

УДК 621.452.3

Разработка обобщенной математической модели расчета и проектирования камер сгорания вихревого противоточного типа

Новиков И. Н., Абросимова Е. А.*

*Рыбинский государственный авиационный университет имени П. А. Соловьева,
РГАТУ имени П. А. Соловьева, ул. Пушкина, 53, г. Рыбинск, 152934, Россия*

**e-mail: splindic@yandex.ru*

Аннотация

В работе рассматривается математическая модель расчета и проектирования камер сгорания вихревого противоточного типа (КСВП). В основе методики расчета интегральных характеристик положены уравнения, описывающие процессы, происходящие в камере сгорания (КС). Моделью для теоретического исследования осуществления рабочего процесса сжигания топлива взято устройство, выполненное в виде двухступенчатой КС. Данная модель позволяет определить геометрию КСВП и параметры продуктов сгорания на выходе из камеры.

Ключевые слова: машиностроение, воздушно-реактивные двигатели.

С каждым годом требования к экологической, энергетической и экономической эффективности воздушно-реактивных двигателей постоянно повышаются. Одним из основных устройств, оказывающих существенное влияние на эти показатели, являются горелочные устройства, в частности камеры сгорания

различного типа. Существующие камеры сгорания не позволяют обеспечивать низкий уровень выбросов, сложны в изготовлении и эксплуатации, что также влияет на экономические затраты. Наиболее перспективным для поставленной выше проблемы является камера сгорания вихревого противоточного типа.

Современное состояние исследований в области разработки и исследования КСВП можно определить как недостаточно высокое. Это связано со сложной структурой сильно закрученного потока вязкого сжимаемого газа и особенно высокотемпературного противоточного движения с переменным объёмным тепловыделением, и очень сложной структурой потока - для нестационарных потоков [1]. Хотя актуальность и новизна таких исследований и разработок не вызывает сомнений, этот вопрос ещё долго будет оставаться открытым.

В качестве модели для теоретического исследования осуществления рабочего процесса сжигания топлива взято устройство, выполненное в виде двухступенчатой КСВП. Особенностью рассматриваемого варианта камеры сгорания является то, что она объединяет в себе основные особенности рабочего процесса и элементы конструкции одноступенчатой, двухступенчатой и двухзонной КСВП. Проведя исследование обобщённого варианта КС, легко перенести полученные результаты на одноступенчатую, двухступенчатую и двухзонную КСВП. Такая камера может использоваться в различных отраслях промышленности, таких как, машиностроение, теплоэнергетика, медицина и т. д.

Целью теоретического исследования является получение интегральных характеристик КС, определяющих влияние каждого из основных горелочных элементов друг на друга, на выходные параметры и конструктивное выполнение КС.

Такие камеры, формирующие в рабочей зоне сильно закрученные внешний и внутренний потоки, движущиеся в противотоке, с началом формирования внешнего потока в плоскости близкой к выходному каналу внутреннего потока, обладают следующими особенностями структуры потока [2]:

- высокоразвитой анизотропной турбулентностью, генерируемой сдвиговыми противоположно направленными осевыми составляющими скоростей, преобладающей в радиальном направлении;

- высоким радиальным градиентом статического давления, позволяющий осуществить эжектирование и сжигание газообразного топлива имеющего давление ниже атмосферного;

- формированием зоны горения максимальной температуры во внутреннем закрученном потоке.

Формируемая в КСВП структура потока способствуют значительному увеличению скоростей процессов горения за счёт:

- улучшения качества смесеобразования, на которую влияют такие факторы, как высокая объёмная плотность кинетической энергии, вызванная повышенным уровнем скоростей в зоне химических реакций; предварительная подготовка топливоздушная смеси, которая начинает формироваться в начале внешнего

сильно закрученного нагретого потока; наличие высокоразвитой анизотропной турбулентности, интенсифицирующей тепломассобменные и химические процессы;

- наличия низко и высокочастотных акустических колебаний, которые, «раскачивая» реагирующие компоненты - топливо и окислитель, активизируют их химическую активность.

