

ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.7.036.3: 621.43.056

DOI:10.34759/vst-2020-1-122-132

ВЛИЯНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ЗА ЛОПАТОЧНЫМ ЗАВИХРИТЕЛЕМ

Александров Ю.Б.* , Нгуен Т.Д.** , Мингазов Б.Г.*** , Сулаиман А.И.****

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ,
КНИТУ-КАИ, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия*

** e-mail: Alexwischen@rambler.ru*

*** e-mail: nguyenthedat1609@gmail.com*

**** e-mail: BGMingazov@kai.ru*

***** e-mail: Armin.wrya@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 27.10.2019

Приведены результаты экспериментального и расчетного исследования в нагретом закрученном потоке распределения полей температур и смещения топлива с окружающим воздухом. Численными расчетами выявлено влияние типа и характерного размера сеточных элементов.

Ключевые слова: камера сгорания ГТД, численное моделирование, закрутка потока, коэффициент смешения, размер сеточного элемента, тип расчётной сетки.

Введение

В большинстве камер сгорания современных газотурбинных двигателей (ГТД) наземного и авиационного назначения на входе в жаровую трубу, концентрично с топливной форсункой, устанавливаются лопаточный завихритель. Завихритель создает закрутку воздуха и способствует наилучшему смешению топлива с воздухом. При закрутке потока в его ядре образуется зона пониженного давления, в результате чего газы с периферии потока возвращаются в корень закручен-

ной струи, и образуется зона обратных токов, благодаря чему стабилизируется горение топлива по срывным характеристикам. Увеличение угла установки лопаток завихрителя приводит к интенсификации образования топливо-воздушной смеси и расширению границ зоны обратных токов, однако при этом увеличиваются гидравлические потери на фронтальном устройстве, что, в свою очередь, вносит вклад в уменьшение мощности или тяги двигателя.

Экспериментальное исследование коэффициента смешения

Качество смешения топлива с воздухом характеризует эффективность работы фронтального устройства. В [1—4] (А. Лефевр, В.А. Костерин, А. Гупта, Р.Б. Ахмедов и др.) предлагается оценивать процесс смешения с помощью коэффициента смешения m , представляющего собой отношение расхода эжектированного воздуха к расходу закрученной струи:

$$m = \frac{G_{\text{Э}}}{G_3}, \tag{1}$$

где $G_{\text{Э}}$ — расход эжектированного воздуха; G_3 — расход закрученной струи.

Для экспериментального исследования процессов смешения с помощью технологии послойного наплавления FMD (*Fused Deposition Modeling*) были созданы различные конструкции лопаточных завихрителей, различающиеся углами установки лопаток завихрителя.

Завихрители помещались на экспериментальную установку (рис. 1). Источником нагнетания воздуха являлась микротурбина 1, поток воздуха от которой проходил через электрический нагревательный элемент 3 и нагревался в зависимости от режима до 100—120 °С. Нагретый поток воздуха проходил через камеру 4, в которой выравнивались поля скоростей и температуры, и проходил через сменные завихрители в открытое пространство, в котором наблюдалась относительно низкая температура 20 °С.

В процессе эксперимента, в осевом и радиальном направлении, замерялись поля температур и полного давления потока. Для вычисления коэффициента смешения m ис-

пользовались распределения температуры и на основании этих измерений рассчитывался коэффициент по формуле

$$m = \frac{T_3^* - T_0^*}{T_0^* - T_V^*}, \tag{2}$$

где T_3^* , T_0^* , T_V^* — соответственно значения температур перед завихрителем, в струе и окружающем воздухе.

На рис. 2 приведены результаты экспериментальных измерений коэффициента смешения в сопоставлении с данными других авторов. Для сравнения результатов измерений по различным конструкциям завихрителей все зависимости были приведены к среднему межлопаточному радиусу завихрителя, который определялся как $R_{\text{зав.ср}} = \frac{d + d_0}{4}$.

Видно, что при отдалении от устья и при увеличении угла установки лопаток завихрителей ϕ коэффициент смешения m возрастает, т.е. возрастает количество эжектированного к струе воздуха.

Аналогичные зависимости получены другими авторами, что свидетельствует о достоверности результатов проведенных измерений.

Таким образом, результаты экспериментального исследования указывают на общую закономерность, характерную для смешения в закрученной струе с окружающим воздухом: 1) с увеличением интенсивности крутки (увеличением угла установки лопаток), в пределах исследованных углов поворота лопаток, возрастает эжекционная

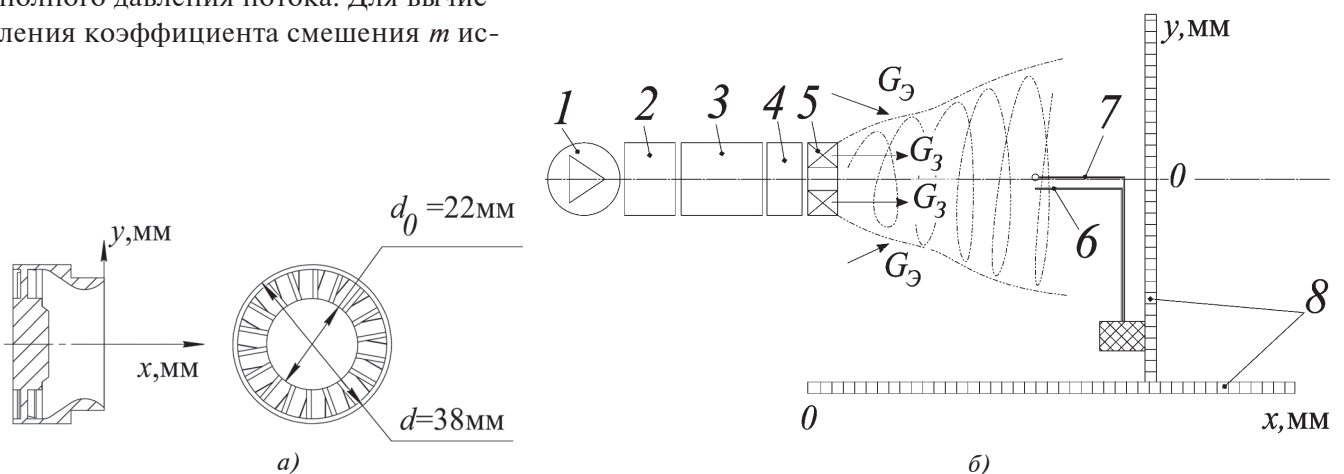


Рис. 1. Схема завихрителя с аксиальным лопаточным аппаратом (а) и экспериментальной установки (б): 1 — нагнетатель воздуха; 2 — дымообразующая машина; 3 — нагревательный элемент; 4 — камера смешения; 5 — завихритель потока; 6 — трубка Пито; 7 — термочувствительный элемент; 8 — направляющая со шкалой измерения; d — наружный диаметр завихрителя; d_0 — диаметр центрального тела завихрителя для крепления лопаток

