

УДК 621.452.3.022.5:004.94

doi: 10.32620/aktf.2020.5.10

С. А. ЕВСЕЕВ, Д. В. КОЗЕЛ, И. Ф. КРАВЧЕНКО

ГП «Ивченко-Прогресс», Украина

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД МЕТОДОМ ТРЕХМЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Решалась задача численного моделирования течения газа с горением распыленного жидкого топлива (использовалась модель равновесного горения pdf наряду с моделью частично перемешанной смеси) в кольцевой камере сгорания газотурбинного двигателя. Численное моделирование выполнялось в расчетном комплексе Ansys Fluent. Целью расчетов являлось моделирование радиальной и окружной неравномерности поля температур газа на выходе из камеры сгорания. В результате проведенных расчетов установлено, что точность моделирования радиальной и окружной неравномерности поля температур газа на выходе из камеры сгорания является неудовлетворительной при использовании  $k-\epsilon$  модели турбулентности с исходными настройками для расчетного комплекса Ansys Fluent. При этом, максимальное значение радиальной неравномерности поля температур газа на выходе из камеры сгорания превышало значение, полученное в эксперименте, на 12,61 %, а максимальное значение окружной неравномерности – на 12,69 %. Для повышения точности моделирования неравномерности поля температур на выходе из камеры сгорания проведен численный эксперимент по исследованию влияния степени турбулентной диффузии компонент газа на величину неравномерности поля температур. Для снижения величины неравномерности поля температур на выходе из камеры сгорания увеличивалась степень турбулентной диффузии компонент газа по отношению к исходному варианту расчета, выполненного с использованием  $k-\epsilon$  модели турбулентности с исходными настройками для расчетного комплекса Ansys Fluent, путем уменьшения турбулентного числа Шмидта  $Sc$  в модели турбулентности. Для исходных настроек модели турбулентности  $k-\epsilon$  в расчетном комплексе Ansys Fluent турбулентное число Шмидта  $Sc = 0,85$ . Численный эксперимент выполнен для значений  $Sc = 0,6$ ;  $Sc = 0,4$  и  $Sc = 0,2$ . Результаты численного эксперимента подтвердили влияние величины турбулентного числа Шмидта  $Sc$  на результат расчета поля температур газа на выходе из камеры сгорания, при уменьшении величины  $Sc$  уровень окружной и радиальной неравномерностей поля температур газа снижается. Однако степень снижения радиальной и окружной неравномерностей при снижении величины  $Sc$  разная. Поэтому для обеспечения высокой точности расчета как окружной, так и радиальной неравномерностей поля температур газа было предложено вместо постоянной величины турбулентного числа Шмидта  $Sc$  использовать переменное значение, зависящее от температуры газа. Функциональная зависимость турбулентного числа Шмидта  $Sc$  от температуры газа была реализована в расчетном комплексе Ansys Fluent с помощью функции пользователя (UDF). Результаты моделирования поля температур газа с использованием предложенной UDF-функции для турбулентного числа Шмидта  $Sc$  удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными как для радиальной, так и окружной неравномерностей поля температур газа на выходе из камеры сгорания.

**Ключевые слова:** камера сгорания; турбулентное число Шмидта; поле температур газа; компьютерное моделирование; UDF; ANSYS Fluent.

### Введение

Неравномерность поля температур газа на выходе из компрессорной станции (КС) оказывает существенное влияние на надежность и ресурс деталей турбины. Поэтому задача расчета параметров неравномерности поля температур газа на выходе из КС на стадии проектирования КС является важной и актуальной. С учетом многообразия конструкций КС, множеством физических процессов, протекающих в КС и сложностью математического моделирования этих процессов расчет поля температур газа

на выходе из КС аналитическими и эмпирическими методами затруднен. Аналитические методы расчета, как правило, основаны на обобщении экспериментальных данных при помощи эмпирических и теоретических математических моделей, а эмпирические модели строятся исключительно на основе изучения реакций объекта на изменение внешних условий. При этом теория работы объекта не рассматривается. Поэтому задача расчета неравномерности поля температур может быть решена методами вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД). ВАГД использует в качестве базовой физическую

модель вязкого газа и ее математическую модель – систему осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), включающих уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности), уравнения сохранения количества движения и энергии. Для замыкания системы осредненных по Рейнольдсу уравнений использовались различные модели турбулентности и их варианты доработок. Дискретизация дифференциальных уравнений в частных производных осуществляется методами конечных разностей, конечных (контрольных) объемов или конечных элементов.

Однако результаты расчета с помощью методов ВАГД зависят от выбранных параметров применяемой модели турбулентности. В данной работе представлены результаты исследования влияния турбулентного числа Шмидта  $Sc$  применяемой  $k-\epsilon$  модели турбулентности на точность расчета поля температуры газа на выходе из КС. Для обеспечения высокой точности расчетов предложено использовать функциональную зависимость турбулентного числа Шмидта  $Sc$  от температуры газа вместо постоянного значения  $Sc = 0,85$ , предлагаемого в пакете Ansys Fluent по умолчанию.

Объектом исследования является течение газа с горением распыленного топлива в КС (сектор 1/18) газотурбинного двигателя (рис. 1).

