

УДК 621.438

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ЗАДАНИЯ ВХОДНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКА ЗА УГОЛКОВЫМ СТАБИЛИЗАТОРОМ ПЛАМЕНИ

© 2015 О. В. Коломзаров, В. М. Анисимов, И. А. Зубрилин

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматривается влияние способа задания характеристик турбулентности на входной границе на результаты расчёта параметров потока за уголкового стабилизатором пламени при использовании метода крупных вихрей и подсеточной модели турбулентности – Смагоринского-Лилли. Исследование проводится для пропановоздушной смеси с температурой 300 К в канале квадратного сечения с расположенным в нём плохообтекаемым телом, в основании которого лежит равносторонний треугольник с длиной ребра 25 мм. Среднемассовая скорость потока на входе – 10 м/с. Рассматривались несколько способов задания граничных условий на входной границе. Два варианта без турбулентности на входе (равномерное распределение скорости по входному сечению и трубный профиль скорости) и два варианта с искусственно смоделированной турбулентностью (вихревой метод и спектральный синтезатор турбулентности). В результате исследования были получены значения интенсивности потока в области до стабилизатора, распределение скорости, кинетической энергии в поперечных и продольных сечениях за стабилизатором. Также приведены графики спектра энергетической плотности пульсаций скорости.

*Моделирование крупных вихрей, вихревой метод, метод спектрального синтезатора, плохообтекаемое тело, уголкового стабилизатор.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-97-105

### Введение

В настоящее время при проектировании технических изделий широко применяются методы моделирования турбулентных течений. Наибольшее распространение получили: (U)RANS, LES, DNS. Так, для множества турбулентных течений, в которых существенную роль играют крупные вихревые структуры, результаты расчёта с помощью (U)RANS моделей не являются удовлетворительными. Прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation – DNS) невозможно применить в силу необходимости больших вычислительных ресурсов. Альтернативным подходом является метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES). Метод LES более универсален, однако для решения инженерных задач, на данный момент, необходимо решить ряд методических вопросов [1]. Одним из таких вопросов является способ задания граничных условий на входе в расчётную область.

Граничные условия разделяются на две большие группы – метод «рециклинга» турбулентности и метод «синтетической» турбулентности. Среди них можно выделить Precursor Simulation (PS), Vortex Method (VM), Synthetic Eddy Method (SEM), Spectral Synthesizer (SS). Методы «рециклинга» турбулентности отличаются хорошим качеством создаваемого на входной границе поля флуктуаций скорости. Однако методы такого типа не являются универсальными, так как применяемое в них перемасштабирование полей скорости специфично для определённого типа течения. Другим недостатком является невозможность или сложность применения методов этого типа к трёхмерным течениям в геометрически сложной области. Методы генерации «синтетической турбулентности» являются универсальными и простыми как в реализации в программах вычислительной гидродинамики, так и в использовании. В то же время низкое качество поля флуктуаций ско-

рости, создаваемого большинством методов этого типа, приводит к существенной деградации флуктуаций скорости при удалении от входной границы и к значительным отклонениям характеристик осреднённого течения. Эти модели имеют свои условия применения и требуют доработки.

Одним из основных узлов газотурбинного двигателя (ГТД) является форсажная камера (ФК) сгорания. Для стабилизации пламени и создания благоприятных условий перемешивания топлива в ФК используют уголкового стабилизатора пламени. Этот объект часто применяется для исследования горения заранее перемешанных смесей [2, 3]. В работе [4] проводилось численное моделирование течения за плохообтекаемым телом – уголкового стабилизатора пламени. В ней были рассмотрены различные углы при вершине стабилизатора и выявлено, что при больших углах стабилизатора пламя стабильнее. Размер зоны обратных токов зависит от угла раскрытия стабилизатора, а также от того, проводится холодная продувка или же имеется горение. При описании граничных условий не уточняется об использовании дополнительных граничных условий на входной границе. В работе [5] авторы сравнивали результаты эксперимента [6] с данными, полученными в результате численного моделирования. Представлены результаты изотермического потока и потока с горением, сопоставлялись средние скорости вдоль оси, значения средней по времени температуры потока, кинетическая энергия, а также для нескольких точек расчётной области построены спектры энергетической плот-

ности пульсаций. Результатом этой статьи стал вывод о том, что применение LES моделирования позволяет получать удовлетворительные результаты. Размер зоны рециркуляции отличается от эксперимента на 12 %. При расчёте на входной границе были заданы флуктуации поля скорости, при этом характеристики турбулентности равномерны по входному сечению, а профиль скорости был взят из эксперимента.

