

УДК 621.43.056

В.Е. КОСТЮК¹, И.Ф. КРАВЧЕНКО², В.Н. ГУСЕВ², Е.И. КИРИЛАШ¹¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *ГП «Ивченко-Прогресс», Украина*

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ ТОПЛИВНОГО ГАЗА С ВОЗДУХОМ ДЛЯ НИЗКОЭМИССИОННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТУ

Разработана методология расчетно-экспериментального исследования устройства предварительного смешения для низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ по критериям качества смешения и гидравлического сопротивления с использованием методов вычислительной аэрогидродинамики. Предложенная численная модель течения и массообмена верифицирована на задачах, объекты которых обладают физической общностью с объектом исследования. Описана методика экспериментального исследования устройства предварительного смешения. Разработанная методология показала свою эффективность. Целесообразно использовать ее в цикле проектирования и доводки аналогичных изделий.

Ключевые слова: газотурбинная установка, оксиды азота, устройство предварительного смешения, качество смешения, гидравлическое сопротивление, математическое моделирование, эксперимент.

Введение

При работе ГТУ в результате окисления азота, содержащегося в атмосферном воздухе, образуются оксиды азота NO_x – наиболее токсичные и экологически вредные соединения. Большинство стационарных ГТУ работает на газообразном топливе. В настоящее время разработано несколько экологических технологий сжигания топливного газа, наиболее перспективной из которых считается технология сжигания бедной, заранее перемешанной гомогенной топливовоздушной смеси (ТВС) [1, 2].

Как показывают кинетические расчеты, при сжигании бедных гомогенных смесей природного газа и воздуха при температурах пламени $T_{\text{пл}} = 1650 \dots 1750$ К, давлениях 1,5 ... 2,0 МПа и времени пребывания $\tau_{\text{пр}} = 20 \dots 30$ мс возможно снижение выбросов NO_x до 3 ... 8 ppm [2].

Для реализации этой потенциальной возможности в течение двух последних десятилетий зарубежными и отечественными газотурбинными фирмами интенсивно разрабатываются камеры сгорания (КС) с организацией сжигания предварительно перемешанных ТВС с коэффициентом избытка воздуха в зоне горения $\alpha_1 = 1,6 \dots 2,5$. Нижнее значение α_1 ограничивается приемлемым уровнем выбросов NO_x , верхнее – допустимым уровнем выбросов монооксида углерода CO , неустойчивостью горения и бедным срывом пламени.

В.Р. Кузнецов [3] показал, что кроме химической кинетики окисления азота, выбросы NO_x определяются процессом смешения и влиянием смешения

на условия протекания химических реакций.

В общем случае влияние коэффициента избытка воздуха и степени однородности ТВС в процессе горения взаимосвязаны.

В монографии А. Лефевра [4] показано, что выброс NO_x возрастает с увеличением неравномерности состава ТВС при $\alpha \geq 1,3$. Факт уменьшения выбросов NO_x с увеличением однородности бедных топливовоздушных смесей находит подтверждение в натуральных условиях работы современных КС ГТУ [1].

Поэтому обеспечение высокого качества смешения является главным требованием, предъявляемым к устройствам предварительного смешения топливного газа с воздухом (УПС).

1. Формулирование проблемы

По Е.С. Щетинкову [5] процесс смешения можно рассматривать происходящим в два этапа. На первом этапе, главным образом за счет турбулентных пульсаций, происходит перемешивание примеси с потоком до некоторых масштабов l_{0c} , эквивалентных тепловому масштабу l_0 , при этом вклад молекулярной диффузии незначителен.

На втором этапе неоднородности порядка l_{0c} за счет молекулярной диффузии превращаются в неоднородности порядка пробега молекул. Порядок времени выравнивания состава смеси за счет диффузии пропорционален квадрату линейного размера неоднородностей и обратно пропорционален коэффициенту диффузии. То есть для первого этапа

$$\Delta\tau_1 \sim \frac{l_{\max}^2}{\Gamma_t}, \quad (1)$$

где l_{\max} – характерный размер течения (например, диаметр канала);

Γ_t – турбулентный коэффициент диффузии.

Для второго этапа аналогично:

$$\Delta\tau_2 \sim \frac{l_{0c}^2}{\Gamma_M}, \quad (2)$$

где Γ_M – молекулярный коэффициент диффузии.

Для всех практически важных течений характерное время $\Delta\tau_2$ на несколько порядков меньше $\Delta\tau_1$, а, значит, скорость перемешивания определяется, главным образом, турбулентными пульсациями. Поэтому интенсифицировать процесс смешения можно, увеличивая интенсивность турбулентности, например, путем увеличения скорости течения, либо уменьшая характерный размер течения, например, увеличивая пространственную однородность размещения топливных отверстий.