## 1. Численный метод и граничные условия

Температура элементарного объема газа на выходе из КС зависит от всей истории его движения, начиная с выхода из компрессора. Температура и состав газа меняются под влиянием процессов горения, теплообмена и турбулентного перемешивания. Указанные процессы зависят от распределения потоков воздуха внутри КС. Отверстия жаровой трубы (ЖТ) и конструкция фронтального устройства (ФУ) ответственны за формирование струй, предопределяющих структуру пламени, картину смещения в целом и в итоге – распределение поля температур газа в выходном сечении КС [1].

### 1.1. Физико-математическая постановка задачи

Для моделирования течения газа с горением керосина в исследуемой области использовался программный комплекс ANSYS Fluent 2020 R1, в котором реализовано численное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), включающих уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности), уравнения сохранения количества движения и энергии. Для замыкания системы

осредненных по Рейнольдсу уравнений использовалась Realizable  $k-\epsilon$  модель [2] турбулентности Ландера-Сполдинга. Дискретизация дифференциальных уравнений в частных производных осуществляется методами конечных (контрольных) объемов.

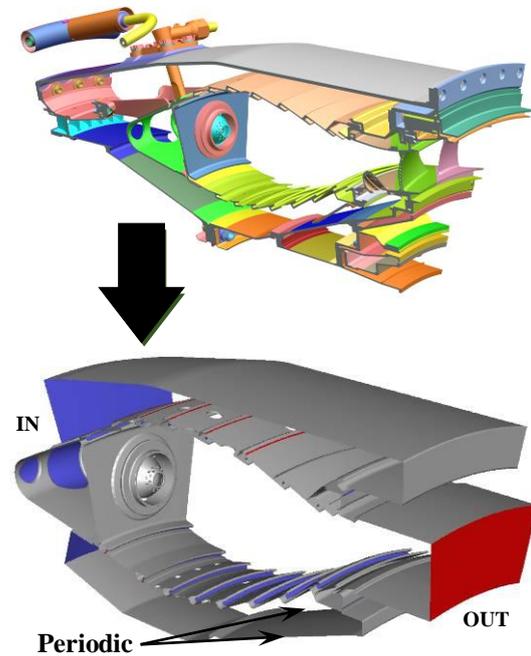


Рис. 1. Геометрия расчётной области

Граничные условия на твердой стенке для нахождения сдвиговых напряжений, кинетической энергии турбулентности (ТКЕ) и скорости диссипации ТКЕ определялись с помощью пристеночной функции (Standard Wall Functions).

Использовалась модель горения не перемешанной смеси (функция Шваба – Зельдовича / функция плотности распределения вероятности (ФПВ (PDF)) / предвычисленные ФПВ-таблицы).

При моделировании движения, теплообмена и испарение капель распыленного топлива применялась модель дискретной фазы (Discrete Phase Model).

В отношении газовой фазы принимались следующие основные допущения:

- газовая фаза представляет собой многокомпонентную химически реагирующую смесь термодинамически совершенных газов, входящих в состав топлива, окислителя и продуктов сгорания;
- течение газа трехмерное, турбулентное, несжимаемое [3], существенно дозвуковое;
- объемной вязкостью, вязким нагревом и лучистым теплообменом пренебрегаем;
- объемом, занимаемым каплями, и влиянием капель на характеристики турбулентности пренебрегаем.

## 1.2. Построение расчетной сетки

Построение расчетной сетки относится к ключевым моментам численного моделирования методами вычислительной аэрогидродинамики. Рациональным выбором сетки можно достичь разумного компромисса между точностью численной модели, вычислительными затратами и трудозатратами на построение сетки.

Теоретически наибольшая точность расчётов может быть получена на гексаэдрических сетках особого типа (так называемых «картографических»), форма и расположение ячеек в которых согласованы с направлением течения и градиентами независимых переменных. На практике этому условию возможно удовлетворить лишь частично, поскольку структура течения заранее точно не известна. При сложной форме расчётной области или составляющих её подобластей построение картографических сеток с помощью современных сеточных генераторов часто оказывается невозможным. Поэтому единственным способом сгенерировать картографическую сетку является разделение расчётной области на элементарные подобласти, геометрическая сложность которых не превышает возможностей сеточного генератора.

Для геометрически сложных расчётных областей удобнее использовать тетраэдрические расчётные сетки: их построение гораздо менее трудоёмко. Однако из-за принципиальной несогласованности с направлением течения тетраэдрические сетки обеспечивают меньшую точность расчёта (частично этот недостаток можно компенсировать увеличением порядка точности схемы аппроксимации конвективных членов и вычислением градиентов по значениям в узлах ячеек).

Кроме того, при одинаковом разрешении тетраэдрическая сетка имеет значительно больше элементов по сравнению с гексаэдрической. Поэтому применение тетраэдрической сетки не экономично с точки зрения использования вычислительных ресурсов.

Расчётная область пространства, включающая одnogорелочный сектор КС, геометрически сложна, в частности, многосвязна и разномасштабна. Компромиссным решением является использование комбинированной (гибридной) сетки, состоящей из гексаэдров, тетраэдров, соединяющих их пирамид, а также призм. Гибридные сетки дают существенную экономию количества ячеек и повышают точность расчёта по сравнению с чисто тетраэдрическими.