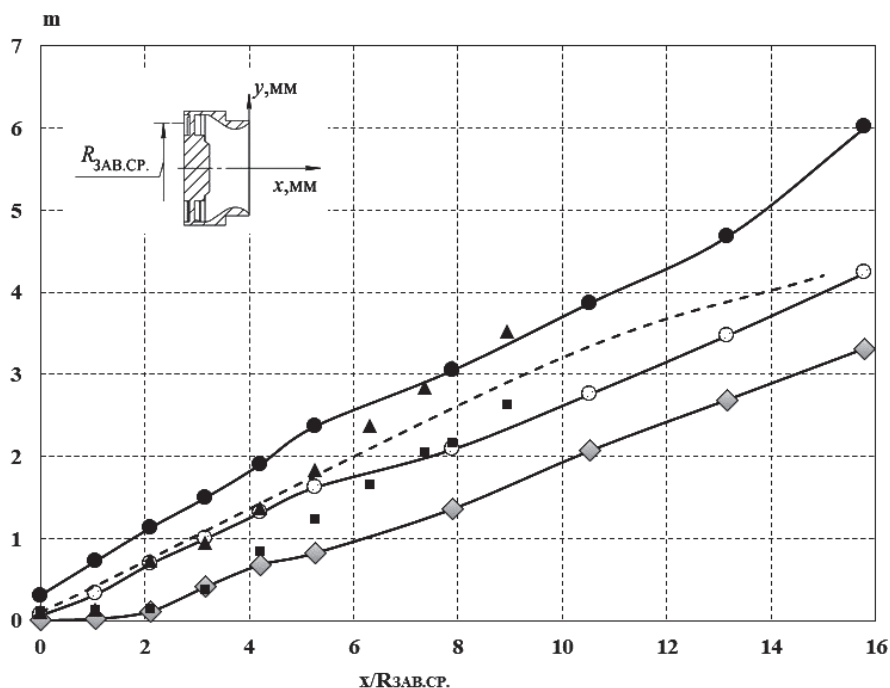


Рис. 2. Сопоставление результатов экспериментального исследования с использованием завихрителей с разными углами установки лопаток ϕ по коэффициенту смещения m вдоль оси ($y = 0$). Эксперимент авторов: \blacklozenge — при $\phi = 15^\circ$, \circ — при $\phi = 30^\circ$, \bullet — при $\phi = 45^\circ$; эксперименты, описанные в работе [1]: \blacksquare — при $\phi = 30^\circ$, \blacktriangle — при $\phi = 45^\circ$; эксперименты, описанные в работе [2]: - - - — при $\phi = 40^\circ$

способность потока; 2) с удалением от устья завихрителя, в осевом направлении закрученного потока увеличивается доля присоединенной (эжектированной) массы воздуха.

Визуализация потока

Для качественной оценки области влияния и структуры закрученного потока производилась

визуализация путем задымления воздуха, подаваемого в завихритель (рис. 3).

Анализ полученных картин показывает, что с увеличением угла установки лопаток завихрителя визуально увеличивается угол раскрытия задымленного потока и уменьшается длина начальной зоны, в которой еще наблюдается прямолинейное движение. Причиной этого служит зона

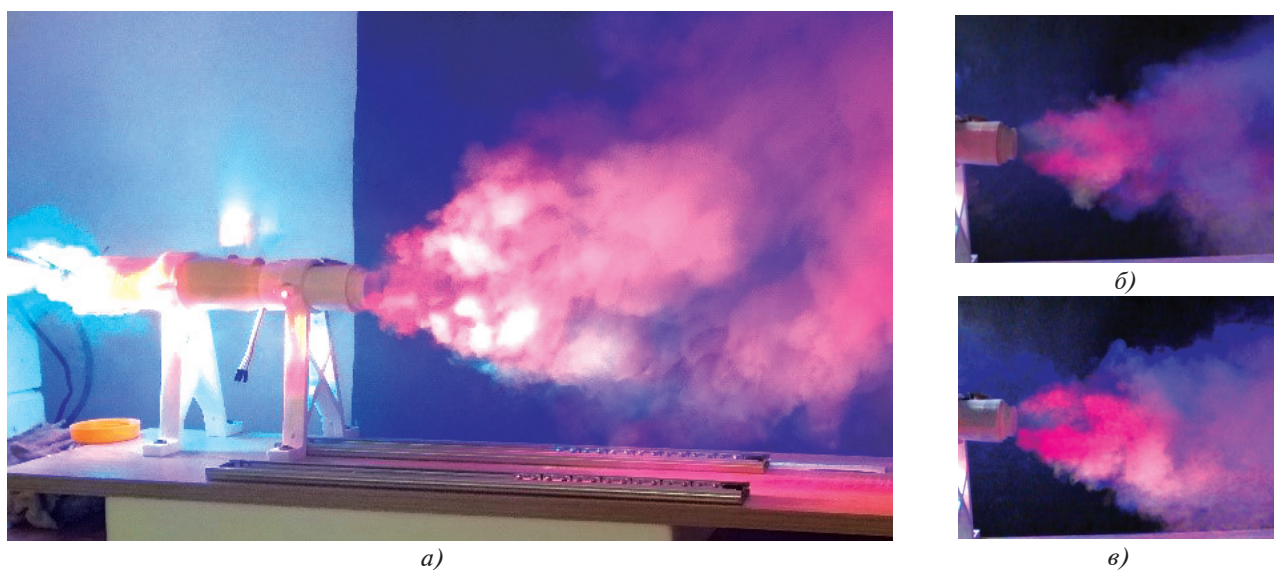


Рис. 3. Визуализация потока путем задымления: a — общий вид; b — угол установки лопаток 30° ; c — угол установки лопаток 45°

обратных токов, размеры которой определяются тангенциальной составляющей скорости закрученного потока. При увеличении закрутки потока зона обратных токов становится больше и приближается к устью завихрителя, что визуально на дымовых картинах расширяет струю у устья завихрителя.

Численное исследование коэффициента смешения

Понять все тонкости процесса смешения можно на основе численного расчета. Для этого была создана расчетная область, имитирующая объем жаровой трубы камеры сгорания, в виде цилиндрического объема, в торце которого установлен завихритель. На входе в завихритель задавались полное давление и температура воздуха по данным эксперимента, а на выходе — атмосферное давление и температура окружающей среды (рис. 4). Дополнительно в расчетной области были созданы точечные датчики для замера параметров в осевом и радиальном направлении потока, имеющие координаты $y = 0 \div 30$ мм.

