

**СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОМАССООБМЕНА В Т-ОБРАЗНОМ СОЕДИНЕНИИ ДВУХ ТРУБ****АННОТАЦИЯ**

Проведено исследование эффективности различных подходов к моделированию турбулентности для расчета задачи о смешении воды различной температуры в Т-образном соединении двух труб. В работе представлены результаты решения нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS), замкнутых при помощи модели переноса сдвиговых напряжений (Shear Stress Transport или SST), усовершенствованного метода моделирования отсоединенных вихрей (Improved Delayed Detached Eddy Simulation или IDDES), и зонного IDDES подхода в сочетании с двумя методами создания турбулентных пульсаций – Методом Вихрей (МВ) и недавно предложенным методом Объемного Источника Турбулентности (ОИТ). Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что SST-URANS не обеспечивает удовлетворительной точности расчета, а наилучшее согласие с экспериментом обеспечивает зонный IDDES подход в сочетании с методом ОИТ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача о турбулентном смешении воды различной температуры в соединениях трубопроводов является чрезвычайно важной для атомной промышленности, поскольку напрямую связана с обеспечением безопасности эксплуатации ядерных реакторов. Это, прежде всего, обусловлено наличием низкочастотных флуктуаций температуры на поверхности трубы вблизи тройниковых соединений, приводящих к возникновению циклических термических нагрузок, результатом которых является развитие термической усталости конструкции или даже разрыв трубопровода. Следует отметить, что надлежащее предсказание нестационарного турбулентного перемешивания двух жидкостей различной температуры является весьма сложной задачей для вычислительной аэродинамики. Так, подходы, основанные на решении нестационарных уравнений Рейнольдса (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes или URANS), зачастую не обеспечивают приемлемую точность результатов, в особенности это касается пульсаций температуры на поверхности. С другой стороны, вихреразрешающие подходы, такие как метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation или LES), способны предсказать интересующие нестационарные характеристики потока, однако требуемые для их проведения вычислительные ресурсы зачастую оказываются за пределами возможностей современных компьютеров. Тем не менее, последние результаты, полученные с использованием вихреразрешающих подходов, достаточно убедительно показали принципиальную возможность расчета течений в соединениях трубопроводов на приемлемых с точки зрения вычислительных затрат сетках [1–4]. В частности, это стало возможным благодаря использованию гибридных RANS-LES подходов, таких как метод моделирования отсоединенных вихрей (Detached Eddy Simulation или DES) [5] и его модификации или метод адаптируемых масштабов (Scale Adaptive Simulation или SAS) [6]. Однако, для определения границ применимости подобных подходов требуются дополнительные исследования, проведение которых и составило основную цель настоящей работы.

В качестве конкретного течения выбрана задача о смешении воды различной температуры в Т-образном соединении двух труб [7], которая использовалась в качестве тестовой задачи на симпозиуме по безопасности ядерных реакторов, проведенном международным агентством по атомной энергии (OECD/NEA) в 2010 году [8,9].

Для учета влияния турбулентности в настоящей работе рассматривается три подхода – нестационарные уравнения Рейнольдса (URANS), замкнутые при помощи модели переноса сдвиговых напряжений (Shear Stress Transport или SST) [10], усовершенствованный метод моделирования отсоединенных вихрей (Improved Delayed Detached Eddy Simulation или IDDES) [11] и зонный IDDES подход в сочетании с двумя методами создания турбулентных пульсаций – Методом Вихрей (МВ) [12] и недавно предложенным методом Объемного Источника Турбулентности (ОИТ) [13].

2. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

В рассматриваемом в настоящей работе Т-образном соединении горизонтальной и вертикальной труб (Рис. 1) происходит смешение воды с перепадом температуры $\Delta T = T_{\text{верт}} - T_{\text{гор}} = 15^\circ$. Моделирование зависимости динамической вязкости воды от температуры основывается на данных, приведенных в [7], при этом соответствующее соотношение динамических вязкостей в горизонтальной и вертикальной трубах равно $\mu_{\text{гор}}/\mu_{\text{верт}} = 7/5$. Что касается значений плотности, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности, то их изменение в рассматриваемом диапазоне температур оказывается незначительным, и поэтому в настоящей работе все эти величины приняты постоянными во всей расчетной области.