Можно сделать заключение, что не все исследователи уделяют внимание заданию пульсаций параметров на входной границе, которые являются достаточно важными для моделирования методом крупных вихрей.

Целью данной работы является исследование влияния способа задания характеристик турбулентности на входной границе в расчётную область на результаты расчёта параметров потока за уголкового стабилизатора пламени при использовании LES.

### Модели и инструменты

Для исследования зависимости параметров потока от граничных условий был выбран уголкового стабилизатора пламени, исследуемый в работах [6, 7]. Схема расчётной области приведена на рис. 1. Расчётная область представляет собой канал квадратного сечения  $50 \times 50$  мм с расположенной в нём призмой, в основании которой лежит равносторонний треугольник с длиной ребра  $B=25$  мм. По схеме была создана конечно-объёмная (КО) модель расчётной области.

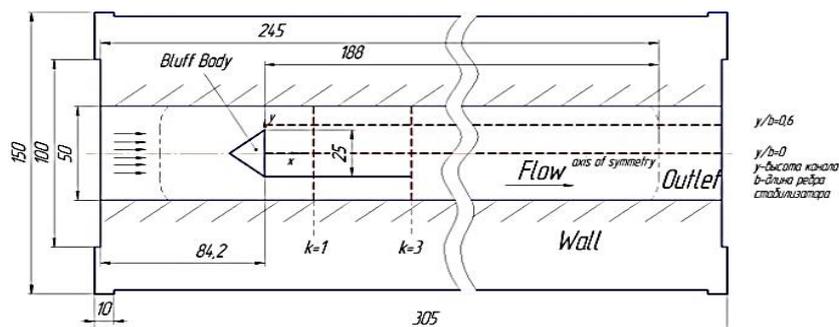


Рис. 1. Схема исследуемой области

**Граничные условия**

Расчёт проводился со следующими параметрами:

- модель турбулентности – LES;
- подсеточная модель турбулентности – Smagorinsky-Lilly;
- температура потока на входе – 300 К;
- среднемассовая скорость потока на входе – 10 м/с;
- статическое давление на выходе – 101,325 кПа;
- рабочее тело – смесь воздуха и пропана.

Для задания параметров на входе было использовано четыре подхода, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Исследуемые варианты задания профиля параметров на входе

Обозначение	Профиль скорости	Профиль характеристик турбулентности	Метод задания турбулентных пульсаций
А	равномерный	-	-
В	трубный	-	-
С	трубный	трубный	Синтезатор
Д	трубный	трубный	Вихревой

А) *Равномерное поле скорости.* В этом случае не были использованы специальные способы задания распределения параметров. Использовалась стандартная функция задания параметров на входной границе Ansys Fluent. Тип входной границы – Velocity Inlet.

В) *Развитый трубный профиль.* Для создания такого распределения поля скорости на входной границе был осуществлён предварительный расчёт. Создавалась расчётная область в форме куба с длиной ребра 50 мм. Граничные условия полностью совпадали с параметрами моделируемой области. Во время расчёта параметры с выходной границы автоматически становятся начальными условиями для входной, тем самым имитируя мерный участок экспериментальной установки. В

результате такого подхода образуется так называемый развитый трубный профиль.

Синтетическое моделирование пульсаций (СМП) базируется на двух методах.

С) *Метод спектрального синтеза-тора.* Спектральный синтезатор – это способ генерации колебания компонентов скорости. Он основан на технологии формирования случайного потока, впервые предложенной Р. Крейчнаном и модифицированной В. М. Смирновым и др.

На входе в расчётную область используются специальные математические операции, моделирующие распределение скорости по гармонической зависимости с заданной амплитудой. Скорость представляется в следующем виде:

$$v_i(x, t) = \left(\frac{N}{2}\right)^{1/2} \sum_{n=0}^N [p_i^n \cdot \cos(k_j^n x_j + \omega_n t) + q_i^n \cdot \sin(k_j^n x_j + \omega_n t)],$$

где  $p_i, q_i$  – амплитуды;  $\omega$  – частота.