Обзор известных типов УПС, приведенный в работе [6], подтверждает, что все конструкции в той или иной мере используют приведенные выше принципы. Однако для удовлетворения сложного комплекса требований к УПС, работающему в составе фронтального устройства КС ГТУ (высокое качество смешения, умеренное гидравлическое сопротивление, наличие условий для надежного воспламенения ТВС и стабилизации ее горения за пределами устройства без возникновения термоакустических колебаний, отсутствие условий для проскока пламени внутрь устройства и стабилизации его там, самовоспламенения ТВС и др.), необходимо подробное знание трехмерной аэродинамической структуры течения и массообмена в нем.

В последнее время, в связи с развитием методов вычислительной аэрогидродинамики, появилась возможность численного решения подобных задач [7 – 9].

Анализ достигнутых авторами результатов показывает, что в силу ряда теоретических и методических проблем априорное прогнозирование характеристик УПС с приемлемой для практики точностью остается невозможным. Для обеспечения необходимой точности таких расчетов требуется тщательная верификация и идентификация численных моделей по экспериментальным данным.

Цель настоящей работы состоит в создании эффективной методологии расчетно-экспериментального исследования УПС разработки ГП «Ивченко-Прогресс» для низкоэмиссионных КС ГТУ по критериям качества смешения и гидравлического сопротивления, пригодной для включения ее в цикл проектирования и доводки изделия.

2. Математическая модель и ее верификация

Математическая модель течения и массообмена, сформированная на основе осредненных по Рейнольдсу стационарных уравнений Навье – Стокса в пренебрежении гравитацией, сжимаемостью, объемной вязкостью и термодиффузией, включает уравнения неразрывности, сохранения количества движения, сохранения энергии и переноса химических компонентов смеси вида:

$$\nabla(\bar{v}) = 0, \quad (3)$$

$$\nabla(\rho\bar{v}\bar{v}) = \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \bar{J}_q, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\bar{v}\rho Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i, \quad (5)$$

где ρ – плотность; \bar{v} – скорость; p – статическое давление; $\bar{\tau}$ – тензор давлений; E – полная энергия; \bar{J}_q – плотность теплового потока; Y_i – концентрация i -го компонента смеси; \bar{J}_i – плотность диффузионного потока i -го компонента смеси.

Уравнения (3) – (5) замыкаются законами Ньютона для тензора давлений, Фурье для теплового потока, Фика для потока массы, Клайперона – Менделеева для термодинамического состояния смеси газов и уравнениями модели турбулентности. Последняя оказывает существенное влияние на прогнозные свойства математической модели течения и массообмена. Поэтому в рамках верификации математической модели были исследованы две модели турбулентности: стандартная Лаундера – Сполдинга [10] и усовершенствованная Ши и др. [11]. Обе модели представляют собой совокупность дифференциальных уравнений переноса кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε . Турбулентная вязкость определяется по формуле Колмогорова – Прандтля

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (6)$$

Модель Лаундера – Сполдинга имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_{t,k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho(G - \varepsilon), \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_{t,\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho(C_{1\varepsilon} G - C_{2\varepsilon} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}, \quad (8)$$

где $G = -\rho u_j u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ – генерация турбулентной кинетической энергии.

тической энергии за счет сдвиговых напряжений; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $Pr_{t,k}$; $Pr_{t,\varepsilon}$ и C_μ – эмпирические константы.

Модель Ши и др. тоже использует уравнения (7) и (8), но второй член в уравнении (8) имеет вид

$$-\rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}}, \quad (9)$$

а C_μ в формуле (6) определяется выражением

$$C_\mu = \left(A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon} \right)^{-1}, \quad (10)$$

где $U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$; $A_0 = 4,04$; $A_S = \sqrt{6}\cos\varphi$;

$$\varphi = \frac{\sqrt{6}}{3} \cos^{-1} \left(\frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \right);$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}; S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right).$$

Система дифференциальных уравнений с частными производными (ДУЧП) (3) – (8) дополнялась соответствующими конкретной задаче граничными условиями. Для описания течения в пристеночной области использовались функции стенки. Численное интегрирование ДУЧП осуществлялось методом контрольного объема с использованием двух схем аппроксимации конвективных членов.