Как известно, расчетная сетка оказывает сильное влияние на результаты расчета. Она характеризуется: типом и количеством элементов, характерным размером, наличием пристеночного сгущения. Для расчетной области были применены сетки трех основных типов элементов: тетраэдральные, гексаэдральные и полиэдральные. По-

лиэдральные сетки получали путем конвертирования тетраэдральной сетки, при этом количество элементов уменьшалось примерно в шесть раз, а количество узлов увеличивалось примерно в пять раз, что в теории позволяет точнее рассчитывать градиенты изменения параметров по сравнению с тетраэдральной сеткой за счет того, что на один конечный элемент приходится больше узловых точек. Однако такое преобразование не позволяет точно контролировать характерный размер элементов и может оказывать отрицательное влияние на результат из-за увеличения характерного размера сеточного элемента.

Для расчета использовалась комбинированная модель турбулентности DES (*Detached Eddy Simulation*) в нестационарной постановке. Такой подход был принят на основании предварительных сравнительных расчетов с использованием различных моделей турбулентности в стационарной и нестационарной постановке задачи. Подробнее с результатами расчета можно ознакомиться в работах [6, 7]. В работах других авторов также описаны подобные выводы о применимости модели DES к численному расчету фронтных устройств камер сгорания [5, 8–12, 15–17]. Расчет проводился в программе ANSYS Fluent 19.2 с академической лицензией. Для устранения пульсаций параметров все данные осреднялись по точечным датчикам, установленным в расчетной области, по временным шагам.

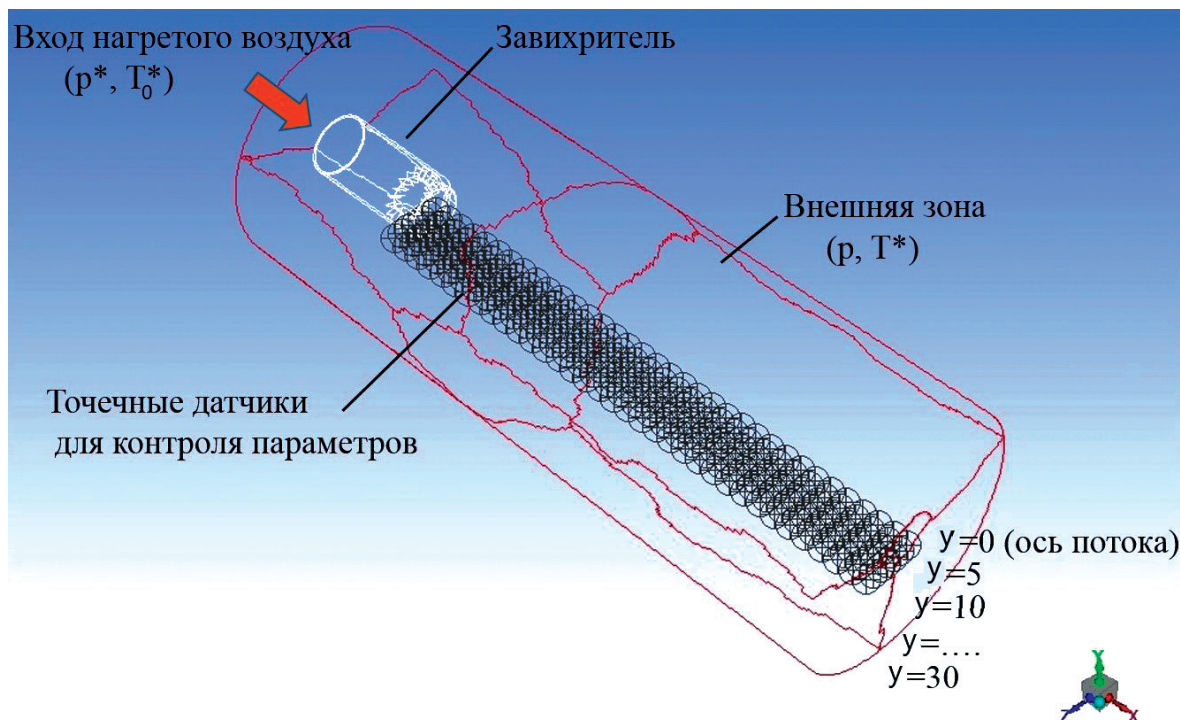


Рис. 4. Расчетная геометрическая модель с отмеченными граничными условиями и показанными точечными датчиками для замера температуры