Д) *Метод вихрей* [7]. В данном методе вводится набор вихрей, взаимодействующих друг с другом. Вихри распределяются равномерно на входной границе и отстоят друг от друга на расстояние  $l/2$ , где  $l$  – характерный масштаб, определяющий скорость затухания вихря при удалении от его центра. В плоскости, нормальной к направлению течения, рассчитывается случайное поле скорости, которое накладывается на распределение средней скорости на входной границе. Положение, размер и интенсивность каждого вихря предполагаются известными в каждый момент времени.

Распределение скорости на входной границе расчётной области находится при помощи закона Био-Савара:

$$v(x, t) = -\frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N \Gamma_k \frac{(x-x'_k) \times z}{|x-x'_k|^2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{|x-x'_k|^2}{2\sigma^2}\right) \right],$$

где  $z$  – единичный вектор.

### Результаты и обсуждение

В результате вышеуказанных настроек на входной границе образуются следующие распределения мгновенных скоростей. Как видно из рис. 3, методы С и D отличаются размерами вихревых структур, а при методе А и В флуктуации на входной границе отсутствуют.

Отличаются не только поле скорости на входной границе, но и структура потока при удалении от неё. На рис. 4 приведены поля скорости потока, на которых можно различить размеры турбулентных структур. При использовании методов А и В поле скорости сохраняется до тела стабилизатора без изменений. У метода С заметны мелкие вихревые структуры, интенсивность которых снижается на расстоянии около 2–3 калибров. В методе D образуются более крупные вихри, которые сохраняются до самого стабилизатора.

На графиках среднеквадратичного отклонения скорости потока (рис. 5, б) в продольном сечении до стабилизатора на расстояниях  $y/B=0$  и  $0,6$  от оси видно отличие пульсаций скорости при использовании различных моделей. Можно заметить, что у метода вихрей пульсации незначительно уменьшаются на протяжении всей исследуемой области, в то время как у метода спектрального синтезатора они резко снижаются и выходят на определённый уровень. В методе А и В пульсации практически отсутствуют, за исключением участка рядом со стабилизатором.