Поскольку в УПС разработки ГП «Ивченко-Прогресс» применен поперечный вдув ряда струй топливного газа в сносящий поток воздуха, то для верификации математической модели течения и массообмена была решена аналогичная тестовая задача (рис. 1, а), по которой имеются подробные экспериментальные данные [12]. Численные расчеты выполнены в трехмерной постановке с использованием условия поступательной периодичности на сетках, включавших 367900, 1 167 342 и 2 261 946 тетраэдральных элементов, при следующих исходных данных. Для отверстий подачи холодного воздуха: диаметр $D = 12,7$ мм; расстояние между центрами $S = 50,8$ мм; коэффициент расхода $C_d = 0,66$. Среднемассовая скорость струи холодного воздуха $V_j = 25$ м/с, температура – 278 К. Среднемассовая скорость основного потока горячего воздуха $U_\infty = 15$ м/с, температура – $T_\infty = 600$ К. Интенсивность турбулентности 4,5 %, масштаб – 2 % диаметра канала. Стенки канала полагались адиабатическими, распределения скорости, температуры, и параметров турбулентности на входах – равномерными, турбулентное число Шмидта принималось равным 0,7.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными (рис. 2) выполнено с использованием относительной высоты канала $\bar{y} = y/H$ и функции относительной разности температур

$$\Theta = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_j}, \quad (11)$$

где T – локальная температура воздуха.

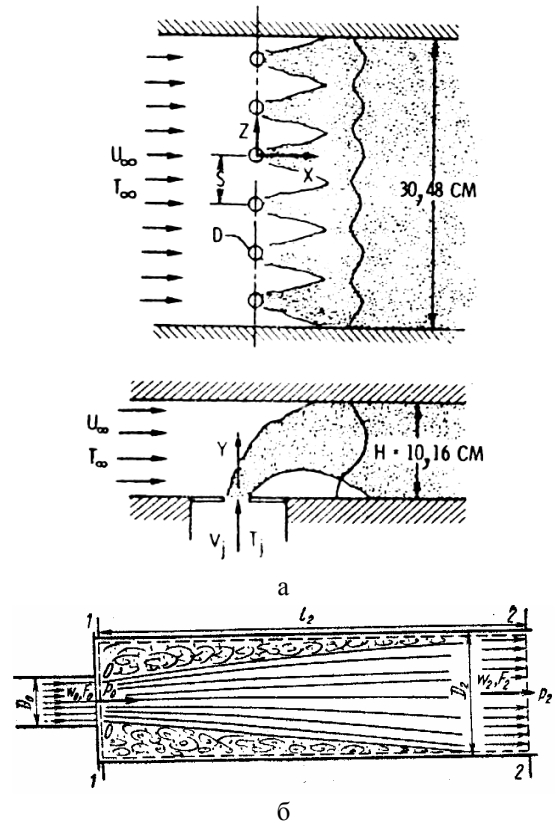


Рис. 1. Тестовые задачи: а – вдув ряда холодных струй в горячий сносящий поток [12]; б – течение в трубе с внезапным расширением [13]

В среднем различие расчетных и экспериментальных данных не превышает 20 %. При этом все модификации численной модели качественно верно описывают экспериментально наблюдаемую структуру течения (форму струи, парные вихри, асимметрию и т.п.), но завывают градиенты независимых переменных, а значит, и расчетную оценку неравномерности полей физических параметров. Размельчение сетки несущественно отразилось на результатах расчетов. Лучшие результаты дает использование усовершенствованной модели турбулентности $k-\varepsilon$ Ши и др. [11] в сочетании со схемой аппроксимации 3-го порядка MUSCL Ван Лира [14].

Геометрия УПС разработки ГП «Ивченко-Прогресс» такова, что его гидравлическое сопротивление в основном обусловлено локальным изменением скорости течения и образованием вихрей. Поэтому для верификации математической модели течения была дополнительно решена тестовая задача о течении в трубе с внезапным расширением поперечного сечения (рис. 1, б), где так же, как и в УПС, преобладают указанные выше эффекты.

