

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 10. С. 454–459
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 10, pp. 454–459

Научная статья
УДК 621.45.034
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186293>
EDN: <https://www.elibrary.ru/GMNXNL>

К выбору модели турбулентности при численном моделировании нестационарных процессов в камере сгорания газотурбинных двигателей

В.В. Донских¹✉, А.Т. Савчук², А.А. Яковлев³

^{1,2,3}ФГБУО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, Российская Федерация

²atsavchuk@mai.education✉

Аннотация. Выбор применимой модели турбулентности при моделировании внутrikамерных процессов ГТД (газотурбинного двигателя) является одним из решающих шагов в процессе численного моделирования течений с учетом химических реакций в КС (камере сгорания) ГТД определяющих как картину течения, так и горения. Применение неадекватной модели турбулентности приведет к неочевидным, ложным выводам в процессе проектирования и комплексной доводки КС, как высоконадежного изделия в целом. В представленной статье авторы предлагают, к рассмотрению интегральный формальный признак адекватности применяемой модели турбулентности, основанный на предположении однодоменной стохастической природы колебаний примитивных газодинамических переменных (температура, скорость, давление) и массового расхода потока ГВС (газовоздушной смеси) в выходном сечении КС при условии заведомо устойчивого режима работы изделия в целом. Этот подход, по мере накопления экспериментальных данных, позволит объективно формализовать данный шаг процесса проектирования в качестве дополнительного инструмента к широко используемому в расчетной практике критерию Y^+ . В качестве модели КС использована заведомо устойчивая на крейсерском режиме камера, широко используемая в учебном процессе.

Ключевые слова: вычислительная гидрогазодинамика, нестационарный процесс, камера сгорания, формальный критерий выбора модели турбулентности, стохастические процессы

Для цитирования. Донских В.В., Савчук А.Т., Яковлев А.А. К выбору модели турбулентности при численном моделировании нестационарных процессов в камере сгорания газотурбинных двигателей // Термовые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 10. С. 454–459. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186293>

Original article

To choose a turbulence model for numerical simulation of nonstationary processes in the combustion chamber of gas turbine engines

V.V. Donskikh¹✉, A.T. Savchuk², A.A. Yakovlev³

^{1,2,3}Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russian Federation

²atsavchuk@mai.education✉

Abstract. The choice of an applicable turbulence model for modeling the intracameral processes of a gas turbine engine (GTE) is one of the decisive steps in the process of numerical modeling of “burning” flows in the CC (combustion chamber) of a GTE, which determine both the flow pattern and combustion. The use of an inadequate turbulence model will lead to nonobvious false conclusions in the process of designing and comprehensive engine development as a high-reliability product. Most of the approaches, presented by various researchers and science teams, propose to use in computational practice a turbulence models, implemented in various CFD (Computational Fluid Dynamics) software (ANSYS.Fluent/CFX, FlowVision, FloEFD...) with verification of the choice of turbulence model based on the results of correlation of numerical modeling data with physical experiments without formation of a formal mathematical feature taking into account the mesh effect, allowing to determine the applicable turbulence model. The Y+ criterion, widely used in computational practice, allows one to evaluate the correctness of the computational process only in the near-wall inflation layers of the computational mesh without taking into account the influence of the entire array of generated grid regions as the part of the entire problem. The complex mutual influence of the main factors for the successful correlation of the mathematical model and the physical experiment, namely: meshes, the applied turbulence model and the solver used, is currently an open area of research. In the presented article the authors propose for consideration a formal sign of adequacy of the applied turbulence model with taking into account the mesh effect based on the assumption of a single-domain stochastic nature of oscillations of primitive gas-dynamic variables (temperature/velocity/pressure) and the mass flow rate of the GAM (gas-air mixture) in the outlet section of the CC under the condition of the known stable operating mode of the combustion chamber. That approach will allow, as experimental data accumulate, to formalize objectively this step of the combustion chamber's design process as an additional tool to the Y+ criterion, which is widely used in computational CFD practice. As a modeling environment the authors used ANSYS.Fluent as a CFD environment that has received the greatest distribution due to the successful integration of software and math models in modeling lean burning flows “kerosene + air”. As a CC model, a known stable KS in the cruiser mode, widely used in the educational process, was used.