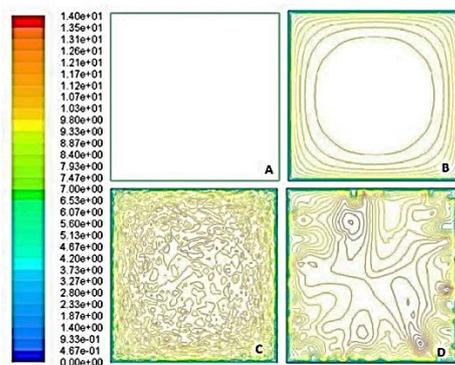


Рис. 3. Контуры скорости на входной границе

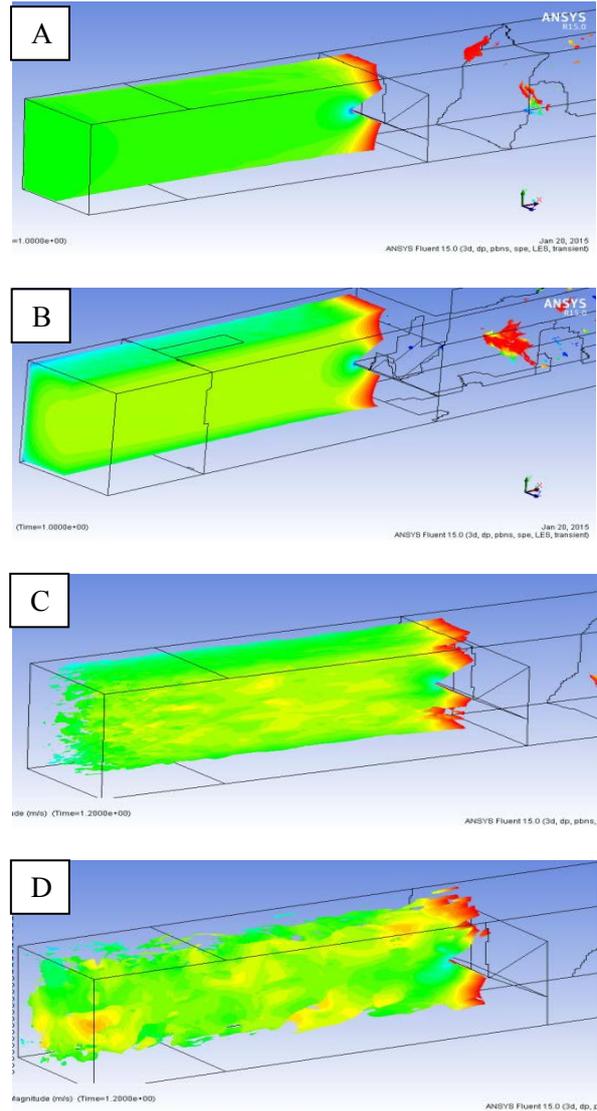


Рис. 4. Картина распределения скорости на участке до стабилизатора

Искусственно созданные пульсации скорости оказывают влияние на параметры потока, что видно при сравнении осевой скорости вдоль оси (рис. 7). Полученные значения скорости при использовании синтетического моделирования пульсаций имеют лучшее совпадение с экспериментальными данными в отличие от результатов с равномерным профилем и развитым трубным профилем скорости. Экспериментальные данные взяты из работы S. Fujii [8].

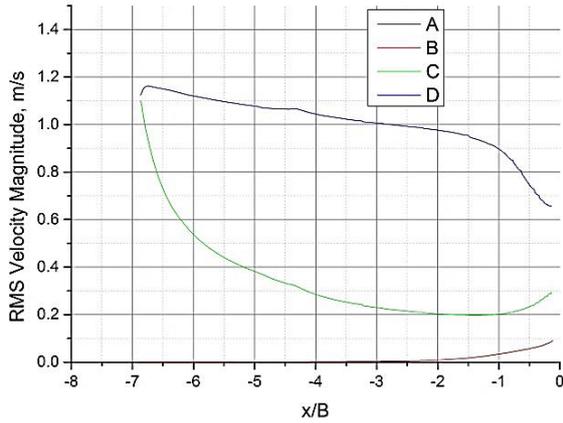


Рис. 5. Сравнение пульсаций скорости  $y/B=0.6$

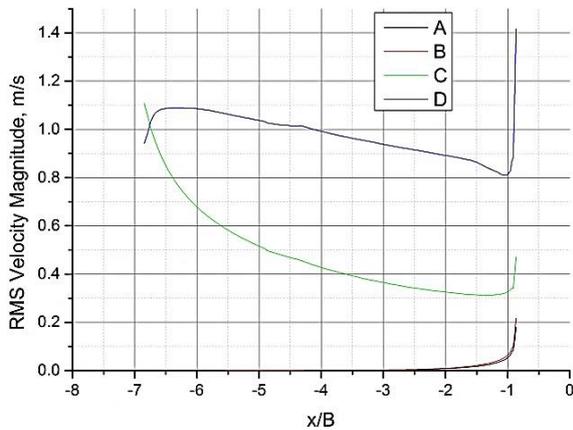


Рис.6. Сравнение пульсаций скорости  $y/B=0$

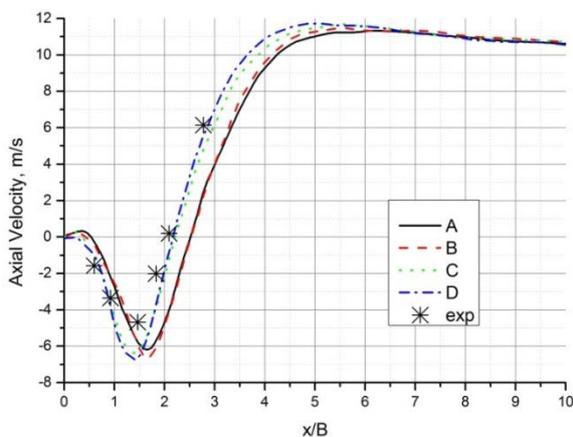


Рис. 7. Сравнение осевой скорости моделей с разными граничными условиями,  $x$  - длина области от стабилизатора до выходной границы