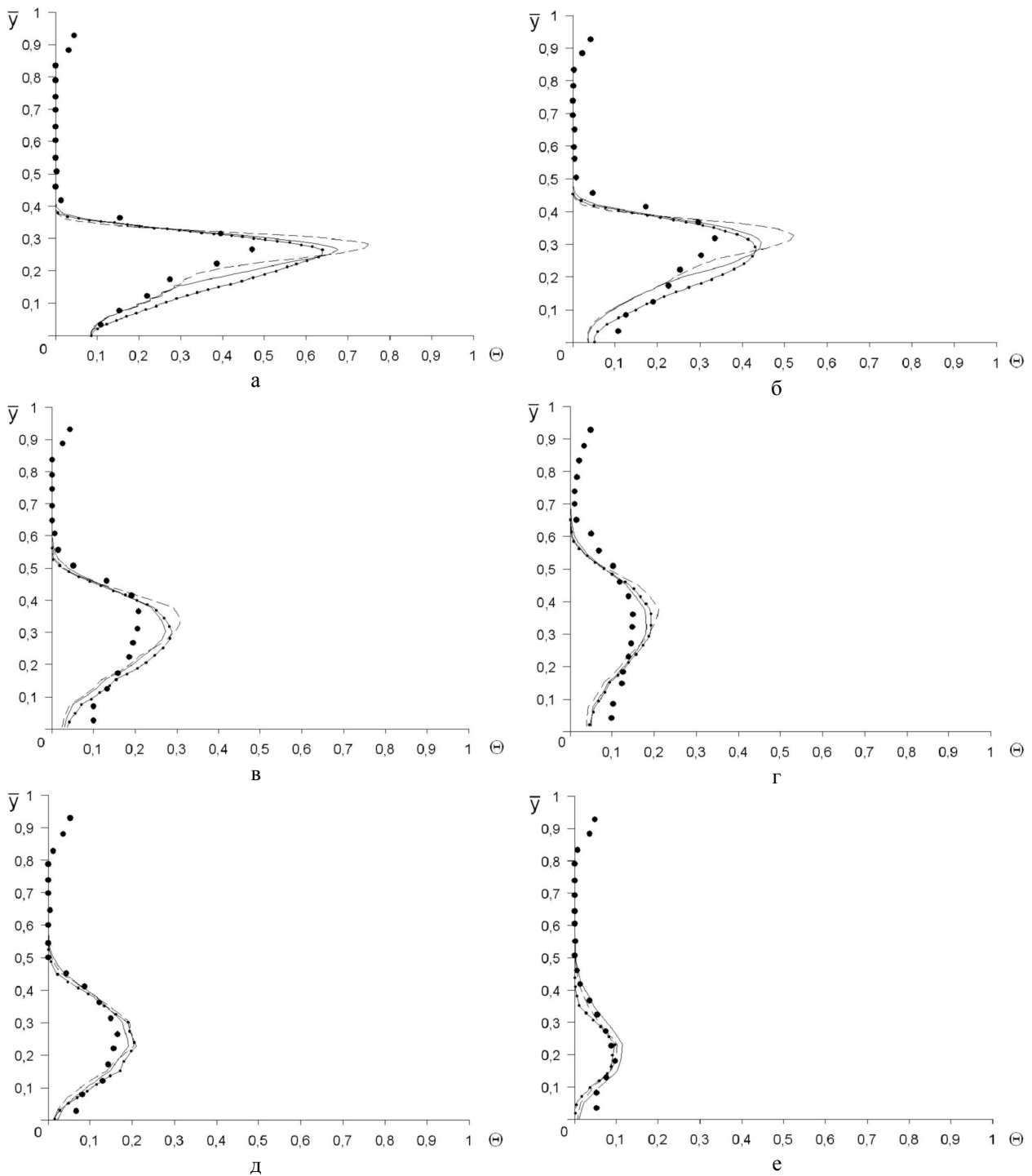


Рис. 2. Профили Θ , рассчитанные с использованием различных моделей турбулентности и схем дискретизации, на вертикалях: а – $x/h = 0,25, z/s = 0$; б – $x/h = 0,5, z/s = 0$; в – $x/h = 1, z/s = 0$; г – $x/h = 2, z/s = 0$; д – $x/h = 1, z/s = 0,3$; е – $x/h = 1, z/s = 0,5$; — — — k-ε стандартная, 1-й порядок; ————— k-ε усовершенствованная, 1-й порядок; -·-·-· k-ε усовершенствованная, 3-й порядок; ● — эксперимент

Для большей физической общности при задании исходных данных расчета диаметр узкого сечения трубы $D_0 = 0,045$ м был вычислен по суммарной эффективной площади отверстий модельной КС, в составе которой испытывалось УПС, а параметры воздуха взяты из протокола испытаний. Тем самым в обоих объектах достигалось приблизительное ра-

венство чисел Рейнольдса $Re \geq 2 \cdot 10^5$, что обеспечивало автомодельность течений в них. Диаметр широкого сечения трубы $D_1 = D_2 = 0,09$ м. Длина узкого участка $l_0 = 0$, широкого – $l_2 = 3$ м. Интенсивность турбулентности полагалась равной 4,5 %, масштаб турбулентности – 7 % диаметра D_0 . Распределения скорости и параметров турбулентности на входе в