Расширение диапазона устойчивой работы по коэффициенту избытка воздуха, включая стехиометрический режим, связано с обеспечением стабилизации горения в зоне горения [3]. Высокая степень стабилизации процесса горения обеспечивается формированием «горячих» турбулентных микро-вихрей, движущихся радиально в зону горения от границы разделения внешнего и внутреннего потоков со скоростями, превышающими скорости распространения пламени. «Горячие» турбулентные микро-вихри, формирующиеся на границе потоков и перемещающиеся в зону горения, служат источниками зажигания (микрофакелами), поддерживающими горение в случае срыва. Как показали результаты исследований, проведённых фирмой ONERA (Франция), скорость перемещения таких «горячих пузырей» превышает скорость распространения пламени.

Способность структуры потоков изолировать стенки от высоких термических нагрузок связано с формированием периферийного «холодного» потока воздуха или формирующейся топливовоздушной смеси, которые выполняют роль конвективно-плёночного охлаждения стенок камеры сгорания. Результаты экспериментов, проведенных на различных КСВП, показали, что при температуре в зоне горения 2000 °С, температура на внешней поверхности КС может не превышать 60 °С.

Формирование факела продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания с широким углом раскрытия достигается варьированием углом раскрытия канала выхода продуктов сгорания в сочетании с окружными составляющими скорости, что важно для расширения области применения КС [5].

Высокое качество смесеобразования и используемая система стабилизации горения позволяют реализовать рабочий процесс сжигания однофазных, двухфазных и трёхфазных смесей различных топлив (твёрдая фракция используется в измельчённом состоянии), например, смесь горючего газа и мазута, горючего газа, мазута и опилок и др.

Управление закруткой и термогазодинамическими параметрами (изменение угла входа потока в КС, изменение скорости и температуры потока воздуха в камеру) приводит к заданному размещению зоны горения во внутреннем потоке, размерам зоны горения и, тем самым, - к высокой теплонапряжённости зоны горения и к сокращению времени пребывания продуктов сгорания в области высоких температур. Это способствует обеспечению низкого уровня СО и C_xH_y , и не даёт возможности увеличения синтеза NO_x . Например, высокие температуры в сочетании с увеличенной скоростью химических реакций в зоне горения при наличии некоторого избытка воздуха $\alpha=1,05$ приводят к дожиганию СО и C_xH_y , несмотря на короткое время пребывания в зоне горения; а короткое время пребывания азота в зоне высоких температур ограничивает синтез NO_x .

Среди основных параметров КС, определяющих её рабочий процесс и, как следствие – параметры продуктов сгорания на выходе являются

термодинамические, физико-химические, расходные и геометрические параметры. Среди термодинамических параметров следует выделить такие, как давление и температуру воздуха и топлива на входе в каждый из основных элементов камеры сгорания, а так же их соотношения. Физико-химическими параметрами, оказывающими существенное влияние на рабочий процесс, являются в основном параметры топлива. Среди них можно выделить такие как: фазовый состав, теплота сгорания, химический состав, вязкость и другие параметры. Расходными параметрами являются расход воздуха и топлива в каждом из основных элементов камеры сгорания, а также соотношения между расходами.

Геометрическими параметрами, оказывающими существенное влияние на структуру потока внутри каждого элемента КС [6], служат основные геометрические размеры, формирующие проточную часть.