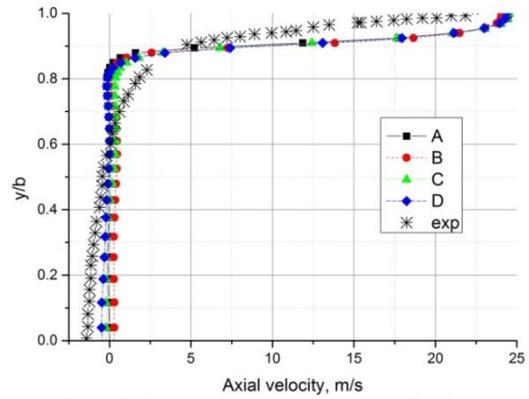


Рис. 8. Эпюра скорости при  $x/B=0.4$ , где  $b$  – радиальное положение от оси до точки с максимальной скоростью

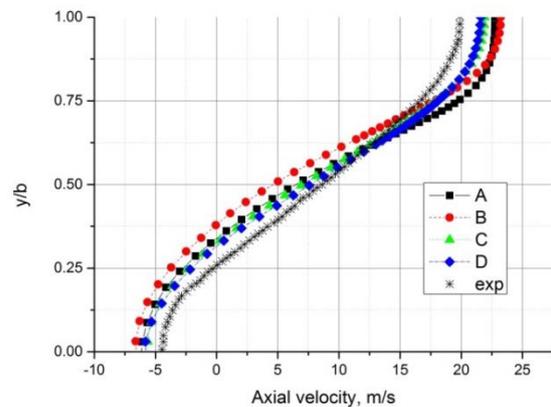


Рис. 9. Эпюра скорости при  $x/B=1.6$ , где  $b$  – радиальное положение от оси до точки с максимальной скоростью

При сравнении эпюры скорости в поперечном сечении на удалении  $x/B=0,4$  и  $1,6$  значительного отличия в результатах не замечено. По значениям эпюры с использованием начальных граничных условий видно, что значения располагаются ближе к экспериментальным данным (рис. 8, 9).

Из рис. 10 видно, что расход через зону обратных токов совпадает с экспериментальными значениями лучше на моделях, в которых учтена входная турбулентность.

Было проведено сравнение кинетической энергии потока, полученной в расчёте с результатами эксперимента. В эксперименте [9] и в расчётах кинетическая энергия рассчитывалась по формуле