Рассматриваемое течение характеризуется следующими безразмерными параметрами. Значение числа Прандтля для горизонтальной трубы составляет $Pr = \mu_{\text{гор}} \cdot C_p / \lambda = 7$, а для вертикальной – $Pr = \mu_{\text{верт}} \cdot C_p / \lambda = 5$. Числа Рейнольдса, построенные по диаметру трубы и среднерасходной скорости, равны $Re_{\text{гор}} = \rho \cdot U_{b,\text{гор}} \cdot D_{\text{гор}} / \mu_{\text{гор}} = 1.1 \cdot 10^5$ для горизонтальной и $Re_{\text{верт}} = \rho \cdot U_{b,\text{верт}} \cdot D_{\text{верт}} / \mu_{\text{верт}} = 0.8 \cdot 10^5$ для вертикальной труб соответственно. Соотношение диаметров горизонтальной и вертикальной труб составляет

$D_{гор}/D_{верт}=7/5$, а соотношение расходов в трубах равняется $Q_{гор}/Q_{верт}=2/3$.

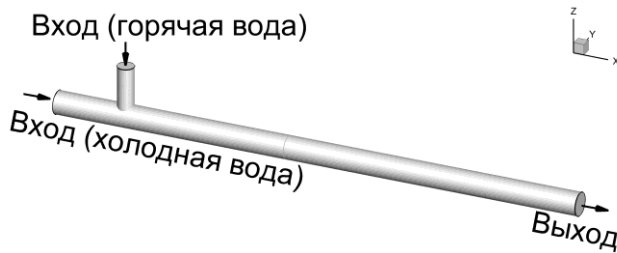


Рис. 1. Схематическое изображение расчетной области

Входная граница расчетной области (Рис. 1) располагается при $z/D_{верт}=3.1$ в вертикальной трубе и при $x/D_{гор}=-3.0$ в горизонтальной, а выходная – при $x/D_{гор}=20.0$. В горизонтальной трубе течение во входном сечении является полностью развитым, в то время как в вертикальной трубе толщина пограничного слоя равняется $\delta_{верт}=0.22 \cdot D_{верт}$.

Расчетная сетка состоит из $4.9 \cdot 10^6$ шестигранных ячеек. Шаг сетки в осевом направлении (Δx или Δz) равняется $\Delta x/D_{гор}=1/10$ ($\Delta x^+=7500$ в координатах закона стенки) для горизонтальной трубы и $\Delta z/\delta_{верт}=1/6$ ($\Delta z^+=7500$ в координатах закона стенки) для вертикальной. Шаг сетки в окружном направлении ($\Delta \varphi$) равняется $\Delta \varphi/D_{гор}=1/17$ ($\Delta \varphi^+=4500$ в координатах закона стенки) для горизонтальной трубы и $\Delta \varphi/\delta_{верт}=1/15$ ($\Delta \varphi^+=3000$ в координатах закона стенки) для вертикальной. По нормали к стенке трубы расчетная сетка строится со сгущением так, что вблизи стенок выполняется условие $\Delta y_w^+ < 1$, вдали от стенок шаг сетки равняется $\Delta x/\delta_{гор}=1/17$ для горизонтальной трубы и $\Delta z/\delta_{верт}=1/15$ для вертикальной, и при этом отношение соседних шагов сетки не превышает 1.15.

Граничные условия для данной задачи ставятся следующим образом. На входных границах задаются профили температуры, скорости и турбулентных характеристик, а давление экстраполируется из расчетной области. Данные профили получены из предварительных расчетов развивающегося течения в вертикальной трубе до экспериментального значения толщины пограничного слоя $\delta_{верт}$ и периодического течения в горизонтальной трубе с использованием SST-RANS подхода. На выходной границе задается равномерный профиль давления, а остальные переменные экстраполируются. На поверхности трубы используются условия прилипания и непроницаемости для компонент скорости, условие отсутствия теплового потока для температуры, а давление экстраполируется изнутри расчетной области.

