

УДК 621.43.056

Канд. техн. наук В. Е. Костюк<sup>1</sup>, Е. И. Кирилаш<sup>1</sup>, Д. В. Козел<sup>2</sup>, Т. В. Степанова<sup>2</sup><sup>1</sup> Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков,<sup>2</sup> ГП «Ивченко-Прогресс» имени академика А. Г. Ивченко, г. Запорожье

## ЭКОНОМИЧНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСХОДА СМЕСИТЕЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ ЖАРОВОЙ ТРУБЫ

*Исследовано влияние топологии и разрешения расчетных сеток на точность численных оценок коэффициентов расхода смесительных отверстий жаровой трубы камер сгорания газотурбинных двигателей на основе решения тестовой задачи об истечении воздуха через ряд отверстий в тонкой стенке канала в неподвижную среду при наличии проходящего потока. Для численного моделирования трехмерного турбулентного течения использованы осредненные по Рейнольдсу стационарные уравнения Навье-Стокса несжимаемой жидкости, замыкаемые моделью турбулентности ШИ. Предложен экономичный метод увеличения точности численных оценок указанного параметра на основе применения блочно-структурированных неконформных сеток с иерархическими структурами.*

**Жаровая труба, смесительные отверстия, коэффициент расхода, численное моделирование, расчетные сетки, топология, измельчение, анализ точности**

### Введение

Важным вопросом проектирования камер сгорания ГТД (КС) является определение количества, размеров, формы и расположения отверстий жаровой трубы (ЖТ), обеспечивающих внутри нее такое распределение потоков воздуха, чтобы были надежное зажигание, эффективное и устойчивое горение, требуемое охлаждение стенок и необходимое поле температуры газа перед турбиной при приемлемых потерях полного давления. Традиционно этот вопрос предварительно решается одномерным гидравлическим расчетом «холодной» КС и окончательно – ее экспериментальной доводкой. В настоящее время, благодаря развитию методов вычислительной аэрогидродинамики, появилась возможность решения подобных задач трехмерным математическим моделированием течения в КС. Повышение точности таких расчетов – актуальная научная задача, имеющая большое практическое значение.

Коэффициенты расхода отверстий ЖТ (в первую очередь – смесительных) относятся к числу ключевых факторов, влияющих на распределение воздуха внутри нее [1], поэтому важно обеспечить максимальную точность их численных оценок. Наряду с совершенствованием физико-математических моделей течения и численных методов, этого можно достичь согласованием размеров, формы и расположения ячеек расчетной сетки с градиентами независимых переменных и направлением течения [2]. При ограниченных вычислительных ресурсах выполнение первого условия ведет к применению неравномерных се-

ток, которые сгущены (имеют большее разрешение) там, где возможно появление больших градиентов независимых переменных, и, наоборот, разрежены (имеют меньшее разрешение) в остальных местах. Выполнение второго условия возможно лишь отчасти и только на структурированных сетках. В силу геометрической сложности расчетной области пространства, в которой отыскивается численное решение задачи о течении в реальной КС, приходится выполнять ее декомпозицию – разделение на подобласти (блоки), в которых возможно выделить хотя бы одно сеточное направление, в наибольшей степени соответствующее преобладающему направлению течения. Экономичной альтернативой обмену данными между блоками путем навязывания условия совпадения сеточных узлов на смежных границах блоков является использование неконформных (нестыкующихся) сеток. В таких сетках значения сеточной функции в узлах, принадлежащих одной смежной границе, определяются не непосредственно, а интерполяцией значений сеточной функции в соседних узлах, принадлежащих другой смежной границе, благодаря чему узлы, принадлежащие разным поверхностям сопряжения, могут не совпадать. По этому же принципу возможно локально измельчать структурированную сетку, выделяя в ней иерархически вложенные неконформные блочные структуры. Недостатком такого подхода является дополнительная погрешность интерполяции.