Для построения гибридных сеток необходимо выполнить декомпозицию проточной части КС на подобласти (блоки). В большинстве блоков внутри ЖТ и в кольцевом канале

(КК) следует использовать гексаэдрическую, где возможно (в частности, в ядре потока), - «картографическую» сетку. Расположение расчётных ячеек в «картографической» сетке должно быть согласовано с преобладающим направлением течения газа в целом (от ФУ к выходу из КС) и локальными направлениями струй воздуха, берущих начало из основных отверстий ЖТ и отверстий её послыонного охлаждения. В отверстиях в стенках ЖТ и ФУ стоит применять четырёхугольную призматическую сетку. Наиболее сложные участки расчётной области, где построение гексаэдрической и призматической сеток вызывает трудности (например, вблизи всех отверстий ЖТ и ФУ), следует покрывать тетраэдрической сеткой.

В соответствии с изложенными выше принципами расчётных сеток была построена сетка для оценки поля температур газа на выходе из КС.

Расчётная сетка с учетом адаптации в области смесительных отверстий содержит ~36 млн. ячеек (рис. 2).

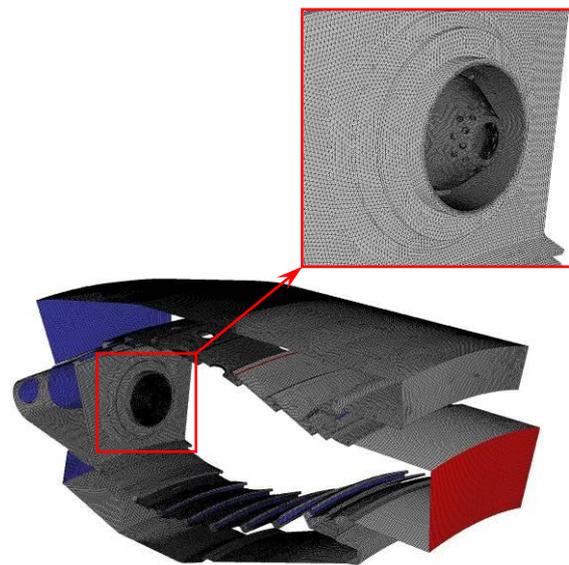


Рис. 2. Численная сетка

Следует отметить, что значение  $u^+ \sim 30$  также является наиболее желательным в связи с тем, что оно соответствует нижней границе полностью турбулентной зоны пограничного слоя, где для первой пристеночной ячейки справедлив логарифмический закон осреднённой скорости [4].

## 1.3. Граничные условия

На рис. 1 показана условная схема задания граничных условий.

На входной границе (IN) задавался массовый расход воздуха  $G_w$ , полная температура  $T^*$ , интен-

сивность турбулентности и отношение турбулентной вязкости к динамической вязкости.

На выходной границе (OUT) – избыточное давление, полная температура возвратного течения, интенсивность турбулентности возвратного течения и отношение турбулентной вязкости к динамической вязкости возвратного течения.

На боковых гранях (Periodic) задавался тип граничных условий Rotational-periodic.

#### 1.4. Численный метод решения

Настройки решателя программы ANSYS Fluent, реализующие численный метод решения управляющих уравнений, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Численный метод решения

Аспект численной процедуры	Опция программы Fluent
Solver (Решатель)	Segregated (Раздельный)
Gradient Option (Метод вычисления градиентов)	Node-Based (По значениям в узлах)
Pressure-Velocity Coupling (Метод коррекции давления по скорости)	SIMPLE
Equations (Решаемые уравнения)	Flow (4 уравнения) Turbulence (2 уравнения) Energy (1 уравнение) PDF (2 уравнения) Итого: (9 уравнения)
Discretization (Схема дискретизации)	First Order Upwind (1-го порядка точности «против потока») или Third Order MUSCL (3-го порядка «против потока»)
Under-Relaxation (Коэффициенты нижней релаксации)	Pressure – 0,2; Momentum – 0,5; Energy – 0,9; Temperature – 0,9; Mean Mixture Fraction – 0,9; Mixture Fraction Variance – 0,8; Discrete Phase Sources – 0,2; Остальные – по умолчанию.

Метод вычисления градиентов по значениям в узлах является более точным, чем метод вычисления градиентов по значениям в центрах ячеек, особенно на нерегулярных (скошенных) неструктурированных сетках.

Значения ряда коэффициентов нижней релаксации целесообразно изменять по сравнению с при-

нятым по умолчанию для обеспечения сходимости и улучшения устойчивости решения [5].