Keywords: computational fluid dynamics, non-stationary process, combustion chamber, formal criterion for choosing a turbulence model, stochastic processes

For citation. Donskikh V.V., Savchuk A.T., Yakovlev A.A. To choose a turbulence model for numerical simulation of nonstationary processes in the combustion chamber of gas turbine engines. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 10, pp. 454–459. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186293>

Введение

Использование модели турбулентности, адекватной имеющейся геометрии задачи, начальными условиям потока и сеточной модели – один

из основных шагов в формировании численного эксперимента при проведении поверочных CFD расчетов КС ГТД. Различные группы исследователей (например, [4, 6]) предлагают подходы для

выбора модели турбулентности на основе согласования данных физического и численного эксперимента, без формирования математического признака, формально определяющего выбор. Наличие быстро вычисляемого (на каждом временном шаге), математического признака, дополнительного к широко используемому критерию Y^+ [3], позволит с большей вероятностью выбирать применимую модель турбулентности, абстрагируясь от типа применяемого сольвера и как следствие набора используемых им пристеночных функций, и в конечном итоге приведет к общей экономии ресурсов.

Материалы и методы

Методика моделирования нестационарных процессов в КС ГТД, вводимые формальные критерии расчета с учетом сеточного влияния детально описаны в предыдущих работах авторов [2, 3]. Данные численных экспериментов взяты по результатам вышеуказанных работ на заведомо устойчивом режиме работы изделия и расчетной сетке среднего разрешения (medium). Призматические инфляционные слои построены по результатам вычисления критерия Y^+ по данным холодной продувки крейсерского режима [10] с адаптацией под минимальные требования моделей турбулентности k -epsilon realizable [1, с. 46] и k -omega [1, с. 57].

Выбор ANSYS.Fluent в качестве решателя обусловлен удачной интеграцией в его составе: изолированных химических (Chemkin) и газодинамических решателей, автономного механизма химической кинетики горения ТВС (топливо-воздушной смеси) Jet-A, моделей сопутствующих узлов ГТД (напр., центробежной форсунки как изолированного математического объекта расчета – Pressure-Swirl Atomizer) и узкона правленных CFD моделей и инструментариев, а именно:

1. Дискретной многофазной модели движущейся среды (DPM).

2. Выборочно-адаптивного уточнения табулированных термодинамических и термохимических переменных расчета на каждом временном шаге без частичной либо полной остановки счета (ISAT – In-Situ Adaptive Tabulation) в моделях: EDC (Eddy-Dissipation-Concept – модель вихревой диссиляции), PDF (Probability Density Function – функция плотности вероятности хим. реакций в условиях турбулентного потока).

3. Модели распада жидкостных пленок (LISA) в нескольких постановках и реализациях.

4. Сольверов химической кинетики реагирующих сред с высокой степенью детализации реакций горения авиационного керосина в воздухе – Wall Surface Reactions and Chemical Vapor Deposition (реакции на границах раздела паровой и жидкостной фазы и хим. осаждение из паровой фазы).

5. Математических моделей горения предварительно несмешанных сред (Non-Premixed Combustion) в нескольких постановках и реализациях.

6. Интерфейсов базовых событий расчета, позволяющих вести как управление процессом счета с возможностью использования АСПУ (авторских средств программного управления в виде функций на языке С) со стабилизацией промежуточных результатов на любом этапе вычислений, так и полноценный межпрограммный обмен данными на языке высокого уровня.

Предлагаемый формальный критерий

Ввиду принципиально случайной природы турбулентных процессов [5, 7, 8], формальным критерием выбора модели турбулентности, реализуемой на конкретной расчетной сетке, авторы предлагают считать степень близости колебаний средневзвешенной по площади сечения (area average) температуры торможения (далее по тексту «температура»), газовоздушного потока на выходе из КС (сечение Outlet) к однодоменному случайному процессу с выраженным нормальным распределением. Температура выбрана в качестве индикатора как самая «инертная» примитивная газодинамическая переменная, наименее подверженная мгновенным вычислительным прецессиям в различных решателях. Авторами не обнаружено упоминание вышеописанной формальной оценки ни в отечественной, ни в зарубежной литературе.

После получения устойчивого нерасходящегося «горящего решения» (методика изложена в [2]) с уровнем невязок примитивных газодинамических переменных потока не более $1e-2$ на протяжении не менее 200 шагов решения, авторы предлагают проводить поиск закона распределения исследуемого множества значений для каждой исследуемой модели турбулентности средствами пакета прикладной математики «Wolfram Mathematica».