Применение блочно-структурированной неконформной сетки с иерархическими структурами

в составе гибридной сетки, включавшей 2,75 млн. ячеек, при моделировании течения в одногорелочном секторе КС ТРДДФ GTX-35VS Kaveri позволило Сриниваса Рао и др. [3] получить более точные численные оценки потерь полного давления в КС, чем Ананда Редди и др. [4], моделировавших тот же объект в аналогичной постановке на нерегулярной тетраэдрической сетке, включавшей 8,7 млн. ячеек. Точность численных оценок распределения массового расхода воздуха по отверстиям ЖТ указанными выше авторами не исследовалась. В то же время максимальные относительные различия между численными и измеренными оценками относительного массового расхода воздуха через отверстия ЖТ, полученные различными авторами при интегрировании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса на сетках, содержащих от 2,5 до 1,8 млн. ячеек, находятся в пределах от 15 % до 20 % [5–7], а на сетках, содержащих менее 0,3 млн. ячеек, превышают 70 % [8, 9]. В связи с этим представляет интерес выяснить, какую именно топологию расчетной сетки предпочтительнее использовать, а также где именно и как именно следует измельчать сетку для получения максимально достижимой на располагаемых вычислительных ресурсах точности численных оценок коэффициентов расхода смесительных отверстий ЖТ реальных КС.

Такая попытка была впервые предпринята авторами работы [10] на основе решения тестовой задачи о течении в трубе с диафрагмой. Установлено, что поддержание размера граничной ячейки, обеспечивающего значение параметра  $\tilde{y}^+ \approx 30$ , позволяет рассчитать коэффициенты расхода смесительных отверстий ЖТ с относительной погрешностью несколько процентов при условии достаточного разрешения сеткой слоя смешения между струей воздуха, протекающего через отверстие, и вихревым течением, омывающим его цилиндрическую поверхность, для чего предпочтительнее использовать кусочно-равномерные расчетные сетки, измельченные на прилегающем к цилиндрической поверхности участке толщиной  $\Delta \approx R_0(1 - \sqrt{\mu})$ , где  $R_0$  – радиус отверстия. Величина  $\tilde{y}^+$  представляет собой усредненное по длине цилиндрической поверхности отверстия в стенке значение параметра  $y^+ = yu^+/\nu$ , где  $y$  – расстояние от стенки до центра граничной ячейки;  $u^+ = \sqrt{\tau_w}/\rho$  – динамическая скорость,  $\tau_w$  – напряжение трения на стенке;  $\nu, \rho$  – кинематическая вязкость и плотность соответственно.

При перетекании воздуха из кольцевого канала (КК) в ЖТ через отверстия в ее стенке, в

отличие от задачи о течении в трубе с диафрагмой, только часть воздуха, входящего в КК, протекает через отверстия. Остальная часть воздуха проходит мимо них. В этом случае коэффициент расхода отверстий в основном определяется отношением сил давления к инерционным силам, которое характеризуется критерием динамического подобия Эйлера  $Eu = \Delta p/q$ , где  $\Delta p$  – статическое давление в КК, избыточное над давлением в ЖТ,  $q$  – скоростной напор в КК и в ЖТ, и в меньшей степени – иными факторами: относительной площадью поперечного сечения отверстий  $\bar{f} = F_0/F_{KK}$ , их формой, взаимным расположением, наличием закрутки потока и т.п. [1, 11].

Цель настоящей работы состоит в уточнении методических приемов построения расчетных сеток в районе смесительных отверстий ЖТ на основе решения тестовой задачи об истечении воздуха через ряд отверстий в тонкой стенке канала в неподвижную среду при наличии проходящего потока.

### 1 Методика исследования

Для достижения поставленной цели выполнены численные расчеты течения в одном ряде отверстий. В качестве объекта исследования выбран второй ряд смесительных отверстий ЖТ КС ТРДД АИ-222-25 с  $\bar{\ell} = \ell/D_0 = 0,09$ , где  $D_0$  – диаметр отверстия;  $\ell$  – толщина стенки (рис. 1).