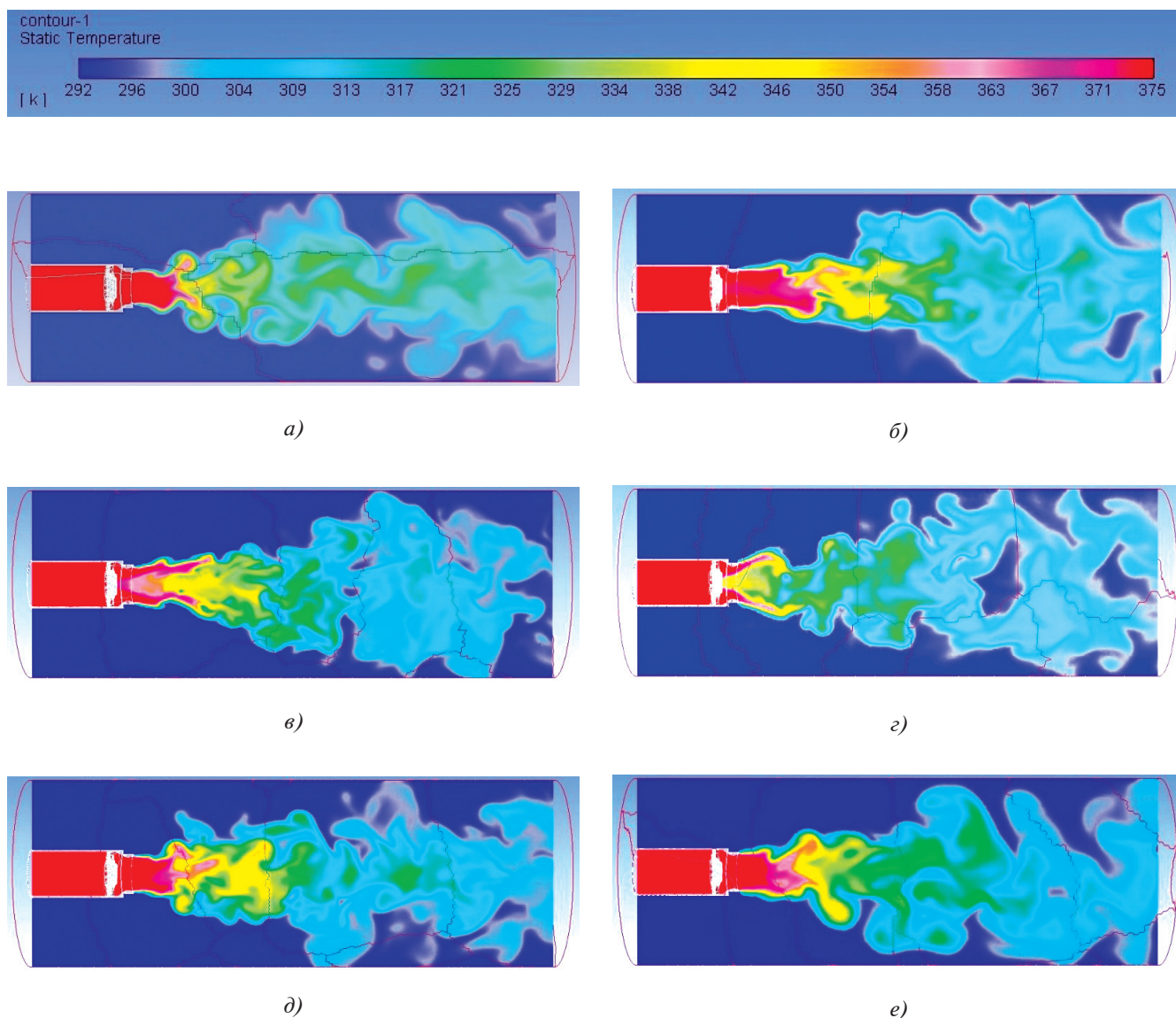


Рис. 5. Сопоставление температур в продольном сечении при расчетах, выполненных с различными моделями сетки и углами закрутки лопаток 30° : *а* — гексаэдральная 1 мм; *б* — гексаэдральная 2 мм; *в* — тетраэдральная 1 мм; *г* — тетраэдральная 2 мм; *д* — полиэдральная 1 мм; *е* — полиэдральная 2 мм

Результаты по температурным полям, в продольном сечении потока, для завихрителя с углом закрутки лопаток 30° , сопоставимы с результатами дымовой визуализации (см. рис. 3) при использовании сетки с гексаэдральными элементами с характерным размером 1 мм (рис. 5, *а*). Для сетки с тетраэдральными элементами характерно прогнозирование холодной зоны в центре закрученного потока, отсутствующей на картинах при использовании других сеточных моделей. Наличие этой зоны говорит о перетекании холодного окружающего воздуха к центру потока и о вероятности неправильного определения области влияния зоны обратных токов.

Результаты по температурным полям, в продольном сечении потока, для завихрителя с углом закрутки лопаток 45° , наиболее схожи с результатами дымовой визуализации (см. рис. 3) при использовании сетки с гексаэдральными элементами с характерным размером 1 мм (рис. 6, *а*) и чуть хуже для тетраэдральной с таким же размером элементов (рис. 6, *в*). Нужно отметить, что все сеточные модели показали наличие холодной зоны в центре потока, начинающейся от центрального тела завихрителя. Основные различия наблюдались в периферийной области потока и на удалении от устья завихрителя.

Проведенные экспериментальные исследования смешения потока за лопаточным завихри-

