциальных энергий для всех рассматриваемых путей реакции. Были найдены пути, ведущие к образованию молекулы CO. Две реакции бензол + OH и комплекс бензол-фенол + OH не ведут к образованию CO. Реакция радикала пирена с OH может идти по нескольким путям с образованием молекулы CO.

Библиографический список

1. Palmer H.B., Cullis C.F. The Formation

of Carbon from Gases. In Chemistry and Physics of Carbon; Walker, P. L., Ed.; Marcel Dekker: New York, 1965; Vol. 1, P. 265–325.

2. Haynes B.S., Wagner H.G. Soot Formation. Prog. Energy Combust. Sci. 1981, Vol. 7, P. 229–273.

3. Frenklach M. Reaction Mechanism of Soot Formation in Flames. Phys. Chem. Chem. Phys. 2002, Vol. 4, P. 2028–2037.

4. Haynes B.S., Wagner H.G. The Surface Growth Phenomenon in Soot Formation. Z. Phys. Chem. N. F. 1982, Vol. 133, P. 201–213.

УДК 621.438.001.2

## К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУРБИН СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ ПО АППРОКСИМАЦИОННЫМ МОДЕЛЯМ

© 2016 В.А. Григорьев, Д.С. Калабухов, В.М. Радько

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

### ON THE ESTIMATION OF ULTRALOW POWER TURBINE ENERGY EFFICIENCY ON APPROXIMATION MODELS

Grigoriev V.A., Kalabukhov D.S., Rad'ko V.M. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*Mathematical models of the efficiency of a two turbine types that obtained from the results of the gas-dynamic computational experiments are given. Presents the results of statistical correlation and regression analysis of the computational experiments results which showed a high adequacy of mathematical models. The degree of factors and their interactions influence and on the efficiency changes using the influence coefficients and graphical analysis of the factors is investigated.*

Турбоприводы сверхмалой мощности телей вспомогательных бортовых агрегатов (ТПСММ) применяются в качестве двига- летательных аппаратов и энергетических ус-

тановок [1]. Мощность ТПСММ обычно ограничена диапазоном  $N_{\text{тп}} = 0,01 \dots 10$  кВт, что во многом определяет миниатюрность их основных узлов: входного устройства, турбины и выходного устройства.

Для оценки эффективности таких устройств применяют совокупность различных критериев. Важную роль при оценке уровня качества проектируемого ТПСММ играют энергетические критерии, такие как КПД  $\eta_{\text{тп}}$  и удельный расход рабочего тела  $G_{\text{тп}} / \text{уд} = (G/N)_{\text{тп}}$  [2].

На начальных этапах проектирования требуется синтезировать рациональный облик турбины в системе турбопривода, а влияние входных и выходных устройств на него допустимо учитывать с помощью диапазонов значений коэффициентов, характерных для практики проектирования ТПСММ.

Задача формирования облика рабочего процесса турбины сверхмалой мощности (ТСММ) требует наличия обоснованных математических моделей оценки энергетической эффективности. Поскольку процессы, протекающие в проточной части ТСММ сложны и носят пространственный характер, достоверные зависимости энергетических параметров от параметров геометрии и режима работы можно получить на основе статистической обработки результатов натуральных или имитационных экспериментов. Основными недостатками большинства таких моделей является их малая информативность и неучёт взаимного влияния ряда параметров, что при определённых сочетаниях геометрических соотношений приводит к значительной погрешности в оценке мощностного КПД проектируемой турбины.

Для устранения существующих недостатков были разработаны планы факторного эксперимента [3], которые позволяют в явном виде учесть влияние ряда режимных и геометрических параметров осевых и центробежных одноступенчатых ТСММ на энергетические критерии последних. Корреляционно-регрессионный анализ данных вычислительных экспериментов, проводившихся в среде пакета Ansys CFX по этим планам, позволил сформировать полные полиномиальные модели второго порядка для оценки мощностного КПД турбин названных типов. Результаты расчёта основных показате-

телей качества регрессии показали хорошую адекватность аппроксимационных моделей, при этом погрешности определения критериев по ним оказались даже меньше максимальной погрешности их нахождения в процессе натурального эксперимента

Регрессионные модели включают в себя восемь геометрических и два режимных (параметр нагруженности  $Y_{\text{т}}$  и степень понижения давления  $\pi_{\text{т}}$ ) параметра, причём часть из них учитывается как в качестве главных влияющих факторов, так и во взаимодействиях факторов, а другая часть – только во взаимодействиях факторов.