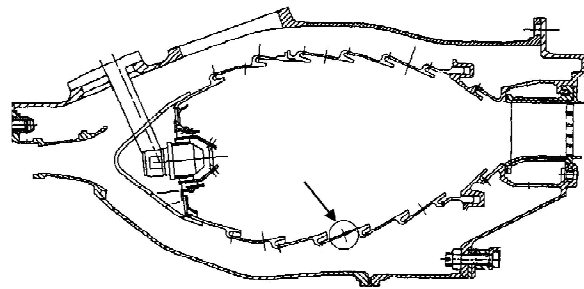


Рис. 1. Объект исследования – второй ряд смесительных отверстий ЖТ КС ТРДД АИ-222-25

Исследование проводилось в трехмерной постановке для несжимаемого стационарного течения, моделировавшегося осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса, замыкаемыми моделью турбулентности  $k$ - $\epsilon$  Ши и др. [12] со стандартными функциями стенки.

Расчетная схема представляла собой плоскую щель, в которую параллельно ее стенкам вставлена плоская пластина толщиной  $\ell$ , перфорированная одним рядом отверстий диаметром  $D_0$  с относительным шагом  $z/D_0 = 5,56$ . Канал над пластиной относительной высотой  $h_{KK}/D_0 = 1,78$  имитировал КК. Канал под пластиной относи-

тельной высотой  $h_{ЖТ}/D_0 = 11,1$  имитировал ЖТ. В силу поступательной периодичности течения в направлении оси  $z$  и равенства нулю компоненты скорости  $V_z$  в плоскостях периодичности численное решение задачи отыскивалось в области пространства, ограниченной параллелепипедом, грани которого образованы стенками щели, двумя плоскостями  $YOx$ , одна из которых проходит через центр отверстия, другая – посередине между отверстиями, и двумя плоскостями  $zOy$ , соответствующими входу и выходу из щели.

Расчетная область покрывалась сетками трех топологий:  $A$  – гибридная (гексаэдры и тетраэдры) конформная (рис. 2,  $a$ );  $B$  – гексаэдрическая блочно-структурированная неконформная;  $B$  – гек-

саэдрическая блочно-структурированная неконформная с иерархическими структурами (рис. 2,  $b$ ). Сетки различались разрешением в районе отверстия, размерами и локализацией измельченной области (табл. 1). Сетка № 1 соответствовала по топологии и разрешению сеткам, использованным в работах [5–7]. Сетка № 2 и сетки № 4–13 построены с близкими поперечными размерами пристеночных ячеек, примыкающих к цилиндрической поверхности отверстия. Сетка № 3 – базовая неконформная сетка, близкая по параметрам к сетке № 1. Сетки с иерархическими структурами № 4–15 получены из сетки № 3 путем ее различного локального измельчения в окрестности отверстия.