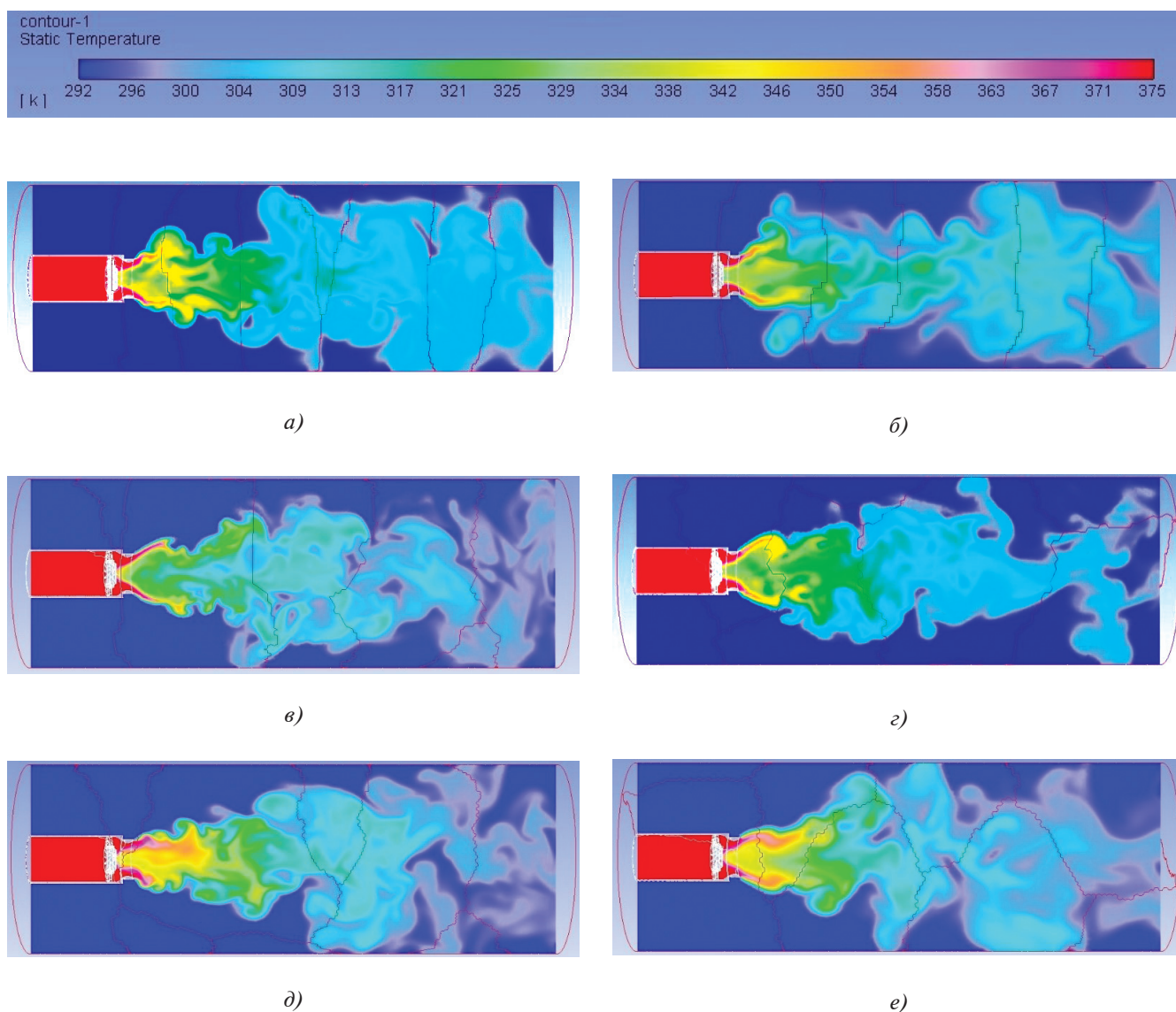


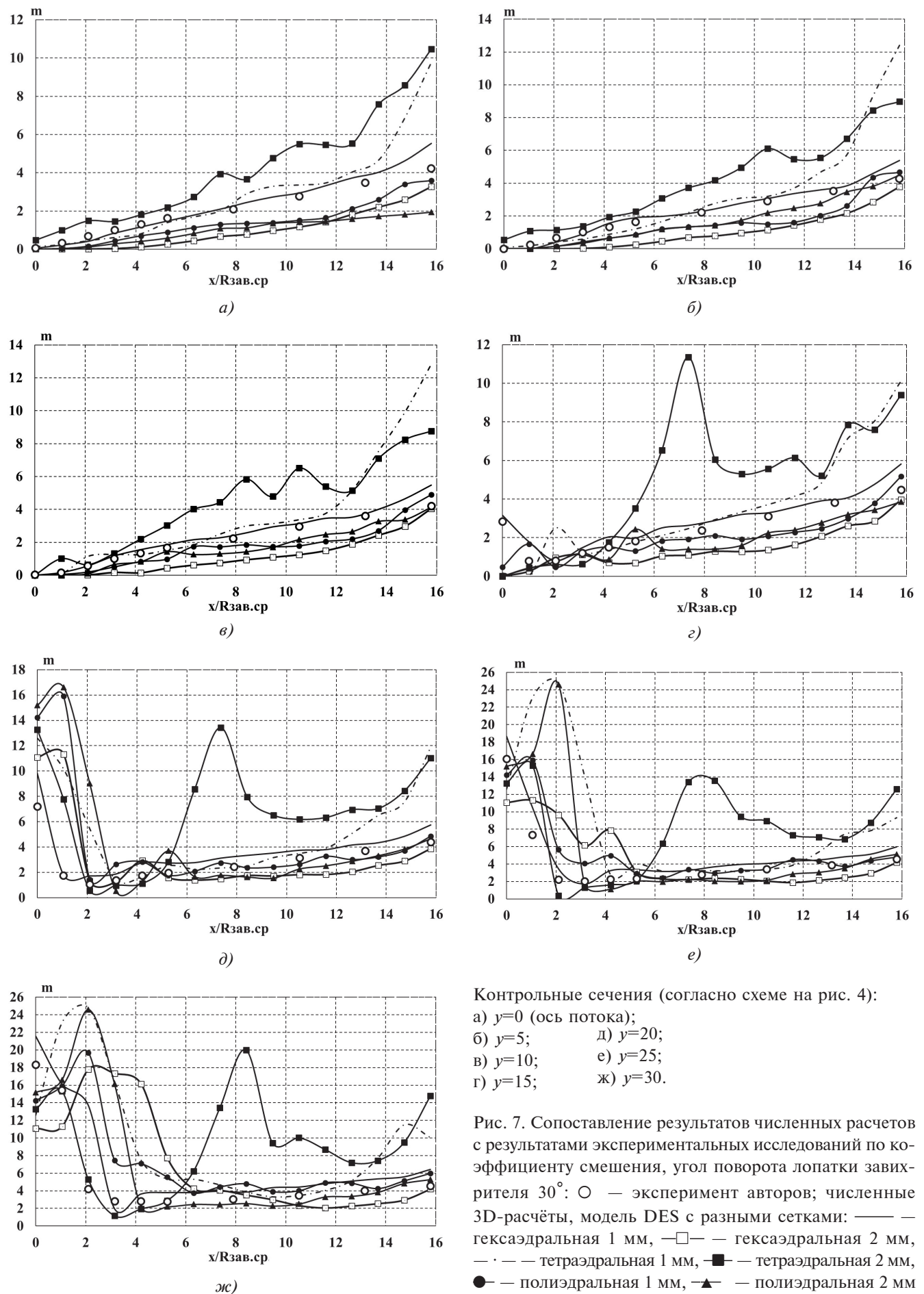
Рис. 6. Сопоставление температур в продольном сечении при расчетах, выполненных с различными моделями сетки и углами закрутки лопаток 45° : *a* — гексаэдральная 1 мм; *б* — гексаэдральная 2 мм; *в* — тетраэдральная 1 мм; *г* — тетраэдральная 2 мм; *д* — полиэдральная 1 мм; *е* — полиэдральная 2 мм

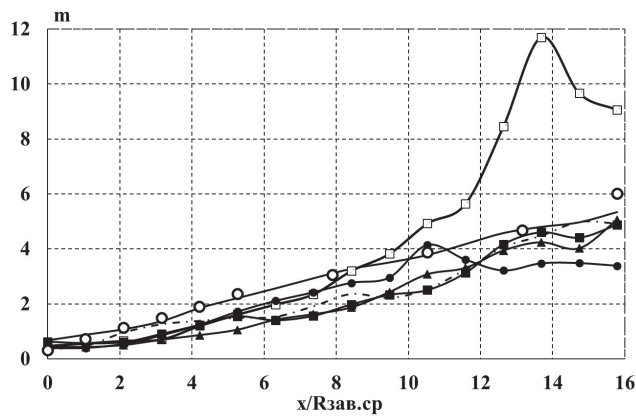
лем были сопоставлены с численными расчетами с использованием различных сеточных моделей и сведены на графики (рис. 7 и 8).