$$k = \frac{u'^2}{2} + \frac{v'^2}{2} + \left( \frac{u'^2 + v'^2}{2} \right).$$

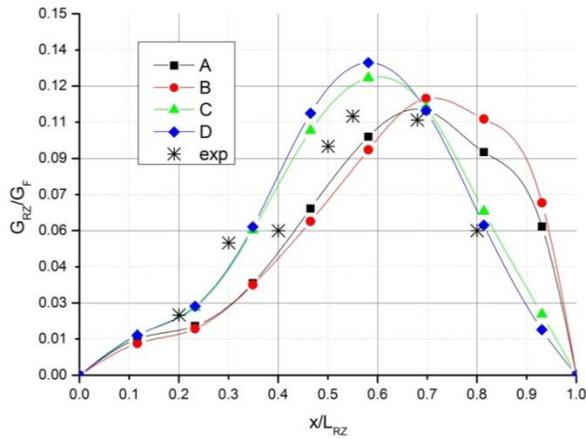


Рис. 10. Расход смеси через зону обратных токов

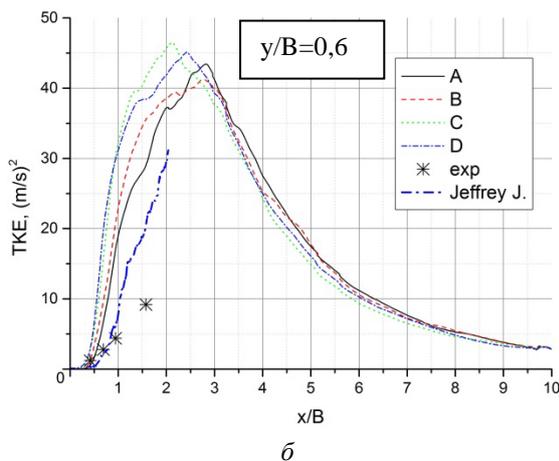
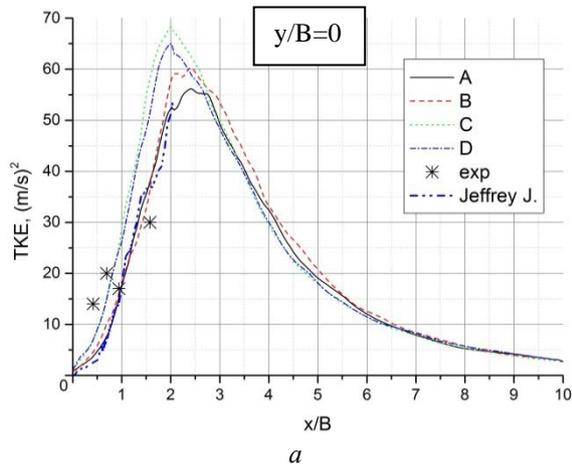


Рис. 11. Сравнение значений кинетической энергии турбулентности

Также приведены результаты расчётов Jeffrey J. из работы [10]. В ней проводилось сравнение результатов эксперимента, расчётов LES (Kinetic-Energy Transport) и RANS. На рис. 11 приведены значения кинетической энергии турбулентности в продольных сечениях  $y/B=0, 0,6$ . По ним видно, что значения кинетической энергии, полученные в расчётах, имеют приемлемое совпадение с экспериментальными результатами и значениями, взятыми из работы [10].

На рис. 12 приведён график спектра энергетической плотности пульсаций скорости. На графике видно наличие инерционного интервала (закон «5/3»). В точке, лежащей на оси и удалённой от стабилизатора на расстояние  $x/B=3$ , выделяется частота с наибольшей энергией. Эта точка соответствует частоте  $f=187$  Гц, которая является следствием возникновения когерентных вихревых структур, периодически срывающихся с кромки плоскообтекаемого тела (рис.13).

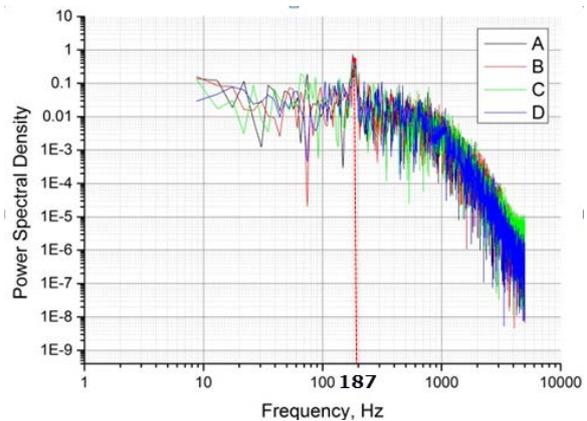


Рис. 12. Спектр энергетической плотности пульсаций скорости потока (FFT) в точке, лежащей на оси, на расстоянии  $x/B=3$  за уголковым стабилизатором пламени

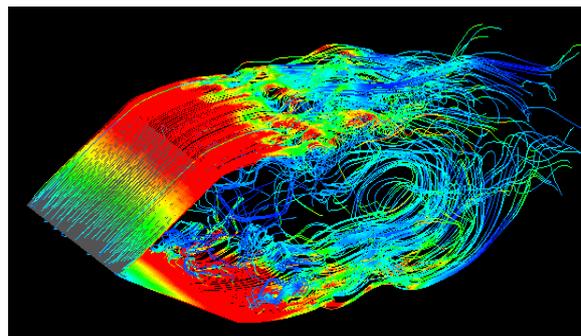


Рис. 13. Линии тока за стабилизатором

### Заключение

В работе проведены исследования по влиянию входных граничных условий на результаты расчёта турбулентного потока в канале с уголкового стабилизатором пламени. На входной границе применялись равномерный профиль, развитый трубный профиль, вихревой метод моделирования характеристик турбулентности и метод спектрального синтезатора.

Установлено, что добавление флуктуаций на входную границу изменяет структуру потока, образуя дополнительные завихрения на участке до стабилизатора пламени. Эти структуры оказывают воздействие на поток за стабилизатором.