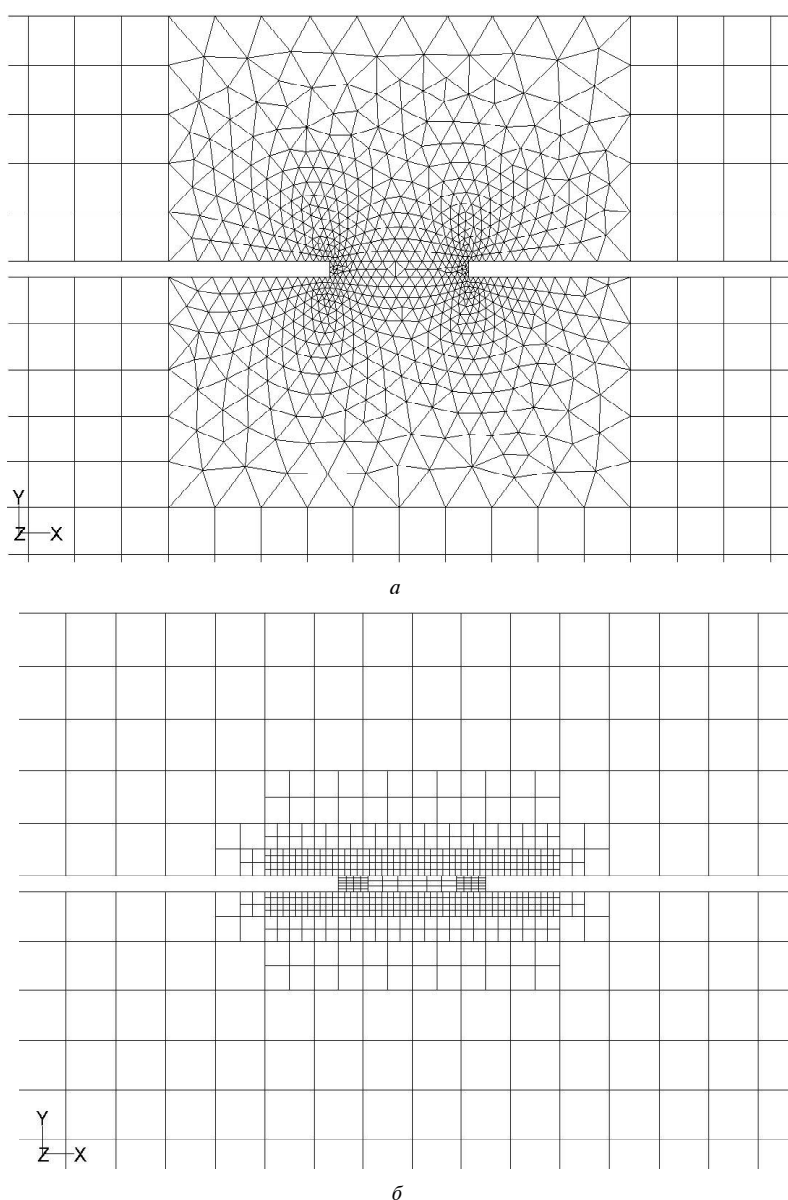


Рис. 2. Расчетные сетки:

$a$  – гибридная конформная № 2;  $b$  – блочно-структурированная неконформная с иерархическими структурами № 10

В качестве граничных условий на входе в КК задавалась скорость с равномерным профилем, интенсивность турбулентности ( $I = 10\%$ ) и гидравлический диаметр, на выходе КК ставилось условие постоянства статического давления в поперечном сечении, избыточного над давлением в ЖТ. Критерий Эйлера поддерживался равным  $Eu = 30,54$ . На входе и выходе ЖТ задавалось нулевое избыточное статическое давление. Численное интегрирование дифференциальных уравнений в частных производных осуществлялось итерационно методом контрольного объема с использованием схемы аппроксимации конвективных членов третьего порядка точности MUSCL Ван Лира [13]. Уравнение неразрывности в пределе малых чисел Маха удовлетворялось с помощью процедуры коррекции давления SIMPLE [14].

Численные оценки коэффициента расхода отверстия определялись по формуле [11]:

$$\mu_c = GF_0^{-1}(2\rho\Delta p)^{-0,5}, \quad (1)$$

где  $G$  – массовый расход воздуха через отверстие;  $F_0$  – площадь поперечного сечения отверстия;  $\rho$  – плотность;  $\Delta p$  – статическое давление в КК, избыточное над давлением в ЖТ.

Точность численных расчетов оценивалась путем сравнения их результатов с экспериментальными данными, аппроксимированными формулой [15]

$$\mu = 0,6\left[1 - (1 + m)^{-n}\right], \quad (2)$$

где  $m = \sqrt{Eu}$ ;  $n = 2\bar{f}^2 + 2,34\bar{f} + 2,2$ ,  $\bar{f}$  – отношение площади поперечного сечения отверстия к площади поперечного сечения КК, приходящейся на одно отверстие.

Относительная погрешность численного расчета определялась по формуле

$$\delta_\mu = \frac{\mu_c - \mu}{\mu} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $\mu_c$  и  $\mu$  – значения коэффициента расхода, вычисленные по формулам (1) и (2) соответственно.