трубу полагались равномерными. Расчет выполнялся в трехмерной постановке с использованием усовершенствованной модели турбулентности $k-\epsilon$ Ши и др. [11] и схемы аппроксимации 3-го порядка MUSCL Ван Лиры [14]. В силу осевой симметрии трубы в расчетную область включена ее четверть, ограниченная вращательно периодическими границами. Расчетная сетка включала 455155 тетраэдральных ячеек. Обработка результатов численного расчета включала определение интегральных среднemasсовых значений полных давлений p^* , скорости w_0 , плотности ρ в сечениях «0» и «2» с последующим расчетом коэффициента гидравлического сопротивления по формуле

$$\xi_{CFD} = \frac{p_0^* - p_2^*}{\rho w_0^2 / 2}. \quad (12)$$

Для тех же исходных данных был выполнен расчет коэффициента гидравлического сопротивления трубы по инженерным формулам, обобщающим экспериментальные данные [13]. Различие между численной и инженерной оценками коэффициента гидравлического сопротивления трубы составило 5,4 % (относительных).

3. Расчет качества смешения УПС

Для исследования характеристик УПС разработки ГП «Ивченко-Прогресс» для низкоэмиссионных КС ГТУ по неравномерности состава ТВС были выполнены расчеты течения и тепломассообмена на пяти режимах его работы в составе модельной КС, соответствовавших замерам в испытаниях. Значение пульсационной составляющей скорости на входах в каналы принималось равным 10 % среднemasсовой скорости, а масштаб турбулентности – 7 % диаметра соответствующего канала. Распределения всех независимых переменных во входных сечениях каналов полагались равномерными. Во всех расчетах использовалась усовершенствованная модель турбулентности $k-\epsilon$ Ши и др. [11] и схема аппроксимации 3-го порядка MUSCL Ван Лиры [14]. Турбулентное число Шмидта принималось равным 0,7.

С целью обеспечения максимального пространственного разрешения течения в основном контуре УПС, представлявшем наибольший интерес, численное моделирование осуществлялось в два этапа. Вначале выполнялся приближенный расчет в области, охватывавшей всю проточную часть модельной КС с присоединенной ее выходу трубой (рис. 3, а). Затем выполнялся уточняющий расчет в области, включавшей только проточную часть основного контура УПС, ограниченную сечениями «inter26» (вход воздуха) и «inter8» (вход топливного газа в каналы венчика), и добавленный к ней успо-

коительный участок (рис. 2, б). При этом вычисленные в предварительном расчете значения независимых переменных в сечениях «in-ter26» и «inter8» использовались в качестве граничных условий в уточняющем расчете.

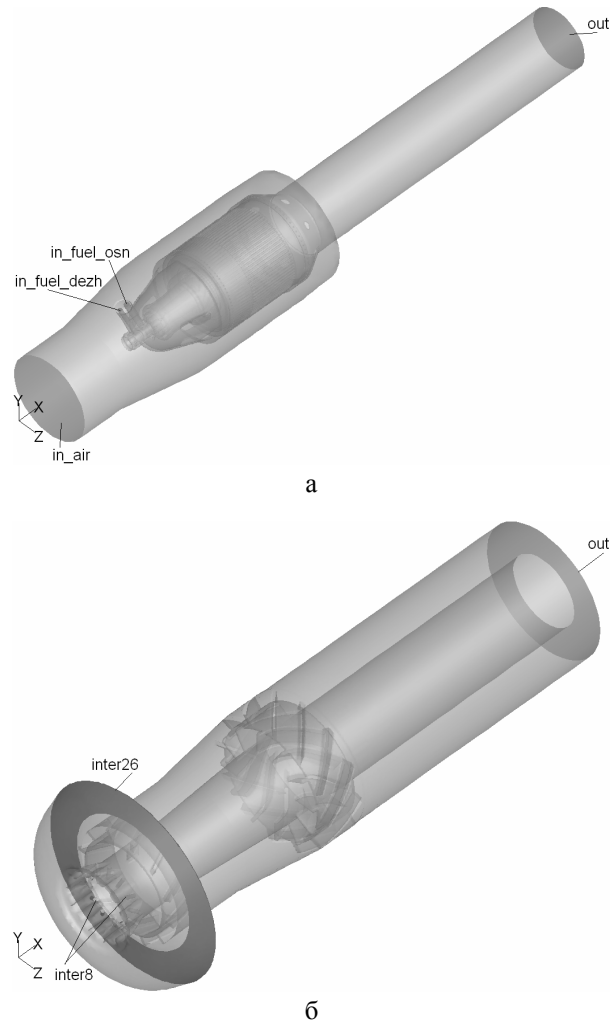


Рис. 3. Расчетные области приближенного (а) и уточняющего (б) расчетов УПС

Расчетная область приближенного расчета, охватывавшая всю проточную часть КС, покрывалась гибридной сеткой, включавшей 3 558 205 ячеек (в основном тетраэдральных; участки гексаэдральной сетки – входной диффузор КС и труба). Сетка была размельчена возле стенок.