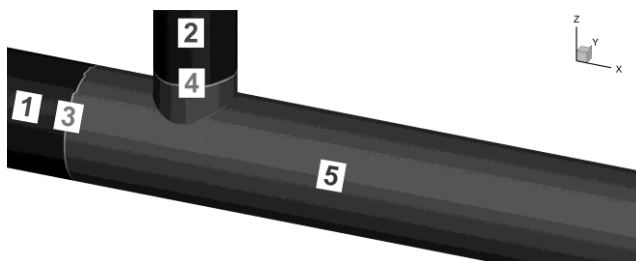


Рис. 2. Конфигурация расчетной области для IDDES подхода в сочетании с методами МВ и ОИТ

Задача решается в нестационарной постановке с шагом по времени $\Delta t=0.016 \cdot D_{верт}/U_{b,верт}$, обеспечивающим значение числа Куранта $CFL < 1$ во всей расчетной области.

При использовании зонного IDDES подхода в сочетании с методами МВ и ОИТ, область, в которой создаются турбулентные пульсации (области 3 и 4 на Рис. 2), имеет толщину в одну ячейку и располагается при $x/D_{гор}=-3$ в горизонтальной трубе и при $z/D_{верт}=1$ в вертикальной, при этом в областях 1 и 2 используется SST-URANS подход, а в области 5 – IDDES подход (Рис. 2).

3. ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА

Для решения определяющих уравнений в настоящей работе используется код общего назначения ANSYS-FLUENT [14–19]. Выбор данного кода обусловлен тем, что в настоящее время он является одним из наиболее популярных кодов общего назначения и широко используется большим количеством пользователей во всем мире для расчета самых разнообразных течений.

В данном коде дискретизация определяющих уравнений производится методом конечных объемов на неструктурированных сетках с хранением данных в центрах ячеек. Для решения дискретных уравнений используется неявный точечный метод Гаусса-Зейделя [14] в сочетании с алгебраическим многосеточным методом [14].

Аппроксимация конвективных слагаемых в исходных уравнениях осуществляется при помощи противопоточной схемы второго порядка [15,16] для SST-URANS подхода и с использованием центрально-разностной схемы второго порядка [17] для IDDES подхода. В случае использования зонного IDDES подхода в сочетании с методами МВ и ОИТ в областях 1-4 на Рис. 2 используется противопоточная схема второго порядка [15,16], а в области 5 – центрально-разностная схема второго порядка [17].

Остальные параметры используемого вычислительного алгоритма являются общими для всех рассматриваемых подходов. Для аппроксимации производных по времени применяется трехслойная схема Эйлера второго порядка [17], при этом для продвижения по времени используется безытерационный метод дробных шагов [20,21], позволяющий экстраполировать нелинейные слагаемые со вторым порядком точности. Для аппроксимации массовых потоков на гранях ячеек используется схема Рай-Чоу [22], позволяющая подавлять ложные четно-нечетные осцилляции давления. Для интерполяции давления на грань ячейки используется взвешенная сумма противопоточных схем первого и второго порядка [22]. Для расчета градиентов переменных – формула Гаусса-Грина записанная относительно центра ячейки [14–16].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На Рис. 3 представлено сравнение с данными эксперимента профилей средней скорости ($\langle u \rangle / U_b$ и $\langle w \rangle / U_b$) и нормальных напряжений Рейнольдса ($\langle u'u' \rangle / U_b^2$ и $\langle w'w' \rangle / U_b^2$) в нескольких вертикальных сечениях, а на Рис. 4 – распределения средней температуры ($T^*/\Delta T$, $T^* = \langle T \rangle - T_{гор}$) и среднеквадратичного отклонения температуры ($T'/\Delta T$) на боковой поверхности

сти трубы. Отметим, что все представленные на графиках величины являются осредненными по 40000 шагам по времени (приблизительно 3 времени проноса через область), и практически не зависят от времени осреднения.