Для данной задачи методы вихрей и спектрального синтезатора оказывают практически одинаковое влияние на осевую скорость, размеры зоны обратных токов и другие параметры, но уровень пуль-

саций скорости до уголкового стабилизатора устанавливается разный. Из-за недостатка экспериментальных данных по влиянию входных условий нельзя полностью оценить степень влияния метода моделирования пульсаций на поток.

Метод моделирования крупных вихрей довольно хорошо предсказывает скорость потока и даёт приемлемые результаты по расходу через зону обратных токов. Но по кинетической энергии получаются неоднозначные результаты: на оси и на расстоянии  $y/B=0,2$  результаты хорошо совпадают как с экспериментом, так и с расчётом Jeffrey J. При удалении от центральной оси различия велики.

В дальнейшем планируется исследовать влияние входных граничных условий на других элементах ГТД, к примеру, в горелочном устройстве, а также на результаты расчёта с горением.

### Библиографический список

1. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчётах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 364 с.
2. Tabor G.R., Baba-Ahmadi M.H. Inlet conditions for large eddy simulation: A review // *Computers and Fluids*. 2010. V. 39, Iss. 4. P. 553-567. doi.org/10.1016/j.compfluid.2009.10.007
3. Kile B., Garwick K., Lunch A., Gord J.R. Non-reacting and combusting flow investigation of bluff bodies in cross flow // *Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/SAE/ASEE 42nd Joint Propulsion Conference*. 2006. V. 11. P. 8743-8753. doi.org/10.2514/6.2006-5234
4. Yang G., Jin H., Bai N. A Numerical Study on Premixed Bluff Body Flame of Different Bluff Apex Angle // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. V. 2013. P. 132-140. doi.org/10.1155/2013/272567
5. Ryden R., Eriksson L.-E., Olovsson S. Large Eddy Simulation of Bluff Body Stabilized Turbulent Premixed Flame // *American Society of Mechanical Engineers* (Paper). 1993. P. 12. doi.org/10.1115/93-gt-157
6. Sjunesson A., Henriksson R., Lofstrom C. CARS measurements and visualization of reacting flows in bluff body stabilized flame // *AIAA/SAE/ASME/ASEE 28<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit*. 1992. V. 28. P. 48-56. doi.org/10.2514/6.1992-3650
7. Handout for the CES-Seminar Talk Vortex Methods Matthias Kirchhart 8th May 2013.
8. Fujii S., Eguchi K. A Comparison of Cold and Reacting Flow Around a Bluff-Body Flame Stabilizer // *Transaction of the ASME*. 1981. V. 103, Iss. 2. P. 328. doi.org/10.1115/1.3241741
9. Fujii S., Gomi M., Eguchi K. Cold Flow Tests of a bluff-Body Flame Stabilizer // *Journal of Fluids Engineering*. 1978. V. 100. Iss. 3. P. 323-332. doi.org/10.1115/1.3448673
10. Won-Wook Kim, Jeffrey, J. Lienau, Paul R. Van Slooten, Meredith B. Colket III, Robert E. Malecki, Saadat Syed. Towards Modeling Lean Blow Out in Gas

Turbine Flameholder Applications // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2006. Vol. 128, iss. 1. P.40-48. doi: 10.1115/1.2032450.

### Информация об авторах

**Коломзаров Олег Владимирович**, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kolomzarov@gmail.com](mailto:kolomzarov@gmail.com). Область научных интересов: вычислительная газовая динамика, горение в турбулентных потоках.

**Анисимов Владислав Михайлович**, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет).

E-mail: [vradik@mail.ru](mailto:vradik@mail.ru). Область научных интересов: моделирование процессов горения в камере сгорания.

**Зубрилин Иван Александрович**, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [zubrilin416@mail.ru](mailto:zubrilin416@mail.ru). Область научных интересов: применение САЕ-технологий в расчетах процессов горения и турбулентных течений.