## 2. Результаты исследований

Решалась задача численного моделирования течения газа с горением распыленного жидкого топлива в кольцевой камере сгорания газотурбинного двигателя. В результате проведенных расчетов установлено, что точность моделирования радиальной и окружной неравномерности поля температур газа на выходе из камеры сгорания является неудовлетворительной при использовании  $k-\epsilon$  модели турбулентности с исходными настройками для расчетного комплекса Ansys Fluent. При этом, максимальное значение радиальной неравномерности поля температур газа на выходе из камеры сгорания превышало значение, полученное в эксперименте, на 12,61 %, а максимальное значение окружной неравномерности – на 12,69 %. Для повышения точности моделирования неравномерности поля температур на выходе из камеры сгорания проведен численный эксперимент по исследованию влияния степени турбулентной диффузии компонент газа на величину неравномерности поля температур [6]. Для снижения величины неравномерности поля температур на выходе из камеры сгорания увеличивалась степень турбулентной диффузии компонент газа по отношению к исходному варианту расчета, выполненного с исходной настройкой для расчетного комплекса Ansys Fluent  $Sc = 0,85$ , путем уменьшения турбулентного числа Шмидта  $Sc$  в модели турбулентности. Уменьшение числа Шмидта  $Sc$  не соответствует фундаментальной физике процессов, протекающих в КС, но имитирует интенсификацию смешения, обусловленную крупномасштабной турбулентностью при вдуве поперечных струй разбавляющего воздуха в жаровой трубе (ЖТ), которое не учитывается при RANS-моделировании турбулентных течений. При этом нужно отметить, что уменьшение  $Sc$  также завышает темп смешения топлива с окислителем выше по течению от места вдува струй разбавляющего воздуха в ЖТ.

Численный эксперимент выполнен в расчетном комплексе Ansys Fluent для значений турбулентного числа Шмидта  $Sc = 0,85$  (по умолчанию);  $Sc = 0,6$ ;  $Sc = 0,4$  и  $Sc = 0,2$  (рис. 3 и 4) [7].

Из рисунков видно влияние величины турбулентного числа Шмидта  $Sc$  на результат расчета поля температур газа на выходе из камеры сгорания, при уменьшении величины  $Sc$  уровень окружной и радиальной неравномерностей поля температур газа снижается. Однако степень снижения радиальной и окружной неравномерностей при снижении величины  $Sc$  разная.

Поэтому для обеспечения повышения точности расчета как окружной, так и радиальной неравномерностей поля температур газа было предложено вместо постоянной величины турбулентного числа Шмидта  $Sc$  использовать переменное значение, зависящее от температуры газа. Функциональная зависимость турбулентного числа Шмидта  $Sc$  от температуры газа была реализована в расчетном комплексе Ansys Fluent с помощью функции пользователя (UDF (User Defined Functions) – функция, определяемая пользователем). Результаты моделирования поля температур газа с использованием предло-

женной UDF-функции для турбулентного числа Шмидта  $Sc$  удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными как для радиальной, так и окружной неравномерностей поля температур газа на выходе из камеры сгорания (рис. 5).

На рисунке 6 представлены результаты погрешности моделирования радиальной и окружной эпюры с значением числа Шмидта принятым по умолчанию ( $Sc = 0,85$ ) и предлагаемой UDF-функцией.