Выводы

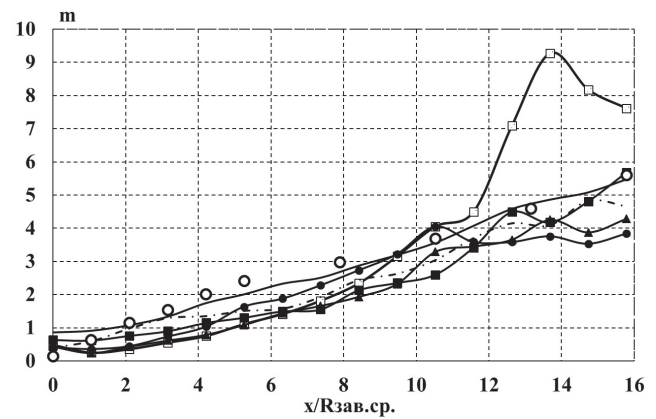
При анализе зависимостей коэффициента смешения m от относительного расстояния $x/R_{\text{зав.ср}}$, показанных на рис. 7 и 8, наилучшие результаты при численном моделировании, в различных сечениях потока, были получены с использованием модели вязкости DES в нестационарной постановке задачи и гексаэдральных сеточных элементов с характерным размером 1 мм. Аналогичные результаты и модель гексаэдральной сетки используются в работах [13, 20]. Полиэд-

ральная сетка, полученная путем конвертирования из тетраэдральных элементов, не показала хороших результатов, так же как и тетраэдральная сетка с фиксированным при создании размером элемента. Увеличение характерного размера элементов, относительно оптимального указанного значения, приводило к большему отклонению расчетных данных от экспериментальных. Полученные результаты справедливы для завихрителей с различными углами установки лопаток.

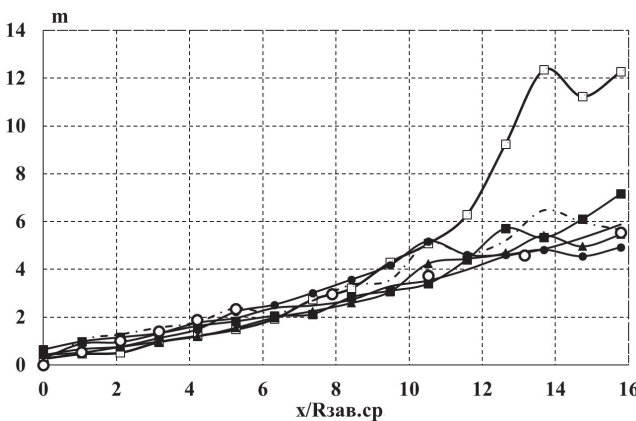




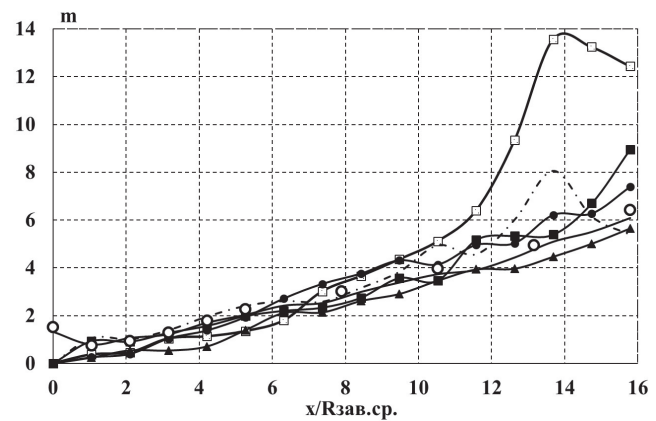
а)



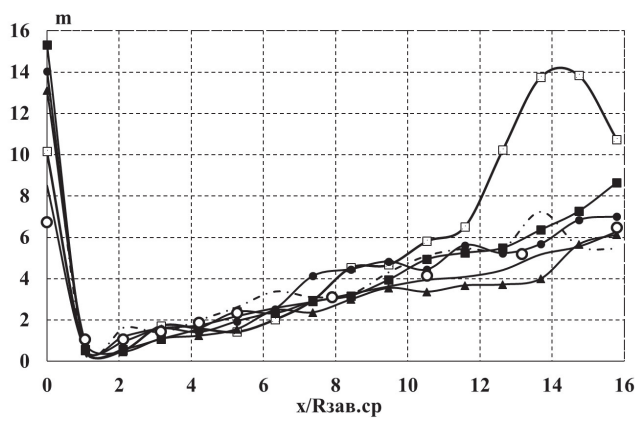
б)



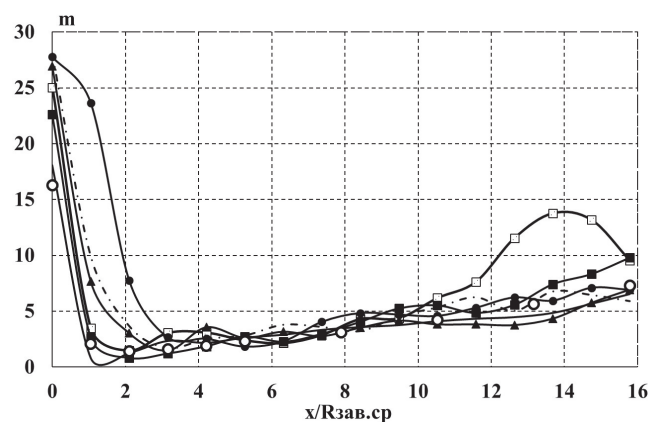
в)



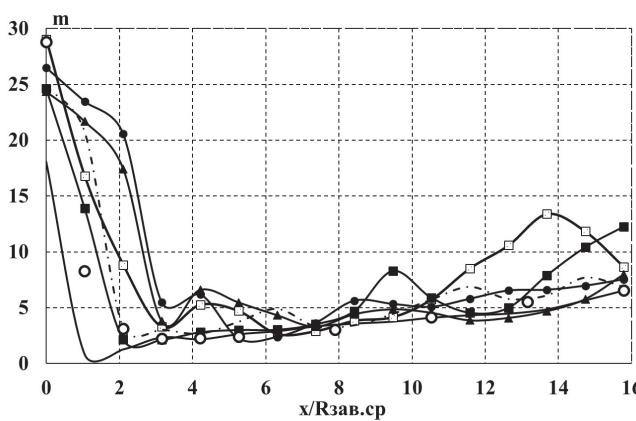
г)



д)



е)



ж)

Контрольные сечения (согласно схеме на рис. 4):

- а) $y=0$ (ось потока);
- б) $y=5$;
- в) $y=10$;
- г) $y=15$;
- д) $y=20$;
- е) $y=25$;
- ж) $y=30$.