Оценка уровня влияния факторов на отклик нелинейных моделей осуществлялась с помощью коэффициентов влияния вблизи средних значений из диапазонов факторов  $x_{i \text{ ср}}$  и вблизи оптимальных значений  $x_{i \text{ опт}}$  [4]. Оказалось, что в обоих случаях изменение любого варьируемого фактора на 1% приводит к изменению КПД на доли процента, что свидетельствует о пологости функции КПД, как в окрестности средних значений факторов, так и в окрестности их оптимумов. Данный факт позволяет сделать важный вывод о возможности формирования широких рациональных областей параметров путём отступа от экстремума целевой функции на допустимую в пределах погрешности расчёта величину  $\Delta\eta_{\text{т}}$ . Однако оценка влияния фактора нелинейной модели на её отклик во многом зависит от окрестности значения целевой функции, которой соответствует некоторая величина фактора. Поэтому окончательное решение о степени влияния факторов модели принималось только после графического анализа характеристик.

Было выявлено, что исключение фактора из числа влияющих возможно при выполнении условий:

- взаимовлияние этого параметра с режимным на КПД должно либо отсутствовать, либо быть очень слабым;
- его взаимовлияние совместно с другим геометрическим параметром на КПД должно отсутствовать.

Как оказалось, для обоих типов турбин слабо влияющими факторами оказались густота решётки рабочего колеса  $(b/t)_{\text{рк}}$  и эффективный угол выхода потока из него  $\beta_{2\text{эф}}$ , поэтому при выполнении оптимизации по

разработанным математическим моделям эти параметры допустимо исключить из числа оптимизируемых.

Разработанные аппроксимационные модели могут использоваться в выражениях для определения энергетических критериев оценки эффективности, таких как удельный расход рабочего тела и КПД турбопривода в целом. Адекватность полученных выражений обеспечена положительными результатами верификации результатов расчёта по регрессионным моделям с данными натурных и вычислительных экспериментов в широких диапазонах значений режимных и геометрических параметров турбин.

Рекомендуется применять разработанные математические модели при решении задач выбора оптимальных параметров турбины по критериям оценки эффективности турбопривода.

#### Библиографический список

1. Григорьев В.А., Радько В.М., Калабухов Д.С. Анализ состояния проблемы повышения эффективности турбоприводов сверхмалой мощности и пути её решения // Авиационно-космическая техника и технологии. НАУ ХАИ. -Х.: 2010. №7. С. 168-172.
2. Калабухов Д.С., Григорьев В.А., Радько В.М. Вопросы оптимального проектирования турбин сверхмалой мощности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. №5, 2014. С. 203-214.
3. Григорьев В.А., Радько В.М., Калабухов Д.С. Планирование факторного эксперимента при испытаниях одноступенчатых турбин сверхмалой мощности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. №6. С. 81-91.
4. Орлов А.И. Эконометрика: учебник. - М.: Феникс, 2009. 576 с.

УДК 621.438

### НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В ТОПЛИВЕ ГАЗОВОЙ ФОРСУНКИ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

©2016 А.Ю. Балакин<sup>1</sup>, О.В. Гречишников<sup>2</sup>, С.А. Лебедев<sup>2</sup>, А.Д. Росляков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный университет путей сообщения

<sup>2</sup>Публичное акционерное общество «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

#### NEUTRALIZING OF LIQUID COMPONENT IN THE FUEL OF GAS TURBINE BURNER

Balyakin A.Y. (Samara State Transport University, Samara, Russian Federation),  
Grechishnikov O.V., Lebedev S.A., Roslyakov A.D. ("Kuznetsov" plc, Samara, Russian Federation)

*This article contains materials about defect of combustion chamber burner connecting with creation of carbon deposit. They are appeared on inner surface under action of high temperatures and liquid component in the fuel. Using alternative types of fuel creates problem extraction condensate fluid, which provide creation carbon deposit on the burner. Propane, butane are components of alternative types of fuel. They must flow in combustion chamber in the fluid form. It is shown direction solving this problem by utilize heat exchange facility. It is seen variant his installation in gas-air flow duct of gas turbine.*

При эксплуатации двигателей имеет место засорение форсунок камеры сгорания углеродистыми отложениями. Данный процесс происходит при наличии в топливе жидких углеводородных включений. Вместе с конденсатом они испаряются на горячей поверхности распылителя и образуют нагар.

Согласно [1] альтернативные виды топлива имеют ограниченные возможности применения на конверсированных газотур-

бинных установках (ГТУ). В случае использования их в качестве источника энергии на промышленных ГТУ, работающих на удалённых нефтегазовых месторождениях, проблема с содержанием жидкой фазы весьма усложняется. Так в состав попутного нефтяного газа входят бутан и пентан. Для двигателя с давлением воздуха в камере сгорания около 2,3 МПа необходимо нагревать их до температуры 125°C и 180°C соответственно