Расчетная область уточняющего расчета, включавшая проточную часть основного контура УПС, покрывалась гибридной сеткой, состоявшей из 3 517 454 ячеек (в основном тетраэдральных; участки гексаэдральной сетки – канал между завихрителями и успокоительный участок). Сетка размельчена в каналах венчика и вдоль предполагаемых осей струй топливного газа.

В предварительном расчете на входных границах «in_air» (воздух) и «in_fuel_dezh» (дежурное

топливо), «in_fuel_osn» (основное топливо) задавались массовый расход, параметры турбулентности, температура, направление потока (по нормали к границе) и массовые доли химических компонентов.

На выходе задавались нулевое избыточное статическое давление, направление (по нормали к границе), параметры турбулентности, температура и массовые доли химических компонентов обратных токов.

На стенках задавались условия равенства нулю турбулентной вязкости, теплового потока и нормальных градиентов массовых долей химических компонентов.

В уточняющем расчете на входных границах «inter26» (воздух) «inter8» (основное топливо) задавались профили компонент скорости в проекциях на оси X, Y, Z, профили параметров турбулентности, температура и массовые доли химических компонентов.

Профили параметров потока в сечениях «inter26» и «inter8» были записаны в специальный файл при проведении приближенного расчета, а затем считаны из него при постановке граничных условий на этих сечениях в уточняющем расчете. Условия на остальных границах аналогичны предварительному расчету.

Количественная оценка неравномерности состава ТВС в выходном сечении «inter22» основного контура УПС выполнена с использованием относительной высоты канала основного контура $\bar{y} = y/H$, относительной объемной концентрации углеводородов $[CH] = [CH]/[CH]_{cp}$ и коэффициента вариации

$$W = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ([CH]_i - [CH]_{cp})^2}{n-1}}}{[CH]_{cp}}, \quad (13)$$

где $[CH]_i$ – значение $[CH]$ на принадлежащей сечению «inter22» грани i-й ячейки; $[CH]_{cp}$ – среднемассовое значение $[CH]$ в сечении «inter22»; n – количество граней расчетных ячеек, принадлежащих сечению «inter22».

На рис. 4 и 5 в качестве примера показаны результаты расчета УПС на режиме «1».

Видно, что распределение состава ТВС на выходе из основного контура УПС характеризуется радиальной и окружной неравномерностью. Радиальная неравномерность преобладает над окружной. Радиальная неравномерность порождена односторонней (центральной) подачей топливного газа через каналы венчика. Окружная неравномерность обусловлена локальным подводом воздуха через четыре окна в обтекателе КС.

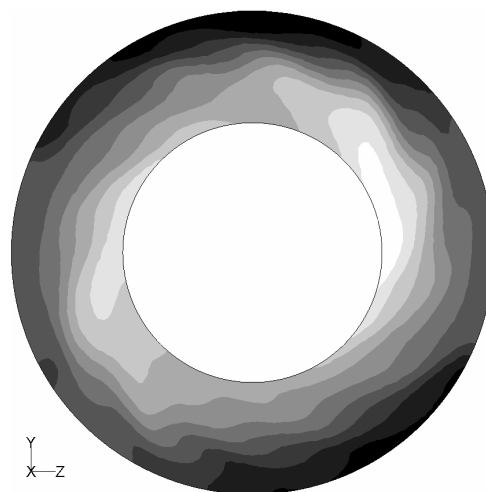


Рис. 4. Расчетное распределение относительной концентрации топливного газа в выходном сечении основного контура УПС: минимальное значение – 0,436 (черный), максимальное значение – 1,62 (белый)