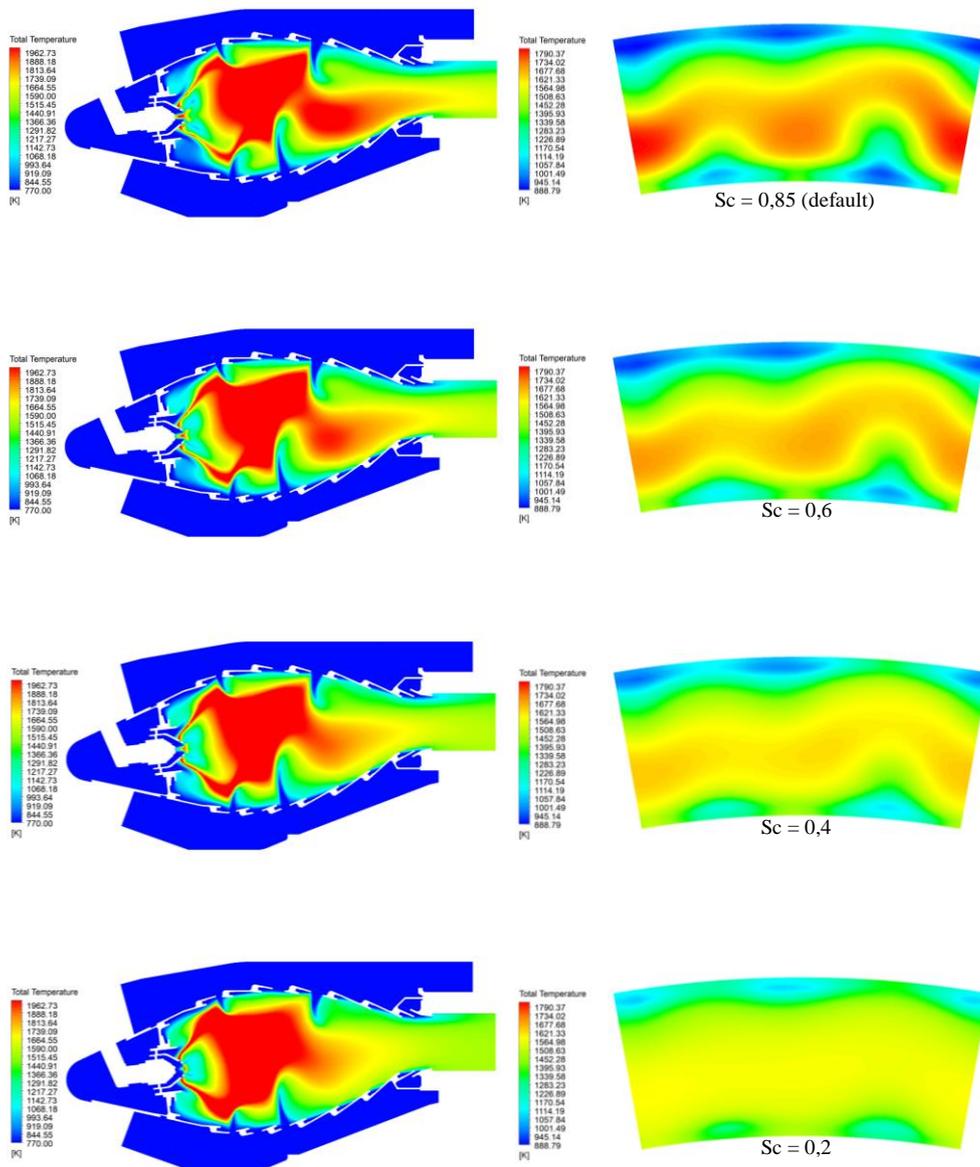


Рис. 3. Температурное поле газа в меридиональном и выходном сечении камеры сгорания с различными турбулентными значениями числа Шмидта  $Sc = 0,85$  (по умолчанию);  $0,6$ ;  $0,4$  и  $0,2$  соответственно

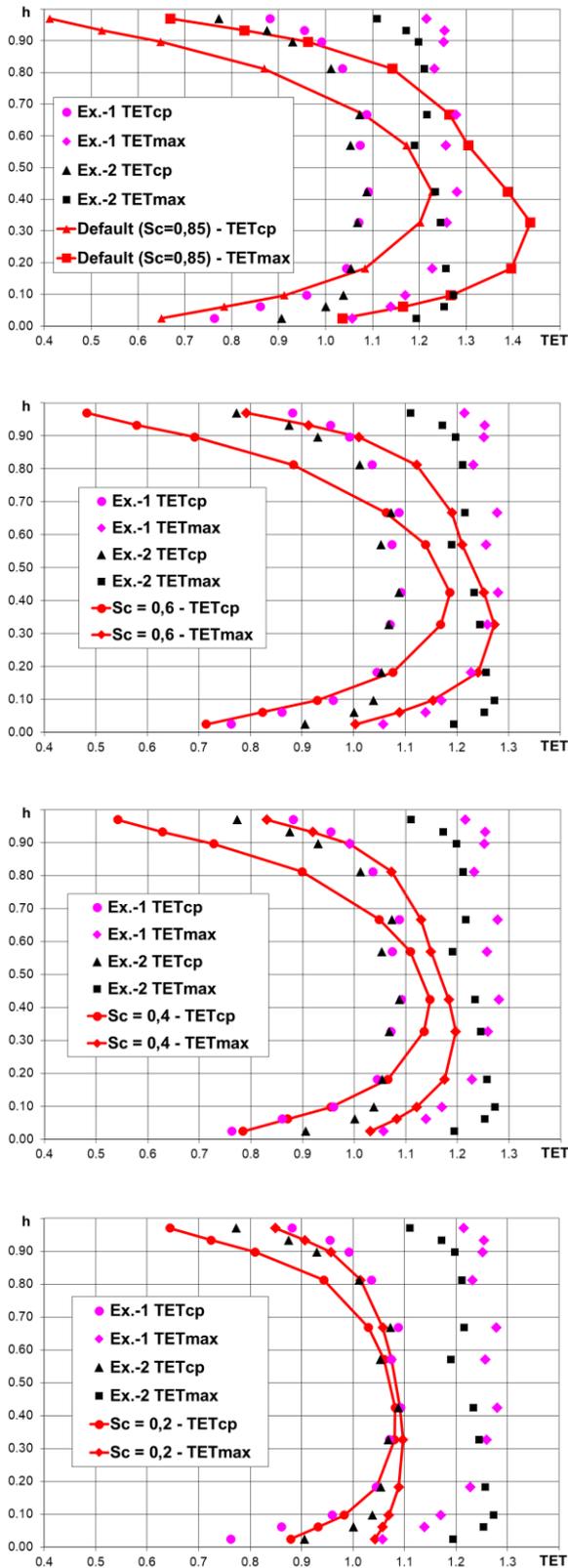


Рис. 4. Эпюры относительной температуры газа на выходе из камеры сгорания с различными турбулентными значениями числа Шмидта  $Sc = 0,85$  (по умолчанию); 0,6; 0,4 и 0,2 соответственно