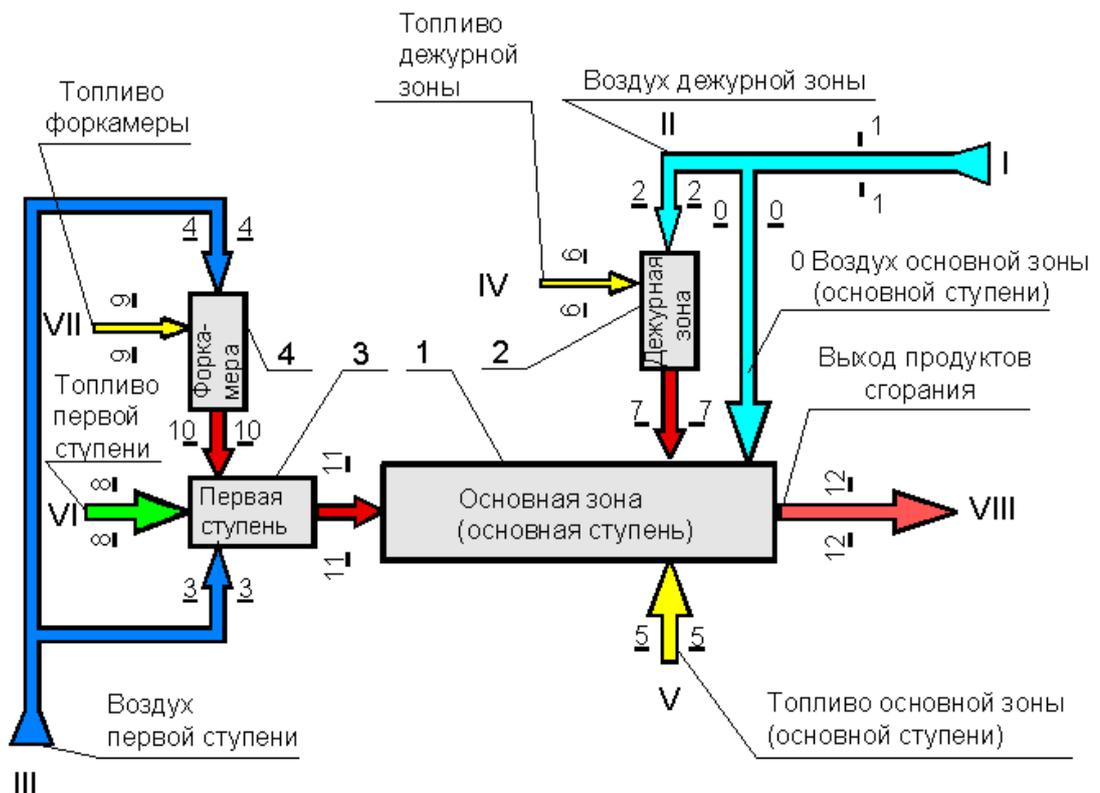


Рисунок 1 - Блок схема исследуемой модели КСВП.

Блок схема исследуемой модели КС представлена на рисунке 1, где: 1 - основная ступень, 2 - дежурная зона, 3 - первая ступень, 4 - форкамера. Вход воздуха: I - в основную зону 1; II - в дежурную зону 2; III - в первую ступень 3. Вход топлива обозначен, соответственно: IV - в дежурную зону 2; V - в основную зону 1; VI - в первую ступень 3; VII - в форкамеру 4. Выход продуктов сгорания из основной зоны 1 обозначен VIII. Основные сечения воздушной, топливной и газовой магистрали показаны обозначениями: 1-1, 2-2, ..., 12-12. Параметры воздуха, топлива и продуктов сгорания в рассматриваемом сечении, обозначаются соответственно нижними индексами «в», «т», «п.с.», «1-1», ... «12-12». Нижним индексом маркируются величины, принадлежащие соответствующему блоку камеры сгорания: «о» - основная зона; «п» - первая ступень; «ф» - форкамера; «д» - дежурная зона. Верхними индексами «в», «т» и «г» указывается вид рабочего тела соответственно воздух, топливо или газ (продукты сгорания) на входе или выходе основных элементов КС.

В результате работы получено следующее параметрическое уравнение (1), которое предусматривает выполнение десяти вариантов конструктивной схемы КС вихревого противоточного типа, реализующих соответствующие рабочие режимы.

$$A_{ij} F_{ij} B_{ij} C_{ij} G_{ji} = 1 \quad (1)$$

где A_{ij} , F_{ij} , V_{ij} , C_{ij} , G_{ji} - комплексные параметры [6], определяющие режим работы, геометрические размеры проточной части, формирующие структуру потока в рабочей зоне КС, а индексы i , j обозначают рассматриваемую зону истечения рабочего тела («п», «о», «д», «ф», «с», «кс» - истечение осуществляется, соответственно, из соплового закручивающего аппарата первой или основной ступени, из выходных сопел дежурной горелки, форкамеры или камеры сгорания).