Технологический процесс обработки данных

После достижения нерасходящегося характера «горячего решения» на сетке среднего разрешения (детально изложено в [2, 9]), список со значениями температуры потока в выходном сечении КС формируется стандартным инструментарием ANSYS Fluent/Reports в виде типизированного текстового файла (см. рис. 1), далее полученный список импортируется в среду математической обработки («Wolfram Mathematica») для поиска параметров распределения набора вычисленных значений температуры в выходном сечении КС после достижения расчетом крейсерских параметров функционирования изделия (массовый поток, температура/скорость/давление в выходном сечении КС) с малыми уровнями колебания невязок и нейтральным трендом их абсолютных значений.

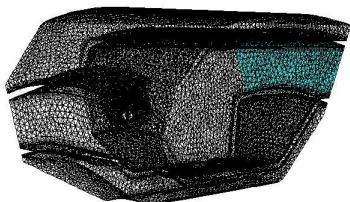


Рис. 1. Поверхность «Outlet» расчетной сетки КС

Модели турбулентности 2-го порядка точности

Модель k-epsilon realizable

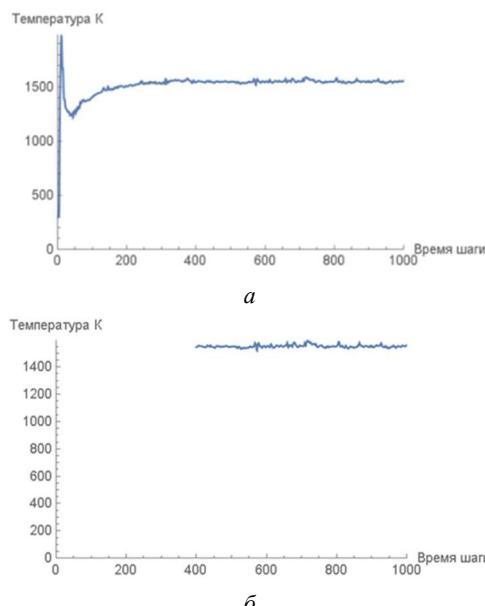


Рис. 2. Температура в выходном сечении, слева полный ряд (а), справа ряд для стат. обработки (б)

Данные на математическую обработку экспортятся после достижения решения с стабильным уровнем колебания невязок примитивных газодинамических переменных (не более 1e-2), а именно с 410-го и до 1000-го шага (рис. 2 б, рис. 3).

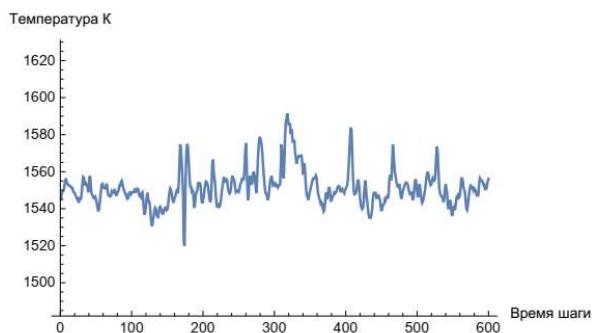


Рис. 3. Температура в выходном сечении КС для модели k-epsilon realizable в адаптированном масштабе

```
In[216]:= (* Первичный поиск распределения *)
FindDistribution[LStat1]
[найти распределение
Out[216]= NormalDistribution[1549.09, 5.96823]
```

Первичная стат. обработка обнаруживает наличие одного домена данных с нормальным распределением.

При увеличении количества временных шагов до 3500 сохраняется наличие одного домена данных с нормальным распределением и незначительно измененным медианой и среднеквадратичным отклонением (рис. 4), на основании чего можно сделать вывод о гармонизации сетки, условий течения и примененной модели турбулентности как следствие отсутствия воздействий на значение температуры в выходном сечении КС факторов неслучайной, систематической природы.