## 2 Результаты исследования

Результаты расчета истечения воздуха через ряд отверстий в тонкой стенке канала в неподвижную среду при наличии проходящего потока показаны на рис. 3. Численные оценки коэффициента расхода отверстия и их погрешности приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что расчет на гибридной конформной сетке № 1, построенной с параметрами, близкими к использованным в работах [5–7], дает относительную погрешность  $\delta_\mu = 12,3\%$ . В то же время расчет на гексаэдрической блочно-структурированной неконформной сетке № 3, близкой по параметрам к сетке № 1, дает относительную погрешность  $\delta_\mu = 17,2\%$ . Большая погрешность, очевидно, обусловлена дополнительной ошибкой интерполяции между узлами неконформной сетки.

Исследование влияния степени измельчения сетки и размеров измельченной области в окрестности отверстия на точность численных оценок

Таблица 1 – Численные оценки коэффициентов расхода, полученные на различных сетках

Сетка	$T$	$n$	$\Delta n_{1oms}$	$\Delta n_{20oms}$	$n_\ell$	$\bar{h}_{y1,c}$	$\bar{h}_{y1,c}$	$\tilde{y}^+$	$\mu_c$	$\mu$	$\delta_\mu, \%$
№ 1	A	43824	37254	745080	1	1,29	1,54...3	124	0,6662	0,5932	12,3
№ 2	A	72997	95600	1912000	3	0,43	0,51...3	16	0,6231	0,5932	5,0
№ 3	B	25197	0	0	3	0,9	3	95	0,6954	0,5932	17,2
№ 4	B	36005	21616	432320	6	0,45	0,75	52	0,6950	0,5932	17,2
№ 5	B	29117	7840	156800	6	0,45	0,75	58	0,6924	0,5932	16,7
№ 6	B	25995	1596	31920	6	0,45	1,5	67	0,6848	0,5932	15,4
№ 7	B	27171	3948	78960	6	0,45	0,75	59	0,6561	0,5932	10,6
№ 8	B	28431	6468	129360	6	0,45	0,75	58	0,6497	0,5932	9,5
№ 9	B	31567	12740	254800	6	0,45	0,375	64	0,6389	0,5932	7,7
№ 10	B	36859	23324	466480	6	0,45	0,375	62	0,6384	0,5932	7,6
№ 11	B	27031	3668	73360	6	0,45	1,5	63	0,6876	0,5932	15,9
№ 12	B	31091	11788	235760	6	0,45	0,75	56	0,6502	0,5932	9,6
№ 13	B	45231	40068	801360	6	0,45	0,375	60	0,6350	0,5932	7,0
№ 14	B	113810	177226	3544520	12	0,225	0,1875	26	0,6153	0,5932	3,7
№ 15	B	36313	22232	444640	3	0,9	0,375	156	0,6633	0,5932	11,8

Примечание.  $T$  – топология;  $n$  – общее количество ячеек в домене;  $\Delta n_{1oms}$ ,  $\Delta n_{20oms}$  – приросты количества ячеек в результате измельчения сетки в окрестности одного и 20 отверстий, соответственно (по сравнению с сеткой № 3);  $n_\ell$  – количество ячеек, уложенных вдоль толщины стенки;  $\bar{h}_{y1,c}$  и  $\bar{h}_{y1,c}$  – отнесенные к толщине стенки поперечные размеры пристеночных ячеек, примыкающих к цилиндрической поверхности отверстия и к стенке канала в окрестности отверстия, соответственно.

коэффициента расхода выполнялось в расчетах на гексаэдрических блочно-структурированных неконформных сетках с иерархическими структурами № 6–14. Измельчение двух слоев ячеек, примыкающих к цилиндрической поверхности отверстия, одного слоя ячеек в области над отверстием и одного слоя ячеек под отверстием (сетка № 6) уменьшило относительную погрешность численного расчета до  $\delta_{\mu} = 15,4 \%$ . Последующее измельчение одного слоя ячеек в области над отверстием и одного слоя ячеек в области под отверстием сетки № 6 (сетка № 7) до  $\delta_{\mu} = 10,6 \%$ . Наконец, третье измельчение одного слоя ячеек в области над отверстием и одного слоя ячеек в области под отверстием сетки № 7 (сетка № 9) уменьшило относительную погрешность численного расчета до  $\delta_{\mu} = 7,7 \%$ .