$$A_{ij} = A_{ij}(\alpha_i, \alpha_j, L_{oi}, L_{oj}, H_{ui}, H_{uj}, T_i^B, T_j^B) = \frac{1 + \frac{1}{\alpha_j L_{oj}}}{1 + \frac{1}{\alpha_i L_{oi}}} \cdot \theta_{ij}^{-0,5} \cdot \left(\frac{k_i R_j}{k_j R_i} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{2}{k_i + 1} \right)^{n_i} \cdot \left(\frac{k_j + 1}{2} \right)^{n_j} -$$

режимный параметр;

$$V_{ij} = V_{ij}(M_i, M_j) = \frac{M_i^{(1-m_i)}}{M_j^{(1-m_j)}} \cdot \frac{(\omega_i)^{u_i}}{(\omega_j)^{u_j}} - \text{основной газодинамический параметр};$$

$$C_{ij} = C_{ij}(P_i, P_j \text{ и др.}) = \frac{P_i}{P_j} - \text{дополнительный газодинамический параметр};$$

$$G_{ji} = G_{ji}(G_o^B, G_\Pi^B, G_\Delta^B, G_\Phi^B) = \frac{G_j^B}{G_i^B} - \text{расходный параметр};$$

$F_{i,j} = F_{i,j}(\bar{F}_i, \bar{F}_j, \bar{d}_i, \bar{d}_j, d_o, L_o, L_\Pi)$ – геометрический параметр;

$$\omega_i = 1 + \frac{k_i - 1}{2} \cdot M_i^2; \quad \omega_j = 1 + \frac{k_j - 1}{2} \cdot M_j^2;$$

$$n_i = \left[\frac{0,5m_i(k_i + 1)}{k_i - 1} - 0,5 \cdot (m_i - 1) \right]; \quad n_j = \left[\frac{0,5m_j(k_j + 1)}{k_j - 1} - 0,5 \cdot (m_j - 1) \right];$$

$$u_i = \left[\frac{m_i k_i}{k_i - 1} - 0,5 \cdot (m_i - 1) \right]; \quad u_j = \left[\frac{m_j k_j}{k_j - 1} - 0,5 \cdot (m_j - 1) \right];$$

$m_i = 0$ при $M_i < 1$; $m_i = 1$ при $M_i \geq 1$;

$m_j = 0$ при $M_j < 1$; $m_j = 1$ при $M_j \geq 1$;

G_i^B, G_j^B - расход воздуха;

α_i, α_j - коэффициент избытка воздуха;

L_{0i}, L_{0j} - необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива;

k_i, k_j - показатель адиабаты;

R_i, R_j - газовая постоянная;

M_i, M_j - число Маха;

T_i^*, T_j^* - полная температура;

P_i, P_j - статическое давление;

D_o - диаметр жаровой трубы в плоскости сечения соплового закручивающего аппарата основной ступени;

$\bar{F}_i = \frac{4F_i}{\pi d_i^2}$ - относительная площадь проточной части выходного канала, диапазон

изменения 0,1...0,06;

$\bar{d}_i = \frac{d_i}{D_o}$ - относительный диаметр жаровой трубы, диапазон изменения 0,5...0,8;

$\theta_{ij}^* = \frac{T_i^*}{T_j^*}$ - относительная температура.

Для решения математической модели КСВП был разработан программный комплекс для расчёта интегральных характеристик КСВП [5]. Некоторые

результаты расчёта, выполненные для одноступенчатой КСВП, представлены на рисунках 2 – 4 [7].

На рисунке 2 показано влияние коэффициента избытка воздуха в $\alpha_{кс}$ в КСВП на соответствующие комплексные параметры: A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} , и G_{ji} при $F_{ij} = \text{const}$ и, как следствие, - на характеристики КСВП, рисунок 3. Изменение коэффициента избытка воздуха $\alpha_{кс}$ в каком-либо из элементов КС приводит к изменению комплексных параметров в других зонах. Однако, в первых ступенях КС изменение режимного параметра, как видно из графиков, незначительное, так как линии практически совпадают. На рисунке 4 приведены характеристики одноступенчатого варианта КСВП.