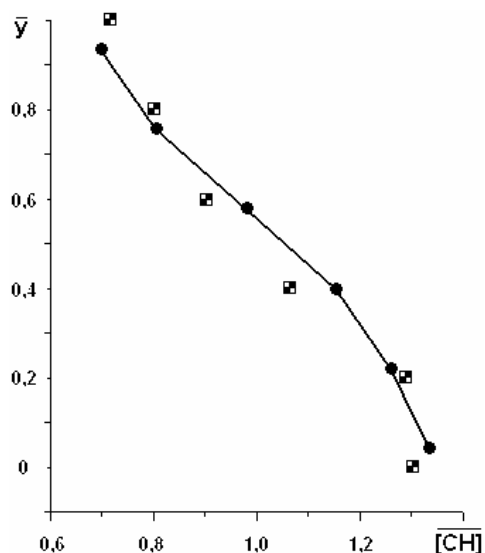


Рис. 5. Радиальные профили осредненной в окружном направлении относительной концентрации топливного газа в выходном сечении основного контура УПС: ● – расчет; ■ – эксперимент

Расчет показал, что общая неравномерность состава ТВС (коэффициент вариации) на выходе из основного контура УПС на исследованных режимах изменяется в узком диапазоне $W = 0,252 \dots 0,285$. С увеличением коэффициента избытка воздуха в основном контуре на 1% коэффициент вариации возрастает примерно на 0,3% (относительных). Это обусловлено уменьшением глубины проникновения струй топливного газа в сносящий поток воздуха.

4. Расчет гидравлического сопротивления УПС

Для оценки потерь полного давления в УПС разработки ГП «Ивченко-Прогресс» были использованы результаты численного расчета течения и теплообмена на режиме «1» (см. разд. 2) с учетом с неравномерного профиля скорости и параметров турбулентности на входе в КС.

Потери давления в основном контуре УПС определялись по формуле:

$$\delta P_{\text{осн}} = \frac{P_{\text{inter24}}^* - P_{\text{inter22}}^*}{P_{\text{inter24}}^* + P_{\text{раб}}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где P_{inter24}^* – полное среднемассовое избыточное давление в сечении «inter24» (окна в обтекателе КС); P_{inter22}^* – полное среднемассовое давление избыточное в сечении «inter22» (выход из основного контура в жаровую трубу); $P_{\text{раб}}$ – рабочее давление, принимавшееся равным абсолютному статическому давлению воздуха перед мерным соплом.

Аналогичным образом определялись потери давления в дежурном контуре УПС:

$$\delta P_{\text{деж}} = \frac{P_{\text{inter3}}^* - P_{\text{inter18}}^*}{P_{\text{inter3}}^* + P_{\text{раб}}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

где P_{inter3}^* – полное среднемассовое избыточное давление в сечении «inter3» (вход в дежурный контур); P_{inter18}^* – полное среднемассовое избыточное давление в сечении «inter18» (выход из дежурного контура в жаровую трубу).

Различие между численными и экспериментальной оценками потерь полного давления в основном и дежурном контурах УПС составило 8,9 и 12,4 % (относительных) соответственно.

5. Экспериментальные исследования УПС

Экспериментальная оценка качества смешения и гидравлического сопротивления УПС в составе модельной КС осуществлялась по результатам траверсирования потока с целью измерения полей концентрации топливного газа [СН] и полного давления P^* на выходе из УПС.

Концентрация [СН] измерялась анализатором углеводородов модели 402 (Бекман). Диапазон измерения концентраций [СН] = 0 ... 50 % объемных.

Измерения [СН] и P^* выполнялись с помощью одного зонда, подключая на выход зонда поочередно разные приборы. Координаты точек отбора в траверсируемом сечении определялись в полярной сис-

теме координат. Пошаговое перемещение зонда в следующее угловое положение и вдоль радиуса осуществлялось оператором дистанционно по измерительному лимбу координатного устройства. В каждой точке поля регистрировались: параметры работы испытательного отсека, координаты точки отбора, [СН] и P^* .

После окончания траверсирования поля, строилось его электронное отображение в виде цветных точек на экране монитора, вычислялись среднемассовые значения измеренных параметров, коэффициент вариации W по формуле (13), потери давления по формулам (14) и (15) и строился радиальный профиль осредненной в окружном направлении относительной концентрации топливного газа (см. рис. 5).

Заключение

Выполнено расчетно-экспериментальное исследование УПС разработки ГП «Ивченко-Прогресс» для низкоэмиссионных КС ГТУ по критериям качества смешения и гидравлического сопротивления. Разработанная методология показала свою эффективность. Целесообразно использовать ее в цикле проектирования и доводки аналогичных изделий.