В первую очередь следует отметить, что даже при использовании нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS), замкнутых при помощи модели SST, полученное решение является стационарным и поэтому пульсационные составляющие скорости и температуры равны нулю. Кроме того, SST-URANS подход не способен правильно предсказать средние характеристики. Так, значение вертикальной ($\langle w \rangle / U_b$) и горизонтальной ($\langle u \rangle / U_b$) компонент средней скорости, а также распределение средней температуры ($T^* / \Delta T$) на поверхности трубы оказываются существенно заниженными.

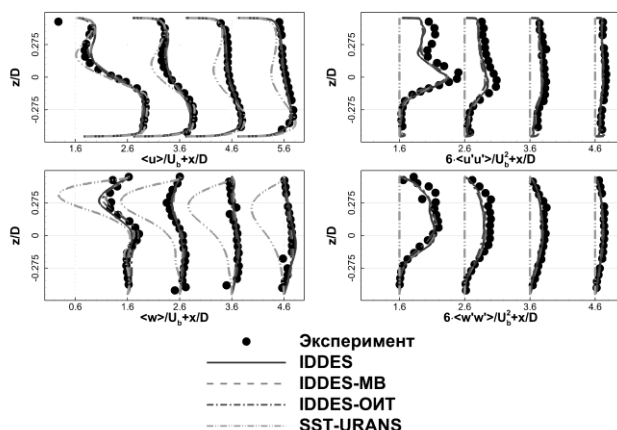


Рис. 3. Профили средней скорости и напряжений Рейнольдса в сечениях $x/D_{\text{верт}} = 1.6, 2.6, 3.6, 4.6$

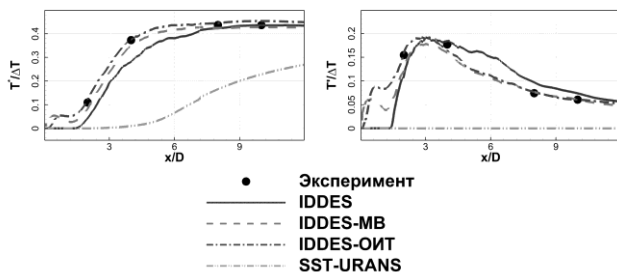


Рис. 4. Распределение средней температуры и ее среднеквадратичного отклонения на боковой стенке трубы

Что касается вихреразрешающих подходов, то полученные с их помощью профили средней скорости и напряжений Рейнольдса (Рис. 3) хорошо согласуются с данными эксперимента, как в случае использования IDDES подхода во всей расчетной области, так и в случае его зонного использования в сочетании с методами MB и ОИТ. Однако при этом в случае использования IDDES подхода во всей области распределение средней температуры ($T^* / \Delta T$) и ее среднеквадратичного отклонения ($T' / \Delta T$) оказываются несколько заниженными вблизи соединения двух труб (Рис. 4).

Причины такого различия лежат в деталях турбулизации (появления разрешенных турбулентных структур) слоя смешения в окрестности соединения труб. Визуализация турбулентных структур при помощи полей модуля завихренности ($|\Omega|$) в плоскости

симметрии и изоповерхностей Q-критерия (Рис. 5) свидетельствует о том, что для IDDES подхода переход к турбулентности в слое смешения оказывается затянутым (приблизительно 2 диаметра вертикальной трубы). В случае использования зонного IDDES подхода турбулентные пульсации, созданные при помощи MB и ОИТ, ускоряют появление разрешенной турбулентности в слое смешения, что приводит к заметному улучшению согласия расчетных распределений средней температуры и ее среднеквадратичного отклонения с экспериментальными данными (Рис. 4). Этот результат, в частности, свидетельствует о важности создания турбулентных пульсаций на входных границах при использовании вихреразрешающих подходов. Именно поэтому зонные подходы, обеспечивающие создание таких пульсаций, имеют преимущество при решении целого ряда задач, в частности, задачи о течении в Т-образном соединении труб.