### THE EFFECT OF THE WAY OF SETTING BOUNDARY CONDITIONS ON THE RESULTS OF MODELING A FLOW AT THE FLAMEHOLDER OUTLET

© 2015 O. V. Kolomzarov, V. M. Anisimov, I. A. Zubrilin

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The influence of different algorithms of generating inlet turbulent fluctuations on the results of calculating the flow parameters downstream the flameholder is discussed in the paper. Large eddy simulation is used on a turbulence model with a subgrid Smagorinsky-Lilli model. Propane-air mixture with a temperature of 300 K in a square-section channel is investigated. A bluff body with a base of an equilateral triangle with the side length equal to 25 mm is placed inside the channel. The mass-averaged inlet velocity is 10 m/s. Several ways of setting inlet boundary conditions are considered. Two cases without turbulence at the inlet (uniform velocity distribution across the inlet section and pipe velocity profile) and two cases with artificially modeled turbulence (vortex method and spectral turbulence synthesizer) are analyzed. The values of flow intensity upstream the stabilizer, the distribution of flow velocity and kinetic energy in longitudinal and cross sections downstream the stabilizer have been obtained. The graphs of the velocity fluctuation power density spectrum are also presented.

*Large eddy simulation, vortex method, spectral synthesizer method, bluff body, flameholder.*

### References

1. Volkov K.N., Emelianov V.N. *Modelirovanie krupnykh vikhrey v raschetakh turbulentnykh techeniy* [Large-eddy simulation of turbulent flows in the calculations]. M.: Fizmatlit Publ., 2008. 364 p.
2. Tabor G.R., Baba-Ahmedi M.H. Inlet conditions for large eddy simulation: A review. *Computers and Fluids*. 2010. V. 39, Iss. 4. P. 553-567.
3. Kile B., Garwick K., Lunch A., Gord J.R. Non-reacting and combusting flow investigation of bluff bodies in cross flow. *Collection of Technical Papers - AI-AA/ASME/SAE/ASEE 42nd Joint Propulsion Conference*. 2006. V. 11. P. 8743-8753. doi.org/10.2514/6.2006-5234
- doi.org/10.1016/j.compfluid.2009.10.007

4. Yang G., Jin H., Bai N. A Numerical Study on Premixed Bluff Body Flame of Different Bluff Apex Angle. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. V. 2013. P. 132-140. doi.org/10.1155/2013/272567
5. Ryden R., Eriksson L.-E., Olovsson S. Large Eddy Simulation of Bluff Body Stabilized Turbulent Premixed Flame. *American Society of Mechanical Engineers (Paper)*. 1993. P.12. doi.org/10.1115/93-gt-157
6. Sjunesson A., Henriksson R., Lofstrom C. CARS measurements and visualization of reacting flows in bluff body stabilized flame. *AIAA/SAE/ASME/ASEE 28<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit*. 1992. V. 28. P. 48-56. doi.org/10.2514/6.1992-3650
7. Handout for the CES-Seminar Talk Vortex Methods Matthias Kirchhart 8th May 2013.
8. Fujii S., Eguchi K. A Comparison of Cold and Reacting Flow Around a Bluff-Body Flame Stabilizer. *Transaction of the ASME*. 1981. V. 103. Iss. 2. P. 328. doi.org/10.1115/1.3241741
9. Fujii S., Gomi M., Eguchi K. Cold Flow Tests of a bluff-Body Flame Stabilizer. *Journal of Fluids Engineering*. 1978. V. 100, Iss. 3. P. 323-332. doi.org/10.1115/1.3448673
10. Won-Wook Kim, Jeffrey, J. Lienau, Paul R. Van Slooten, Meredith B. Colket III, Robert E. Malecki, Saadat Syed. Towards Modeling Lean Blow Out in Gas Turbine Flameholder Applications. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2006. Vol. 128, iss. 1. P.40-48. doi: 10.1115/1.2032450

#### About the authors

**Kolomzarov Oleg Vladimirovich**, Master Student, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [kolomzarov@gmail.com](mailto:kolomzarov@gmail.com). Area of Research: computational fluid dynamics, combustion in turbulent flows.

**Anisimov Vladislav Mihaylovich**, Master Student, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [vradi@mail.ru](mailto:vradi@mail.ru). Area of Research:

modeling of combustion processes in a gas turbine engine combustion chamber

**Zubrilin Ivan Alexandrovich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [zubrilin416@mail.ru](mailto:zubrilin416@mail.ru). Area of Research: application of CAE -technologies for the calculation of combustion and turbulent flows.