Рис. 8. Сопоставление результатов численных расчетов с результатами экспериментальных исследований по коэффициенту смешения, угол поворота лопатки завихрителя 45° : \circ — эксперимент авторов; численные 3D-расчёты, модель DES с разными сетками: — — гексаэдральная 1 мм, \square — гексаэдральная 2 мм, \cdots — тетраэдральная 1 мм, \blacksquare — тетраэдральная 2 мм, \bullet — полиэдральная 1 мм, \blacktriangle — полиэдральная 2 мм

Библиографический список

1. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Конструкция, моделирование процессов и расчет: Учебное пособие. — Изд. 2-е, испр. — Казань: Изд-во Казанского государственного технического университета, 2006. — 220 с.
2. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и теплообмен в ограниченных вихревых потоках. — Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1987. — 282 с.
3. Гунта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки / Пер. с англ. под ред. С.Ю. Крашенинникова. — М.: Мир, 1987. — 588 с.
4. Ахмелова Р.Б., Балагула Т.Б., Рашидов Ф.К., Сакаев А.Ю. Аэродинамика закрученной струи. — М.: Энергия, 1977. — 240 с.
5. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: Учебное пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 88 с.
6. Нгуен Т.Д., Александров Ю.Б., Мингазов Б.Г., Сулайман А.И. Исследование смещения потока за лопаточным завихрителем в свободном пространстве // Авиационные двигатели и силовые установки: Сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции молодых учёных и специалистов (28-30 мая 2019). М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2019. С.130-131.
7. Нгуен Т.Д., Александров Ю.Б., Мингазов Б.Г. Моделирование процессов смещения в закрученном потоке // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Тезисы докладов VII Всероссийской конференции с международным участием (16-18 октября 2019, Рыбинск). Ярославль: Цифровая типография, 2019. С. 56.
8. Chaouat B. The State of the Art of Hybrid RANS/LES Modeling for the Simulation of Turbulent Flows // Flow, Turbulence and Combustion. 2017. Vol. 99. No. 2, pp. 279-327. DOI: 10.1007/s10494-017-9828-8
9. Chenoweth J.D., Kannepalli C., Arunajatesan S., Hosangadi A. Modeling Swirling Jet Flows Using a Hybrid RANS/LES Methodology // 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (Hartford, CT, 21-23 July 2008). DOI: 10.2514/6.2008-4746
10. Дектерев А.А. Математическое моделирование закрученных течений в приложении к промышленным задачам // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Тезисы докладов VI Всероссийской конференции с международным участием (21-23 ноября 2017, Новосибирск). Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2017. С. 16.
11. Дектерев Д.А., Платонов Д.В., Минаков А.В. Расчетно-экспериментальное исследование течения в модели гидротурбины ГЭС // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Тезисы докладов V Международной конференции (Казань, 19-22 октября 2015). СПб.: Свое издательство, 2015. С. 164-165.
12. Liu T., Bai F., Zhao Z., Lin Y., Du Q., Peng Z. Large Eddy Simulation Analysis on Confined Swirling Flows in a Gas Turbine Swirl Burner // Energies. 2017. Vol. 10(12), pp. 1-18. DOI:10.3390/en10122081
13. Матвеев С.Г., Орлов М.Ю., Абрашкин В.Ю., Зубрилин И.А., Матвеев С.С. Моделирование аэродинамической структуры течения в камере сгорания малоразмерного ГТД с помощью САЕ-систем // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 5(29). С. 179-187.
14. Назукин В.А., Августинович В.Г., Thornber V., Aguado L.P., Цатиашвили В.В., Коромыслов Е.В. Моделирование трёхмерных нестационарных закрученных потоков в коммерческом пакете и решателе собственной разработки на примере модельной задачи // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 3-1(41). С. 197-205.
15. Назукин В.А., Августинович В.Г. Сравнение различных подходов к моделированию течения в премиксерах малоэмиссионных камер сгорания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2016. № 44. С. 63-84. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.44.04
16. Козелков А.С., Курулин В.В., Тятюшкина Е.С., Пучкова О.Л. Моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости на неструктурированных сетках с использованием модели отсоединенных вихрей // Математическое моделирование. 2014. Т. 26. № 8. С. 81-96.
17. Зубрилин И.А., Диденко А.А., Дмитриев Д.Н., Гураков Н.И., Эрнандэс М.М. Влияние процесса горения на структуру закрученного потока за горелочным устройством камеры сгорания газотурбинной установки // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 124-136.
18. Ша М., Агульник А.Б., Яковлев А.А. Влияние расчетной сетки при математическом моделировании натекания дозвукового потока на профиль перспективной лопатки с отклоняемой задней кромкой в трехмерной постановке // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 110-121.
19. Краев В.М. К вопросу расчётов гидродинамически нестационарных турбулентных течений // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 4. С. 125-130.
20. Рыженьков В.О., Иващенко В.А., Мулладжанов Р.И. Численное моделирование турбулентного течения и теплопереноса в канале методом спектральных элементов: влияние пространственного разрешения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 6. С. 55-63.

COMPUTATIONAL GRID IMPACT ON NUMERICAL COMPUTING RESULTS OF THREE-DIMENSIONAL NON-STATIONARY SWIRL FLOW BEHIND THE VANE SWIRLER

Aleksandrov Yu.B.* , Nguyen T.D.** , Mingazov B.G.*** , Sulaiman A.I.****

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
KNRTU-KAI, 10, K. Marx str., Kazan, Tatarstan, 420111, Russia*

* *e-mail: Alexwischen@rambler.ru*

** *e-mail: nguyenthedat1609@gmail.com*

*** *e-mail: BGMingazov@kai.ru*

**** *e-mail: Armin.wrya@mail.ru*

Abstract

The balanced design of the front-mounted device ensures combustion chamber efficiency and gas turbine engine at large. In the majority of modern gas turbine engines for ground and aviation purposes, a vane swirler is being installed concentrically with the fuel nozzle at the flame tube inlet. The swirler forms a swirl of air, and facilitates the best mixing conditions for air-fuel mixture. Besides, while the flow swirls in a low-pressure zone, its core is formed, which allows return gases from the flow periphery to the core of the swirled jet, forming thereby a reverse flow zone, and stabilize the fuel combustion by the stall characteristics. Increasing the swirler blades installation angle leads to intensification of the air-fuel mixture mixing, and a reverse flow zone boundaries expansion. However, hydraulic losses at the front-end device are increasing herewith, which, in its turn, contributes to the engine power or thrust reduction.

The fuel-air mixture mixing quality characterizes the efficiency of the front-end device. The majority of works by Lefebvre A., Kosterin V.A., Gupta A., Akhmedov R.B., and others suggest evaluating mixing process by the mixing coefficient, which represents the ejected air consumption to the swirled jet consumption ratio:

$$m = \frac{G_e}{G_{sw}} \quad (1)$$

where m is mixing coefficient; G_e is the flow rate of the ejected air; G_{sw} is the flow rate of the swirling jet.