Верификация разработанной математической модели, алгоритма расчёта и программного обеспечения, а также полученных интегральных характеристик КСВП, была проведена по результатам испытания двух модификаций опытного полноразмерного образца этой КСВП. Первый образец служит для образования высокотемпературного потока продуктов сгорания, движущихся с относительно небольшой скоростью, но с большим углом раскрытия на выходе. Второй образец предназначен для образования высокоскоростной, высокотемпературной струи продуктов сгорания со скоростью, близкой к критической скорости, но с малым углом раскрытия на выходе.

На рисунке 5 показан вид факела первой и второй модификации опытных полноразмерных образцов одноступенчатой КСВП, параметрическое уравнение которых имеет вид

$$A_{oc} F_{oc} B_{oc} C_{oc} G_{co} = 1 + \Delta_{oc}, \quad (2)$$

где Δ_{oc} - абсолютная величина отличия расчётных и экспериментальных результатов.

В ходе испытаний проводился замер расходных характеристик, температур и давлений на входе и на выходе из КС. Полученные результаты указали на небольшое расхождение между расчетными и экспериментальными данными, что для систем горения является высоким показателем.

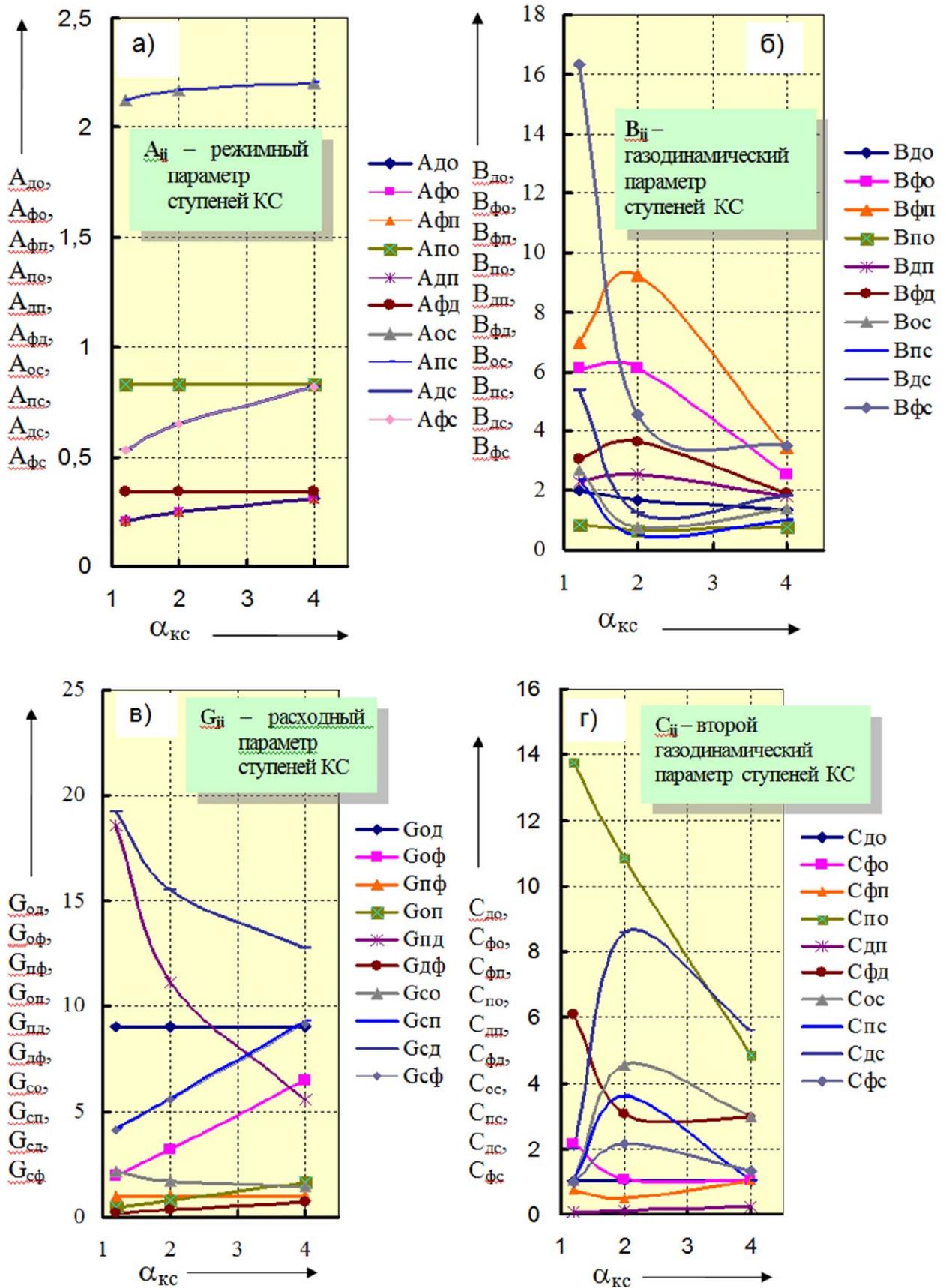


Рисунок 2 - Влияние расчетных значений коэффициента избытка воздуха в камере сгорания $\alpha_{КС}$ на комплексные параметры A_{ji} , V_{ji} , G_{ji} и C_{ji} .

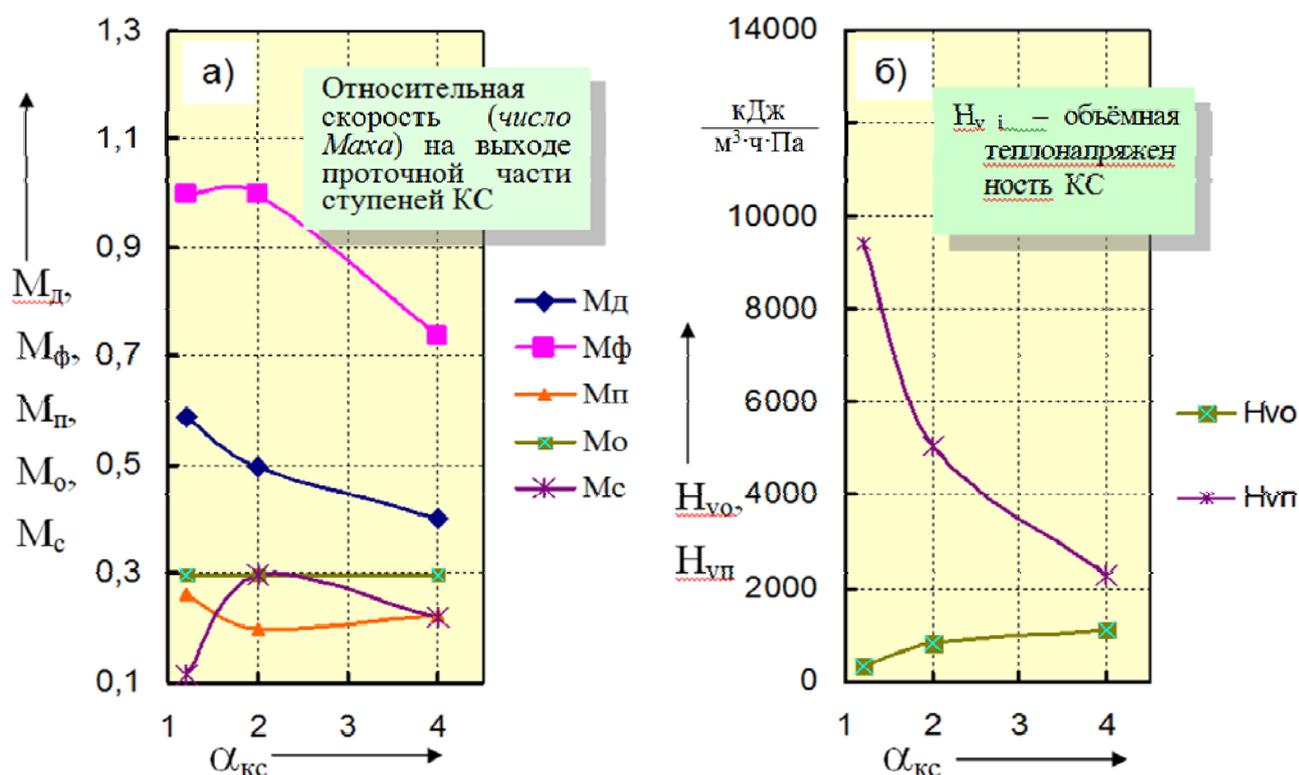


Рисунок 3 - Влияние расчетных значений коэффициента избытка воздуха α_{KC} на M_D, M_F, M_P, M_O, M_C (а) и H_{vo}, H_{vp} (б).