Следует также отметить, что результаты, полученные с использованием зонного IDDES подхода, незначительно зависят от метода создания турбулентных пульсаций, однако, несколько лучшее согласие с экспериментальными данными (в особенности вблизи Т-образного соединения) получено с использованием метода ОИТ. Это, по всей видимости, связано с тем, что искусственные турбулентные пульсации, созданные методом ОИТ, оказываются ближе к пульсациям, наблюдаемым в реальном турбулентном течении.

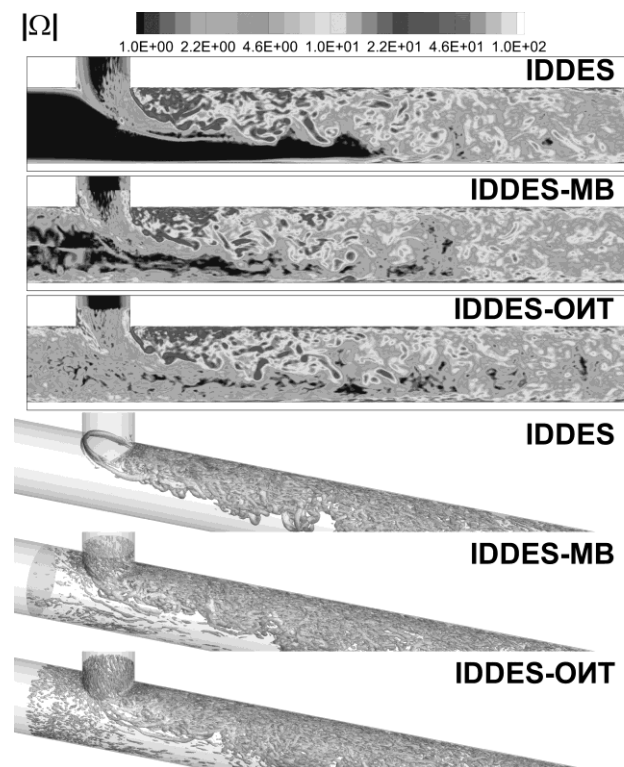


Рис. 5. Визуализация турбулентных структур при помощи полей модуля завихренности ($|\Omega|$) в плоскости симметрии и изоповерхностей Q-критерия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование различных подходов к моделированию турбулентности для расчета задачи о смешении воды различной температуры в Т-образном соединении двух труб.

Как следует из полученных результатов, SST-URANS подход не обеспечивает удовлетворительной точности расчета данного течения и предсказывает стационарное течение. Результаты IDDES подхода гораздо лучше согласуются с экспериментальными данными, однако для точного предсказания тепловых нагрузок в окрестности соединения необходимо обеспечить наличие турбулентных пульсаций вверх по потоку от соединения труб, и оба рассмотренных метода (МВ и ОИТ) хорошо подходят для решения этой задачи.