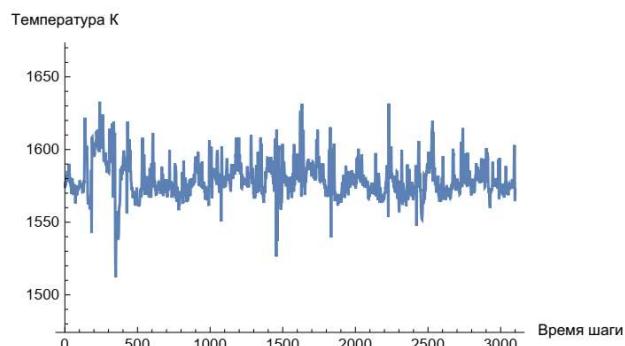


Рис. 4. Температура в выходном сечении КС для модели k-epsilon realizable в адаптированном масштабе

```
(* Первичный поиск распределения *)
FindDistribution[LStat1]
найти распределение
NormalDistribution[1555.95, 7.59224 ]
```

Модель k-omega standard

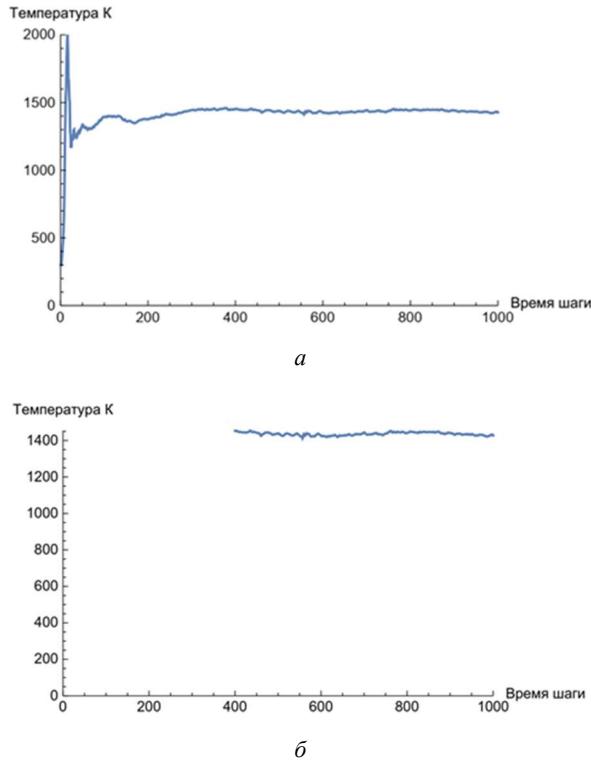


Рис. 5. Температура в выходном сечении, слева полный ряд (а), справа ряд для стат. обработки (б)

Данные на математическую обработку передаются после достижения нерасходящегося характера невязок, а именно с 400-го и до 1000-го шага (рис. 5 б, рис. 6).

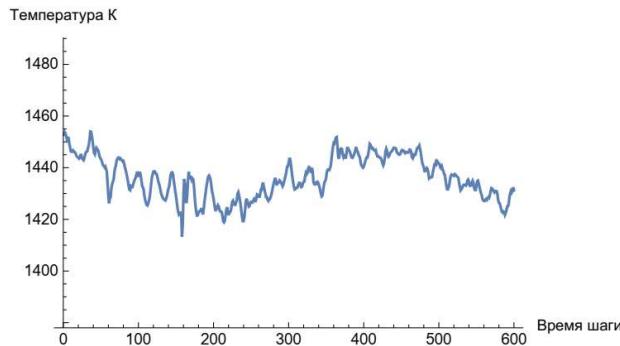


Рис. 6. Температура в выходном сечении КС для модели k-omega standard в адаптированном масштабе

```
(* Первичный поиск распределения *)
FindDistribution[LStat1]
найти распределение
MixtureDistribution[{0.695071, 0.304929},
{NormalDistribution[1432.66, 6.25606], NormalDistribution[1445.56, 3.40637]}]
```

Первичная обработка данных обнаруживает наличие двух доменов с нормальными распределениями, но различной мощности по отношению к результатам обработки данных модели k-epsilon realizable. На основании чего можно сделать вывод о существовании факторов не случайного воздействия на полученное решение с последующим исключением данной модели турбулентности из набора применимых моделей задачи.

Модель SST-2^{го} порядка точности

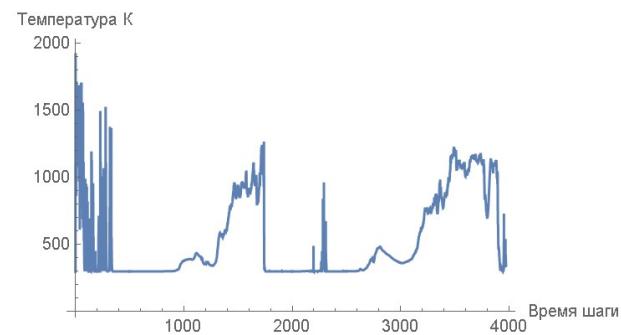


Рис. 7. Температура в выходном сечении КС для модели SST-2го порядка точности в течении всего расчета

Ввиду построения расчетной сетки без учета минимальных требований модели SST-2-го порядка точности, расчет завершен без достижения физически адекватных результатов и за время в 2,5 раза большее по сравнению с моделями k-epsilon realizable и k-omega standard. При этом необходимо отметить, что в процессе моделирования существовали только короткоживущие зоны очагового горения, после чего происходил бедный срыв (рис. 7). Математическая обработка данных этого расчета не проводилась.