Измельчение, принципиально аналогичное выполненному на сетке № 7, но охватывающее два слоя ячеек в области над отверстием и два слоя ячеек под отверстием (сетка № 8), уменьшило относительную погрешность численного расчета до  $\delta_{\mu} = 9,5 \%$ . Последующее измельчение двух слоев ячеек в области над отверстием и двух слоев ячеек в области под отверстием сетки № 8 (сетка № 10) уменьшило относительную погрешность численного расчета до  $\delta_{\mu} = 7,6 \%$ .

Измельчения, принципиально аналогичные выполненным на сетках № 6 (сетка № 11), № 7 и № 8 (сетка № 12), № 9 и № 10 (сетка № 13), но охватывающие три слоя ячеек в области над отверстием и три слоя ячеек под отверстием, дали

результаты, близкие к приведенным выше.

Последующее измельчение сетки № 10 (сетка № 14) в двух слоях ячеек в области над отверстием и двух слоях ячеек в области под отверстием дало наименьшую погрешность расчета  $\delta_{\mu} = 3,7 \%$ , однако, оно не достижимо на сетках с общим количеством ячеек 2–3 млн., обычно используемых при трехмерном моделировании однопоточных отсеков КС ( $\Delta n_{20отв} = 3544520$ ).

Расчет на гибридной конформной сетке № 2, построенной с поперечными размерами пристеночных ячеек, примыкающих к цилиндрической поверхности отверстия, близкими к неконформным сеткам, в которых измельчены два слоя ячеек в этой области, показал высокую точность ( $\delta_{\mu} = 5,0 \%$ ), однако, такое измельчение также не достижимо на сетках с общим количеством ячеек 2–3 млн. ( $\Delta n_{20отв} = 1912000$ ).

Исследование влияния локализации области измельчения в окрестности отверстия выполнено в расчетах на гексаэдрических блочно-структурированных неконформных сетках с иерархическими структурами № 4, № 5 и № 15. Расчеты показали, что при отсутствии измельчения в области над отверстием (сетка № 4), также как и при отсутствии измельчения в области под отверстием (сетка № 5), погрешность расчетов велика ( $\delta_{\mu} = 17,2 \%$  и  $\delta_{\mu} = 16,7 \%$  соответственно) по сравнению с измельченной в данной области сеткой № 12 ( $\delta_{\mu} = 9,6 \%$ ). Отсутствие измельчения ячеек, примыкающих к цилиндрической поверхности отверстия (сетке № 15), увеличивает