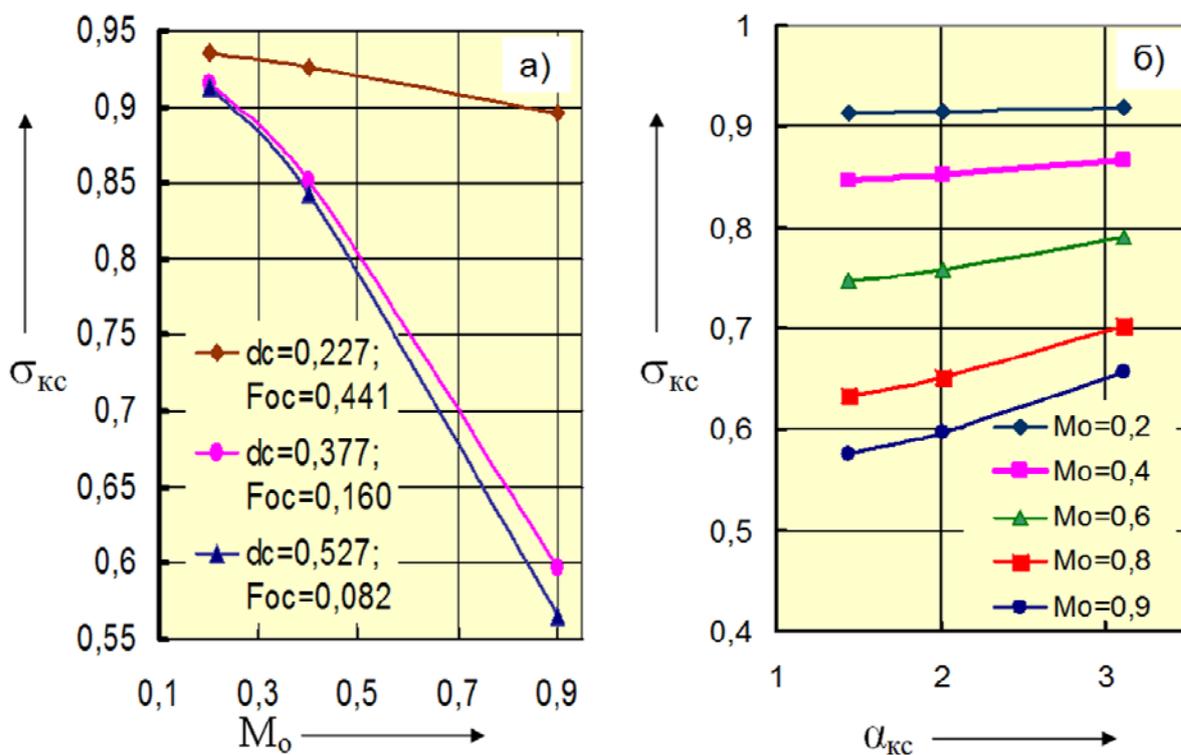
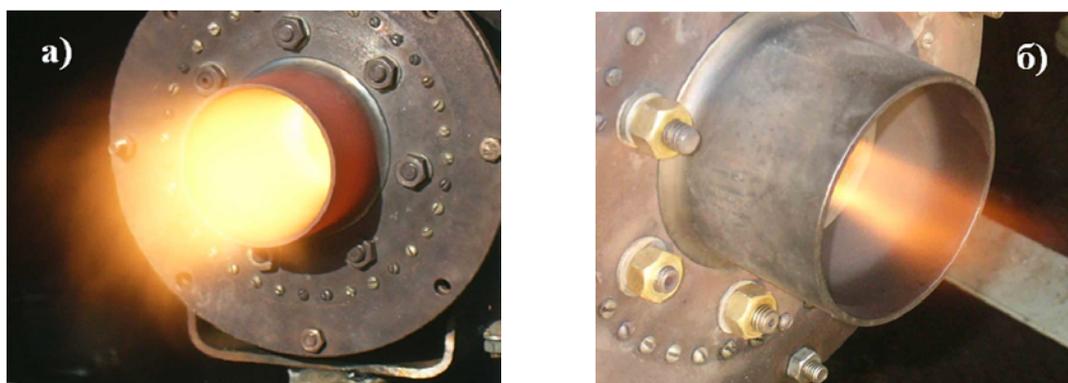