Модель SST-4^{го} порядка точности

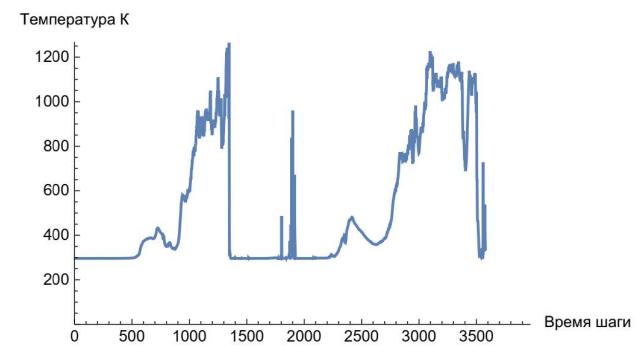


Рис. 8. Температура в выходном сечении КС для модели SST-2го порядка точности в течении всего расчета

Использование моделей больших порядков точности приводит к еще более длительному времени расчета по сравнению с SST-2го порядка точности с аналогичными результатами по бедному срыву (рис. 8).

Результаты и обсуждение

В вычислительной гидрогазодинамике еще не разработана универсальная теория турбулентности, одинаково успешная в решении всех классов задач, что создает условия выбора той или иной модели турбулентности без четко определенного математического признака, позволяющего применить модель, гармонизированную с расчетной сеткой и условиями течения. Применение формальных критериев выбора модели турбулентности, как дополнение к существующим методикам, позволяет сделать ранний вывод о применимости той или иной модели непосредственно во время вычислений.

Заключение

Применение в CFD практике формализованного, легко вычисляемого на каждом временном шаге критерия гармонизации примененной модели турбулентности и расчетной сетки, позволит сформировать в среде CFD вычислений совместимый набор используемых математических моделей еще на этапе черновых (draft) расчетов и в конечном итоге позволит меньшими ресурсами решать данный класс задач.

Список источников

1. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 19.2
2. Savchuk A.T., Yakovlev A.A. Method of the numerical modelling of unstationary processes in the combustion chamber of a gas turbine engine // Journal of Physics 2021: Conference Series. Vol. 1925. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012009
3. Schlichting H., Gersten K. Boundary Layer Theory // Journal of Fluid Mechanics. 2000. Vol. 415. pp. 346–347. DOI: 10.1017/S0022112000218946
4. Gras'ko TV, Karpenko ON, Trofimchuk MV. Thermogasdynamics modeling of the working process in the combustion chamber of a gas turbine engine. Aerospace Forces. Theory and Practice. 2017;(1):193–201. (In Russ.).
5. Zeldovich YaB, Barenblatt GI, Librovich VB et al. Mathematical theory of combustion and explosion. Moscow: Science; 1980. (In Russ.).
6. Isaev AI, Skorobogatov SV. Hydrodynamic verification and validation of numerical methods for calculating the flow in the combustion chamber of a gas turbine engine. *Trudy MAI*. 2017;(97). (In Russ.).
7. Lefebvre A. Processes in gas turbine engine combustion chambers. Moscow: Mir. 1986. (In Russ.).
8. Onishchik II, Krylov BA, Yun AA. Modeling of heat and mass transfer processes in model combustion chambers. Vestnik Moskovskogo aviationskogo instituta. 2009;16:(1). (In Russ.).
9. Savchuk AT, Yakovlev AA. Numerical modeling of unsteady processes in the combustion chamber of a gas turbine engine. Proceedings of the XIII International Conference on Applied Mathematics and Mechanics in the Aerospace Industry (AMMAI'2020). Alushta. Moscow: MAI; 2020. 102 p. (In Russ.).
10. Yanyshhev DS, Bykov LV, Molchanov AM. Mesh models for solving engineering thermophysical problems in the ANSYS environment. LENAND; 2018. (In Russ.).

References