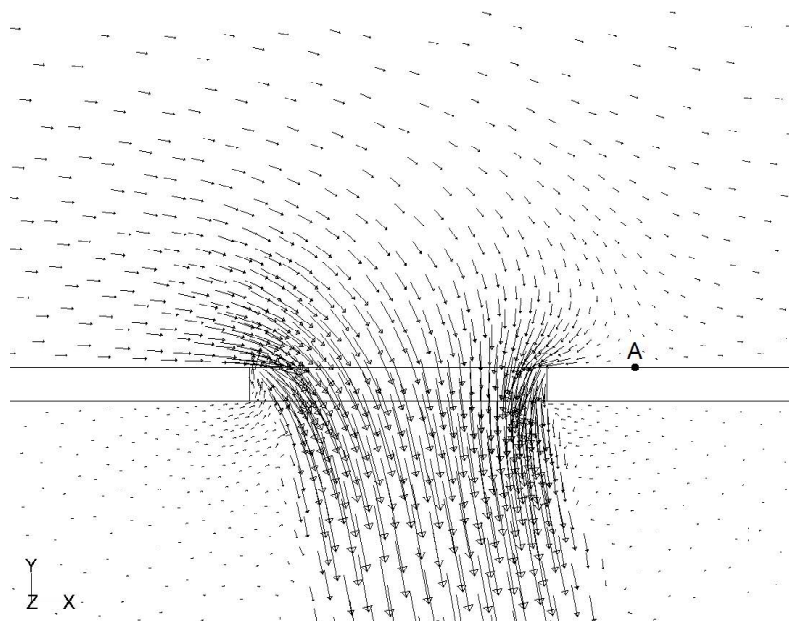


Рис. 3. Векторы скорости воздуха, истекающего через отверстие в тонкой стенке канала в неподвижную среду при наличии проходящего потока, рассчитанные на сетке № 2 (A – точка присоединения проходящего потока)

погрешность расчета до  $\delta_\mu = 11,8\%$  (расчет на сетке № 10, где такое измельчение сделано, дает  $\delta_\mu = 7,6\%$ ).

Из выполненного анализа следует, что для увеличения точности численного расчета коэффициента расхода отверстия в тонкой стенке при наличии проходящего потока необходимо подробно разрешать расчетной сеткой слои ячеек, примыкающих к цилиндрической поверхности отверстия, слои ячеек в области над отверстием и слои ячеек в области под отверстием, тем самым описывая область формирования радиальных составляющих скорости воздуха при обтекании кромок отверстия, поворота струи и слой смещения между струей воздуха, протекающего через отверстие, и вихревым течением, омывающим его цилиндрическую поверхность. Потребный радиус области измельчения, по-видимому, можно ограничить точкой присоединения проходящего потока в КК (см. рис. 3).

При соблюдении описанных выше принципов построения сеток и соответствующих размерах ячеек вполне возможно обеспечить величину относительной погрешности численного расчета коэффициента расхода смесительных отверстий ЖТ в несколько процентов. Тем не менее на практике, очевидно, необходим компромисс между доступными вычислительными ресурсами и приемлемой точностью расчета данного параметра.

#### Заключение

Выполненное исследование влияния топологии и разрешения расчетных сеток на точность численных оценок коэффициентов расхода смесительных отверстий ЖТ на основе решения тестовой задачи об истечении воздуха через ряд отверстий в тонкой стенке канала в неподвижную среду при наличии проходящего потока позволило уточнить методические приемы построения расчетных сеток, разработанные ранее на основе решения тестовой задачи о течении в трубе с диафрагмой, и предложить экономичный метод увеличения точности численного расчета указанного параметра путем применения блочно-структурированных неконформных сеток с иерархическими структурами. Направления дальнейших исследований авторы видят в установлении количественных связей между точностью численных оценок гидравлических параметров и точностью численных оценок основных показателей качества работы КС.

#### Перечень ссылок

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Лефевр. — М. : Мир, 1986. — 566 с.
2. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2 / К. Флетчер. — М. : Мир, 1991. — 552 с.