In our work, an experimental setup was developed to study the swirler mixing coefficient. Using the FMD (Fused Deposition Modeling) method of printing, various designs of the swirl with different blade swirler installation angles were created, which were blown into the open space. The flow visualization was realized by smoke pollution of the air supplied to the swirler. In

the course of the experiment, both temperature and total pressure fields of the flow were measured in axial and radial directions. Temperature distributions were employed for mixing coefficient (m) computing. Bases on these measurements the coefficient was computed by the expression:

$$m = \frac{T_{sw}^* - T_0^*}{T_0^* - T_V^*} \quad (2)$$

where T_{sw}^* , T_0^* , T_V^* are the temperatures in front of the swirl, in the jet and in the ambient air respectively.

A spatial computational domain, simulating the volume of the combustion chamber flame tube, was developed for numerical studies of the vane swirler. It is well known that computational grid strongly affects computation results. It is characterized by the type and number of elements; characteristic size, and the presence of near-wall thickening. The grids of three basic elements types, such as tetrahedral, hexahedral, and polyhedral, were employed. The polyhedral grids were obtained the tetrahedral grid converting. The number of elements herewith decreased by six times, and the number of nodes increased about five times, which allows compute gradients of parameters variation more accurately compared to tetrahedral due to the fact that one finite element has more nodal points. However, such a transformation does not allow precisely control the characteristic size of the elements, and a deterioration of the result due to the increase in the characteristic size of the grid element can occur.

A combined DES turbulence model (Detached Eddy Simulation) in a non-stationary setting was used for computing. The calculation was performed in the ANSYS Fluent 19.2 software with an academic license.

The performed experimental studies of flow mixing behind the scapular swirler were compared with

numerical calculations using various grid models. The best results in numerical simulations were obtained when using the DES viscosity model in a non-stationary set of calculations, and hexahedral mesh elements. The polyhedral mesh obtained by converting from tetrahedral elements did not demonstrate good results, as the original tetrahedral mesh had. An increase in characteristic size of the elements led to a greater deviation of the calculated data from the experimental ones. The results obtained are valid for swirlers with various blade angles.

Keyword: GTE combustion chamber, numerical simulation, flow swirl, mixing coefficient, grid element size, computational grid type.

References

1. Mingazov B.G. *Kamery sgoraniya gazoturbinnnykh dvigatelei. Konstruktsiya, modelirovanie protsessov i raschet* (Combustion chambers of gas turbine engines. Design, processes modeling and calculation), Kazan, Kazanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2006, 220 p.
2. Kutateladze S.S., Volchkov E.P., Terekhov V.I. *Aerodinamika i teplomassobmen v ogranichennykh vikhrevykh potokakh* (Aerodynamics and heat and mass exchange in limited vortex flows), Novosibirsk, Institut teplofiziki SO AN SSSR, 1987, 282 p.
3. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. *Swirl flows*. Abacus Press, Tunbridge Wells, England, 1984, 475 p.
4. Akhmelova R.B., Balagula T.B., Rashidov F.K., Sakaev A.Yu. *Aerodinamika zakruchenoii strui* (Swirling jet aerodynamics), Moscow, Energiya, 1977, 240 p.
5. Garbaruk A.V., Strelets M.Kh., Shur M.L. *Modelirovanie turbulentsnosti v raschetakh slozhnykh techenii* (Turbulence simulation in complex flows calculations), St. Petersburg, Politekhnikeskii universitet, 2012, 88 p.
6. Nguen T.D., Aleksandrov Yu.B., Mingazov B.G., Sulaiman A.I. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov (28-30 May 2019) "Aviatsionnye dvigateli i silovye ustanovki"*, Moscow, TsIAM im. P.I. Baranova, 2019, pp. 130-131.
7. Nguen T.D., Aleksandrov Yu.B., Mingazov B.G. *Materialy VII Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (16-18 October 2019, Rybinsk) "Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh"*, Yaroslavl, Tsifrovaya tipografiya, 2019, p. 56.
8. Chaouat B. The State of the Art of Hybrid RANS/LES Modeling for the Simulation of Turbulent Flows. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2017, vol. 99, no. 2, pp. 279-327. DOI: 10.1007/s10494-017-9828-8
9. Chenoweth J.D., Kannepalli C., Arunajatesan S., Hosangadi A. Modeling Swirling Jet Flows Using a Hybrid RANS/LES Methodology. *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (Hartford, CT, 21-23 July 2008)*. DOI: 10.2514/6.2008-4746
10. Dektarev A.A. *Materialy VI Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (21-23 November 2017, Novosibirsk) "Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh"*, Novosibirsk, Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, 2017, p. 16.
11. Dektarev D.A., Platonov D.V., Minakov A.V. *Materialy V Mezhdunarodnoi konferentsii (Kazan', 19-22 October 2015) "Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh"*, St. Petersburg, Svoe izdatel'stvo, 2015, pp. 164-165.
12. Liu T., Bai F., Zhao Z., Lin Y., Du Q., Peng Z. Large Eddy Simulation Analysis on Confined Swirling Flows in a Gas Turbine Swirl Burner. *Energies*, 2017, vol. 10(12), pp. 1-18. DOI:10.3390/en10122081
13. Matveev S.G., Orlov M.Yu., Abrashkin V.Yu., Zubrilin I.A., Matveev S.S. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2011, no. 5(29), pp. 179-187.
14. Nazukin V.A., Avgustinovich V.G., Thornber B., Aguado L.P., Tsatiashvili V.V., Koromyslov E.V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2013, no. 3-1(41), pp. 197-205.
15. Nazukin V.A., Avgustinovich V.G. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2016, no. 44, pp. 63-84. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.44.04
16. Kozelkov A.S., Kurulin V.V., Tyatyushkina E.S., Puchkova O.L. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2014, vol. 26, no. 8, pp. 81-96.
17. Zubrilin I.A., Didenko A.A., Dmitriev D.N., Gurakov N.I., Hernandez M.M. Combustion process effect on the swirled flow structure behind a burner of the gas turbine engine combustion chamber. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 124-136.
18. Sha M., Agul'nik A.B., Yakovlev A.A. The effect of the computational mesh while mathematical modeling of the inflow of a subsonic flow onto the profile of a perspective blade with a deflectable trailing edge in a three-dimensional setup. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 110-121.
19. Kraev V.M. About hydrodynamic unsteady turbulent flow calculation. *Aerospace MAI Journal*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 125-130.
20. Ryzhen'kov V.O., Ivashchenko V.A., Mullyadzhano R.I. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 55-63.