Рисунок 4 - Влияние относительной скорости (числа Маха) воздуха на выходе из завихрителя основной ступени M_O (а) и коэффициента избытка воздуха α_{KC} на коэффициент восстановления полного давления рабочего тела в камере сгорания σ_{KC} (б).



а) $A_{oc} = 2,268$, $F_{oc} = 0,0836$, $B_{oc} = 3,920$, $C_{oc} = 1,540$, $G_{co} = 1,054$,

$\Delta_{oc} = 0,2064$, $M_o = 0,973$, $\bar{M}_c = 0,30$, $\bar{d}_c = 0,527$, $\alpha = 1,243$;

б) $A_{oc} = 2,236$, $F_{oc} = 0,441$, $B_{oc} = 1,026$, $C_{oc} = 1,121$, $G_{co} = 1,060$,

$\Delta_{oc} = 0,202$, $M_o = 0,758$, $\bar{M}_c = 0,827$, $\bar{d}_c = 0,227$, $\alpha = 1,12$.

Рисунок 5 - Внешний вид опытных полноразмерных образцов КСВП во время испытаний.

В процессе исследования была получена возможность производить моделирование рабочего процесса в КСВП различного предназначения, с получением их эксплуатационных характеристик. На основе данной модели была разработана система, которая позволяет получать интегральные характеристики в параметрическом виде, что делает возможным изменять режим работы и конструкцию КС. Она позволяет получать любые графические зависимости, комплексно отражающие взаимосвязь и взаимовлияние различных факторов.

Результаты математического эксперимента, проведённого с использованием полученных параметрического уравнения и системы «КСВП» показали, что изменение газодинамических, физико-химических, геометрических и режимных параметров хотя бы в одной из ступеней (зон) КСВП влияет на рабочий процесс КС и, как следствие, – на её интегральные характеристики.

Выводы

1. Получена математическая модель расчета интегральных характеристик КСВП.

2. Проведено экспериментальное исследование одного из образцов КС, подтверждающее работоспособность математической модели.

3. Определено влияние входных параметров каждого из основных элементов горелочного устройства друг на друга, на выходные параметры и конструктивное исполнение КС.

Библиографический список

1. Markowski S.J., Lohman R.P. Swirl burner combustion zone development program. AFAPL-TR-71-61, 1971.

2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 2004. - 175 с.

3. Jones R.E., Gas Turbine Engine Emission – *Problems, Progress and Future*, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 4, 1978, pp. 73 – 113.

4. Roberts P.B., Butze H.F. Advanced low NO_x combustors for supersonic high altitude gas turbines.-NASA CP-2021, 1977.

5. Новиков Н.Н. и др. Воспламенение ацетилен в вихревом термотрансформаторе // Материалы III Всесоюзной научно-технической конференции «Вихревой эффект и его применение в технике». Куйбышев, 1981. С. 132-136.

6. Новиков И. Н. Исследование камеры сгорания вихревого противоточного типа с целью промышленного применения: Дисс. ...канд. техн. наук. – Рыбинск, 2005.

7. Абросимова Е. А., Новиков И. Н., Савинов Н. А., Груздев Э. О. Разработка методики проектирования камер сгорания вихревого противоточного типа и их

применение в ГТЭУ // Сборник материалов конференции «Энергия - 2013».
Иваново, Россия, 2013. С. 93-96.