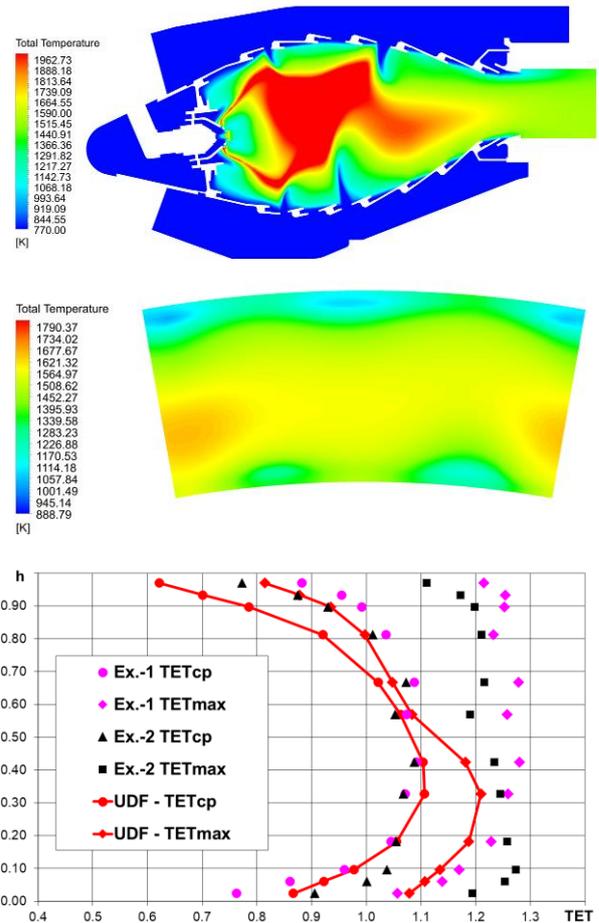


Рис. 5. Результаты моделирования поля температур газа на выходе из КС с помощью UDF-макрса

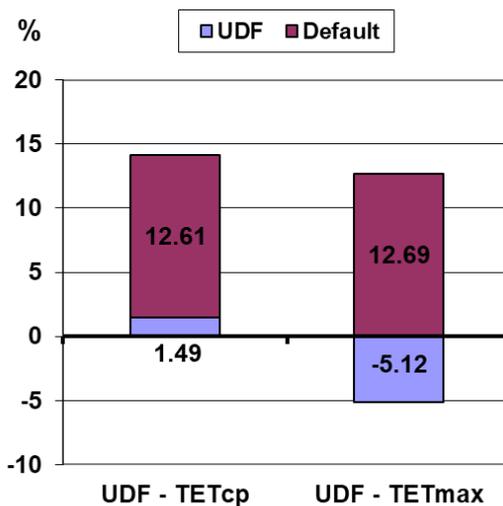


Рис. 6. Результаты точности моделирования радиальной и окружной неравномерностей поля температур газа

## Выводы

По результатам численных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Подтверждено влияние величины турбулентного числа Шмидта  $Sc$  на результат расчета поля температур газа на выходе из камеры сгорания. Уменьшение значения турбулентного числа Шмидта приводит к снижению уровня окружной и радиальной неравномерностей поля температур газа на выходе из камеры сгорания.

2. Результаты моделирования поля температур газа с использованием функциональной зависимости для турбулентного числа Шмидта  $Sc$  от температуры газа удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными как для радиальной, так и окружной неравномерностей поля температур газа на выходе из камеры сгорания.

## Литература

1. Лефевр, А. *Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] / А. Лефевр.* – М.: Мир, 1986. – 566 с.

2. Костюк, В.Е. *Анализ точности численных оценок перепада давления на ЖТ, распределения расхода воздуха по отверстиям ЖТ, коэффициентов расхода отверстий ЖТ и неравномерности поля температур на выходе КС, достигнутой другими авторами, а также использованных ими методических приёмов. Выполнение тестовых численных расчётов коэффициента расхода отверстия в тонкой стенке на сетках с различным разрешением и анализ их точности. Формирование выводов и гипотез: Рабочие материалы этапа № 1. ТС № 65 от 28.12.2009 [Текст] / В. Е. Костюк, Е. И. Кирилай, А. А. Конопленко.* – Харьков, 2009. – 159 с.

3. Костюк, В. Е. *Формирование численных моделей, пригодных для оценки эффективности конструктивных мероприятий, направленных на оптимизацию характеристик КС по неравномерности поля температур на выходе КС: Рабочие материалы этапа № 5. Договор № 203-22/06 от 28.04.2006 [Текст] / Костюк В. Е., Кирилай Е. И., Конопленко А. А.* – Харьков, 2009. – 39 с.

4. *Механика жидкости и газа [Текст] / С. И. Аверин, А. Н. Минаев, В. С. Швыдкийи др.* – М.: Металлургия, 1987. - 304 с.

5. *Users Guide FLUENT – Fluent Co., 2005.* – 2216 с.

6. *The Effect of Schmidt Number on Turbulent Scalar Mixing in a Jet-In-Crossflow [Text] / G. He, Y. Guo, A. T. Hsu et al // ASME Paper 99-GT-0137.* – 1999. – 12 p.

7. *CFD Predictions of Isothermal Fuel-Air Mixing in a Radial Swirl Low  $NO_x$  Combustor using Vari-*

*ous RANS Turbulence Models / Phil T. King et al // ASME Paper GT2012-69299, 2012.* – 11 с.

## References

1. Lefevr A. *Protsessy v kamerakh sgoraniya GTD* [Processes in the combustion chamber of a gas turbine engine]. Moscow, World Publ., 1986. 566 p.