3. Srinivasa Rao M. Performance Improvement of an Aero Gas Turbine Combustor / M. Srinivasa Rao, G. Sivaramakrishna // Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: June 8–12, 2009, Orlando, Florida, USA (GT2009-59928). — 6 p.
4. Ananda Reddy G. Non-reacting Flow Analysis from Combustor Inlet to Outlet using Computational Fluid Dynamics Code / G. Ananda Reddy, V. Ganesan // Defence Science Journal. — 2004. — Vol. 54. — N. 4. — P. 455–467.
5. An Efficient Strategy For The Design Optimization of Combustor Exit Temperature Profile / Motsamai O.S., Visser J. A., Morris M., de Kock D. J. // Proceedings of ASME Turbo Expo 2006: May 8–11, 2006, Barcelona, Spain (GT2006-91325). — 11 p.
6. A New Paradigm for Simulation of Turbulent Combustion in Realistic Gas Turbine Combustors Using LES / [Constantinescu G., Mahesh K., Apte S. etc.] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2003 : June 16–19, 2003, Atlanta, Georgia, USA (GT2003-38356). — 14 p.
7. Application of an Advanced CFD-Based Analysis System to the PW6000 Combustor to Optimize Exit Temperature Distribution — Part I: Description and Validation of the Analysis Tool / [Malecki R. E., Rhie Ch.M., McKinney R.G. etc.] // Proceedings of ASME TurboExpo 2001. June 4–7, 2001, New Orleans, Louisiana (2001-GT-0062). — 9 p.
8. CFD Simulations for the Development of Gas Turbine Low-Nox Hydrogen Combustor / [Riccardi J., Gheri P., Giorgiani G. etc.] // Proceedings of WHEC 16. June 13–16, 2006, Lyon, France. — P. 221–229.
9. Cold Flow Analysis of an Aero-Engine Gas Turbine Combustor Configuration / [Muralidhara H. S., Shembharkar T. R., Pai B. R. etc.] // Papers of 15th International Symposium on Air Breathing Engines (XV ISABE). September 3–7, 2001, Bangalore, India (ISABE-2001-1233). — 10 p.
10. Костюк В. Е. Оптимальное размельчение сетки для численного расчета коэффициентов расхода и гидравлического сопротивления смесительных отверстий жаровой трубы / В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш, В. Н. Гусев // Авиационно-космическая техника и технология. — 2010. — № 1. — С. 65–73.
11. Шандоров Г. С. Истечение из канала в неподвижную и движущуюся среду / Г. С. Шандоров // Журнал технической физики. — 1957. — Т. 27. — № 1. — С. 156–179.
12. A New — Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows — Model Development and Validation / [T.-H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, etc.] // Computers

- Fluids. – 1995. – N 24(3). – P. 227–238.
13. 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. – P. 101–136.
14. Vandoormaal J.P. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows / J. P. Vandoormaal, G.D. Raithby // Numer. Heat Transfer, – 1984. – N. 7. – P. 147–163.
15. Безменов В. Я. Методика гидравлического расчета камер сгорания ГТД на ЭВМ / В. Я. Безменов, А.П. Бородина, Р. С. Валеев. Техн. отчет ЦИАМ № 6759, 1971. – 165 с.

Поступила в редакцию 10.03.2010

**V. Ye. Kostyuk, Ye. I. Kirilash, D. V. Kozel, T. V. Stepanova**

**ECONOMIC METHOD FOR INCREASING ACCURACY OF NUMERICAL CALCULATION OF DISCHARGE COEFFICIENTS OF MIXING ORIFICES OF THE FLAME TUBE**

*Досліджено вплив топології та розділення розрахункових сіток на точність числових оцінок коефіцієнтів витрати змішувальних отворів жарової труби камер згоряння газотурбінних двигунів на основі рішення тестової задачі про витікання повітря крізь ряд отворів в тонкій стінці каналу у нерухоме середовище за наявності прохідного потоку. Для числового моделювання тривимірної турбулентної течії застосовувалися осереднені за Рейнольдсом стаціонарні рівняння Нав'є-Стокса нестисливої рідини, які замикалися моделлю турбулентності Ши. Запропонован економічний метод підвищення точності числових оцінок зазначеного параметра на основі застосування блочно-структурованих неконформних сіток з ієрархічними структурами.*

**Жарова труба, змішувальні отвори, коефіцієнт витрати, числове моделювання, розрахункові сітки, топологія, подібнення, аналіз точності**

*There is investigated influence of the topology and resolution of computational grids on the accuracy of numerical evaluations of discharge coefficients of the mixing orifices of the flame tube of combustion chambers of gas turbine engines. Investigation is based on the solution of test problem about air discharge through several orifices in the thin wall of the channel into the stationary environment in the presence of passing stream. Steady Reynolds averaged incompressible Navier -Stokes equations, closed by Shih turbulence model, are used for numerical modeling of three-dimensional turbulent flow. There is proposed economic method for increasing accuracy of numerical evaluations of the specified parameter on basis of block-structured nonconformal grids with hierarchical structures.*

**Flame tube, mixing orifices, discharge coefficient, numerical modeling, computational grids, topology, refinement, accuracy analysis**