Литература

1. Постников А.М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ / А.М. Постников; под ред. Е.А. Гриценко. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2002. – 286 с.
2. Проблема и пути создания малотоксичных камер сгорания для перспективных стационарных ГТУ / А.Г. Тумановский, М.Н. Гутник, В.Д. Васильев, Л.В. Булысова, М.М. Гутник // Теплоэнергетика. – 2006. – № 7. – С. 22-29.
3. Кузнецов В.Р. Образование окислов азота в камерах сгорания ГТД / В.Р. Кузнецов // Тр. ЦИАМ. – М.: ЦИАМ, 1983. – № 1086. – С. 8-18.
4. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Лефевр. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
5. Щетинков Е.С. Физика горения газов / Е.С. Щетинков. – М.: Наука, 1965. – 739 с.
6. Premixer Design for High Hydrogen Fuels [Электронный ресурс] / Final Report. GE Energy. – 2005. – 115 p. – Режим доступа: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/889756-ixNplE/889756.pdf>. – Заголовок с экрана.
7. Булысова Л.А. Использование программного комплекса FlowVision при доводке конструкции малотоксичной камеры сгорания [Электронный ресурс] / Л.А. Булысова. – 8 с. – Режим доступа: http://thesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_sapr0307.pdf. – Заголовок с экрана.

8. *Analysis of the Fuel Injection in Gas Turbine Premixing Systems by Experimental Correlations and Numerical Simulations* / G. Riccio, L. Schoepflin, P. Adami, F. Martelli // *Proceedings of GT2006 ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air. – Barcelona. May 8-11, 2006 (GT2006-90174).* – 13 p.

9. *Расчетно-экспериментальная оптимизация низкоэмиссионных горелочных устройств* / С.Ф. Жданов, А.З. Шайхутдинов, Д.А. Максимов, Д.В. Скиба // *Газотурбинные технологии. – 2007. – № 4. – С. 8-13.*

10. *Laundry B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence* / B.E. Laundry, D.B. Spalding // *Academic Press, London, England. – 1972. – P. 15-22.*

11. *A New – Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development*

and Validation / T.-H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu // *Computers Fluids. – 1995. – № 24(3). – P. 227-238.*

12. *Холдмен. Смещение ряда струй с поперечным потоком, ограниченным стенками* / Холдмен, Уолкер // *Ракетная техника и космонавтика. – 1977. – № 2. – С. 138-145.*

13. *Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям* / И.Е. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

14. *Van Leer B. Toward the Ultimate Conservative Difference Scheme. IV. A Second Order Sequel to Godunov's Method* / B. Van Leer // *Journal of Computational Physics. – 1979. – № 32. – С. 101-136.*

Поступила в редакцию 30.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ПОПЕРЕДНЬОГО ЗМІШУВАННЯ ПАЛИВНОГО ГАЗУ З ПОВІТРЯМ ДЛЯ НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ КАМЕР ЗГОРЯННЯ ГТУ

В.Є. Костюк, І.Ф. Кравченко, В.М. Гусев, О.І. Кирилаш

Розроблена методологія розрахунково-експериментального дослідження пристрою попереднього змішування для низькоемісійних камер згоряння ГТУ за критеріями якості змішування і гідравлічного опору з використанням методів обчислювальної аерогідродинаміки. Запропонована числова модель течії і масообміну верифікована на задачах, об'єкти яких мають фізичну єдність з об'єктом дослідження. Описана методика експериментального дослідження пристрою попереднього змішування. Розроблена методологія показала свою ефективність. Доцільно використовувати її в циклі проектування і доводки аналогічних виробів.

Ключові слова: газотурбінна установка, оксиди азоту, пристрій попереднього змішування, якість змішування, гідравлічний опір, математичне моделювання, експеримент.

EXPERIMENT-CALCULATED RESEARCH OF THE FUEL/AIR PREMIXER FOR LOW-EMISSION GAS TURBINE COMBUSTORS

V.Ye. Kostyuk, I.F. Kravchenko, V.N. Gusev, Ye.I. Kirilash

Methodology of the experiment-calculated research of the fuel/air premixer for low-emission gas turbine combustors by mixing performance and flow resistance criteria is developed using CFD methods. Proposed numerical model of the flow and mass transfer is verified on the problems, which objects possess physical community with the research object. Premixer experimental research methodology is described. Developed methodology has shown its efficiency. It is reasonable to use it during designing and refinement cycle of the similar products.

Key words: gas turbine, nitric oxide, premixer, mixing performance, flow resistance, mathematical simulation, experiment.

Костюк Владимир Евгеньевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.

Кравченко Игорь Федорович – канд. техн. наук, первый заместитель руководителя предприятия – главный конструктор, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: i.kravchenko@ivchenko-progress.com.

Гусев Владимир Николаевич – начальник отдела, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03503@ivchenko-progress.com.

Кирилаш Елена Ивановна – аспирант, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.