2. Kostyuk, V. E., Kirilash, E. I., Konoplenko, A. A. *Analiz tochnosti chislennykh otsenok perepada davleniya na ZhT, raspredeleniya raskhoda vozdukhа po otverstiyam ZhT, koeffitsientov raskhoda otverstii ZhT i neravnomernosti polya temperatur na vykhode KS, dostignutoi drugimi avtorami, a takzhe ispol'zovannykh imi metodicheskikh priemov. Vypolnenie testovykh chislennykh raschetov koeffitsienta raskhoda otverstiya v tonkoi stenke na setkakh s razlichnym razresheniem i analiz ikh tochnosti. Formirovaniye vyvodov i gipotez: Rabochie materialy etapa № 1. TS № 65 ot 28.12.2009* [An analysis of the accuracy of numerical estimates of the pressure difference across the flame tube, the distribution of air flow over the openings of the flame tube, the flow coefficients of the openings of the flame tube, and the unevenness of the temperature field at the exit of the combustion chamber, achieved by other authors, as well as the methods used by them. Test numerical calculations of the flow coefficient of the hole in the thin wall on grids with different resolutions and analysis of their accuracy. Formation of conclusions and hypotheses: Working materials of stage No. 1. Technical information No. 65 of 12.28.2009]. Kharkov, 2009. 159 p.

3. Kostyuk, V. E., Kirilash, E. I., Konoplenko, A. A. *Formirovaniye chislennykh mode-lei, prigodnykh dlya otsenki effektivnosti konstruktivnykh meropriyatii, napravlennykh na optimizatsiyu kharakteristik KS po neravnomernosti polya temperatur na vykhode KS: Rabochie materia-ly etapa № 5. Dogovor № 203-22/06 ot 28.04.2006* [Formation of numerical models suitable for assessing the effectiveness of structural measures aimed at optimizing the characteristics of the compressor by the uneven temperature field at the output of the compressor: Working materials of stage No. 5. Contract No. 203-22 / 06 of 04/28/2006]. Kharkov, 2009. 39 p.

4. Aверин, S. I., Minaev, A. N., Shvydkii, V. S., Yaroshenko, Yu. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow, Metallurgiya – Metallurgy, 1987. 304 p.

5. *Users Guide FLUENT – Fluent Co., 2005.* – 2216 p.

6. He, G., Guo, Y., Hsu, A. T., Brankovic, A., Syed, S., Liu, N. S. *The Effect of Schmidt Number on Turbulent Scalar Mixing in a Jet-In-Crossflow.* ASME Paper 99-GT-0137. 1999. 12 p.

7. King, Phil T. *CFD Predictions of Isothermal Fuel-Air Mixing in a Radial Swirl Low  $NO_x$  Combustor using Various RANS Turbulence Models.* ASME Paper GT2012-69299, 2012. 11 p.

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗРАХУНКУ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ГАЗУ  
НА ВИХІД ІЗ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД МЕТОДОМ  
ТРИВИМІРНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

*С. А. Євсєєв, Д. В. Козел, І. Ф. Кравченко*

Вирішувалася задача чисельного моделювання течії газу з горінням розпиленого рідкого палива (використовувалася модель рівноважного горіння pdf разом з моделлю частково перемішаної суміші) в кільцевій камері згоряння газотурбінного двигуна. Чисельне моделювання виконувалося в розрахунковому комплексі Ansys Fluent. Метою розрахунків було моделювання радіальної і окружної нерівномірності поля температур газу на виході з камери згоряння. В результаті проведених розрахунків встановлено, що точність моделювання радіальної і окружної нерівномірності поля температур газу на виході з камери згоряння є незадовільною при використанні  $k-\epsilon$  моделі турбулентності з початковими налаштуваннями для розрахункового комплексу Ansys Fluent. При цьому, максимальне значення радіальної нерівномірності поля температур газу на виході з камери згоряння перевищувало значення, отримане в експерименті, на 12,61 %, а максимальне значення окружної нерівномірності на 12,69 %. Для підвищення точності моделювання нерівномірності поля температур на виході з камери згоряння проведено чисельний експеримент по дослідженню впливу ступеню турбулентної дифузії компонент газу на величину нерівномірності поля температур. Для зниження величини нерівномірності поля температур на виході з камери згоряння збільшувалася ступінь турбулентної дифузії компонент газу по відношенню до початкового варіанту розрахунку, виконаного з використанням  $k-\epsilon$  моделі турбулентності з вихідними налаштуваннями для розрахункового комплексу Ansys Fluent, шляхом зменшення турбулентного числа Шмідта  $Sc$  в моделі турбулентності. Для початкових налаштувань моделі турбулентності  $k-\epsilon$  в розрахунковому комплексі Ansys Fluent турбулентне число Шмідта  $Sc = 0,85$ . Чисельний експеримент виконаний для значень  $Sc = 0,6$ ;  $Sc = 0,4$  і  $Sc = 0,2$ . Результати чисельного експерименту підтвердили вплив значення турбулентного числа Шмідта  $Sc$  на результат розрахунку поля температур газу на виході з камери згоряння, при зменшенні величини  $Sc$  рівень окружної і радіальної нерівномірності поля температур газу знижується. Однак ступінь зниження радіальної і окружної нерівномірності при зниженні величини  $Sc$  різна. Тому для забезпечення високої точності розрахунку як окружної, так і радіальної нерівномірності поля температур газу було запропоновано замість постійної величини турбулентного числа Шмідта  $Sc$  використовувати змінне значення, залежне від температури газу. Функціональна залежність турбулентного числа Шмідта  $Sc$  від температури газу була реалізована в розрахунковому комплексі Ansys Fluent за допомогою функції користувача (UDF). Результати моделювання поля температур газу з використанням запропонованої UDF-функції для турбулентного числа Шмідта  $Sc$  задовільно узгоджуються з експериментальними даними як для радіальної, так і окружної нерівномірності поля температур газу на виході з камери згоряння.

**Ключові слова:** камера згоряння; турбулентне число Шмідта; поле температур; комп'ютерне моделювання; UDF; ANSYS Fluent.

**INCREASING ACCURACY OF CALCULATION OF THE PATTERN  
OF GAS TEMPERATURES AT THE EXIT FROM THE COMBUSTION CHAMBER  
OF A GTE BY THE THREE-DIMENSIONAL METHOD COMPUTER MODELING**

*S. Yevsiyiv, D. Kozel, I. Kravchenko*

The problem of numerical simulation of the gas flow with the combustion of atomized liquid fuel was solved (the equilibrium combustion model pdf was used along with the partially mixed mixture model) in the annular combustion chamber of a gas turbine engine. Numerical modeling was performed in Ansys Fluent calculation complex. The purpose of the calculations was to simulate the radial and circumferential unevenness of the gas temperature pattern at the outlet of the combustion chamber. As a result of the calculations, it was found that the accuracy of modeling the radial and circumferential unevenness of the gas temperature pattern at the outlet of the combustion chamber is unsatisfactory when using the  $k-\epsilon$  turbulence model with the initial settings for the Ansys Fluent calculation complex. Moreover, the maximum value of the radial non-uniformity of the gas temperature pattern at the outlet of the combustion chamber exceeded the value obtained in the experiment by 12.61 %, and the maximum value of the circumferential non-uniformity by 12.69 %. To improve the accuracy of modeling the temperature pattern non-uniformity at the outlet of the combustion chamber, a numerical experiment was conducted to study the effect of the degree of turbulent diffusion of gas components on the value of temperature pattern non-uniformity. To reduce the non-uniformity of the temperature pattern at the outlet of the combustion chamber, the degree of turbulent diffusion of gas components was increased with respect to the initial version of the calculation, performed using the  $k-\epsilon$  model of turbulence with the initial settings for the Ansys Fluent calculation complex, by reducing the turbulent Schmidt number  $Sc$  in the turbulence model. For the initial settings of the  $k-\epsilon$  turbulence model in the Ansys Fluent calculation complex, the turbulent Schmidt number  $Sc = 0.85$ . A numerical experiment was performed for the values of  $Sc = 0.6$ ,  $Sc = 0.4$ , and  $Sc = 0.2$ . The results of a numerical experiment confirmed the influence of the turbulent

Schmidt number  $Sc$  on the result of calculating the gas temperature pattern at the outlet of the combustion chamber; as the value of  $Sc$  decreases, the level of the circumferential and radial non-uniformities of the gas temperature pattern decreases. However, the degree of reduction of radial and circumferential irregularities with a decrease in  $Sc$  is different. Therefore, to ensure high accuracy in calculating both the circumferential and radial non-uniformities of the gas temperature pattern, it was proposed to use a variable value of the turbulent Schmidt number  $Sc$  depending on the gas temperature instead of a constant value. The functional dependence of the turbulent Schmidt number  $Sc$  on the gas temperature was implemented in the Ansys Fluent calculation complex using the user function (UDF). The results of modeling the gas temperature pattern using the proposed UDF function for the turbulent Schmidt number  $Sc$  are in satisfactory agreement with the experimental data for both radial and circumferential non-uniformities of the gas temperature pattern at the outlet of the combustion chamber.

**Keywords:** combustion chamber; turbulent Schmidt number; gas temperature pattern; computer simulation; UDF; ANSYS Fluent.

**Евсеев Сергей Анатольевич** – инженер-конструктор 1 категории расчетно-экспериментального отдела камер сгорания ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

**Козел Дмитрий Викторович** – начальник расчетно-экспериментальной группы отдела камер сгорания ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

**Кравченко Игорь Федорович** – д-р техн. наук, директор ГП «Ивченко-Прогресс», Генеральный конструктор, Запорожье, Украина.

**Serghii Yevsieiev** – engineer - designer of the 1st category of the Calculation and Experimental Department of Combustion Chambers, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine,  
e-mail: EvseevSA@ivchenko-progress.com, ORCID Author ID: 0000-0001-5231-0826.

**Dmitry Kozel** – Head of the Settlement Experimental Group of the Department of Combustion Chambers of the SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine,  
e-mail: 03504@ivchenko-progress.com, ORCID Author ID: 0000-0002-7295-2284.

**Igor Kravchenko** – Doctor of Technical Sciences, Director of SE "Ivchenko-Progress", General Designer, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: 03504@ivchenko-progress.com, Scopus Author ID: 57209261569