Данная работа выполнена при поддержке ANSYS Inc. и РФФИ (грант № 12-08-00256-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frank T. et al. Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX // *Nuclear Engineering and Design*. 2010. Vol. 240, № 9. P. 2313–2328.
2. Курносов М.М., Королев В.В., Стребнев Н.А. Разработка оптимальной методики расчета локальных теплогидравлических параметров в тройниковых соединениях трубопроводов на основе экспериментальных данных // *Материалы конференции “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”*. 2011. P. 1–18.
3. Курносов М.М., Королев В.В., Стребнев Н.А. Участие ОКБ “Гидропресс” в международной задаче по верификации CFD-кодов на экспериментальных результатах, полученных на модели тройникового соединения трубопроводов // *Материалы конференции “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”*. 2011. P. 1–20.
4. Gritskevich M. et al. Investigation of the Thermal Mixing in a T-Junction Flow with Different SRS Approaches // *Proceedings of CFD4NRS-4 The Experimental Validation and Application of CFD and CMFD Codes in Nuclear Reactor Technology*. 2012. P. 1–11.
5. Spalart P.R. et al. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach // *Proceedings of first AFOSR international conference on DND/LES*. 1997. P. 1–11.
6. Menter F.R., Egorov Y. The Scale-Adaptive Simulation Method for Unsteady Turbulent Flow Predictions. Part 1: Theory and Model Description // *Flow Turbulence and Combustion*. 2010. Vol. 85, № 1. P. 113–138.
7. Odemark Y. et al. High-Cycle Thermal Fatigue in Mixing Tees: New Large-Eddy Simulations Validated Against New Data Obtained by PIV in the Vattenfall Experiment // *Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering*. 2009.
8. B. L. Smith et al. Report of the OECD/NEA-Vattenfall T-Junction Benchmark Exercise // *Report No. NEA/CSNI/R(2011)-5*. 2011. P. 1–92.
9. Mahaffy J. Synthesis of Results for the T-Junction Benchmark // *Proceedings of CFD4NRS-3 Conference on Experimental Validation of CFD and CMFD Codes to Nuclear Reactor Safety Issues*. Washington, DC, USA, 2010. P. 3.
10. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model // *Proceedings of 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*. Antalya, 2003. P. 625–632.
11. Gritskevich M.S. et al. Development of DDES and IDDES Formulations for the $k-\omega$ Shear Stress Transport Model // *Flow Turbulence and Combustion*. 2012. Vol. 88, № 3. P. 431–449.
12. Mathey F. Aerodynamic noise simulation of the flow past an airfoil trailing-edge using a hybrid zonal RANS-LES // *Computers & Fluids*. 2008. Vol. 37. P. 836–843.
13. Грицкевич М.С., Гарбарук А.В. Встроенный метод крупных вихрей с использованием объемного источника турбулентных пульсаций // *Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия Физико-математические науки*. 2012. Vol. 1(141). P. 27–36.
14. Murthy J.Y. et al. Survey of Numerical Methods // *Handbook of Numerical Heat Transfer*. 2nd Edition / ed. W. J. Minkowycz, Sparrow E.M., Murthy J.Y. 2006. P. 1–984.
15. Mathur S.R., Murthy J.Y. A pressure-based method for unstructured meshes // *Numerical Heat Transfer*. 1997. Vol. 32. P. 195–215.
16. Kim S.E. et al. A Reynolds averaged Navier-Stokes solver using unstructured mesh-based finite-volume scheme // *AIAA Paper*. 1998. Vol. 98–0231.
17. Kim S.E. Large eddy simulation using an unstructured mesh based finite-volume solver // *AIAA Paper*. 2004. Vol. 2004–2548.
18. Kim S.E., Makarov B., Caraeni D. A multidimensional linear reconstruction scheme for arbitrary unstructured grids // *AIAA Paper*. 2003. Vol. 2003–3990.
19. Kim S.E. Unstructured Mesh Based Reynolds Stress Transport Modeling of Complex Turbulent Shear Flows // *AIAA Paper*. 2001. Vol. 2001–0728.
20. Armsfield S., Street R. The Fractional-Step Method for the Navier-Stokes Equations on Staggered Grids: Accuracy of Three Variations // *Journal of Computational Physics*. 1999. Vol. 153. P. 660–665.
21. Dukowicz J.K., Dvinsky A.S. Approximate Factorization as a High-Order Splitting for the Implicit Incompressible Flow Equations // *Journal of Computational Physics*. 1992. Vol. 102. P. 336–347.
22. Rhie C.M., Chow W.L. Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation // *AIAA Journal*. 1983. Vol. 21, № 11. P. 1525–1532.

SUMMARY

M.S. Gritskevich¹, A.V. Garbaruk¹

¹ Saint Petersburg State Politechnical University
Russia, Saint Petersburg, 195251, Politechnicheskaya, 29

COMPARISON OF DIFFERENT TURBULENCE APPROACHES FOR PREDICTION OF THERMAL MIXING IN THE T-JUNCTION FLOW

A detailed comparison of several turbulence modeling approaches for prediction of thermal mixing in the T-Junction flow has been carried out. The results for Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes (URANS) equation closed with the Shear Stress Transport (SST) model, Improved Delayed Detached Eddy Simulation (IDDES), and zonal IDDES approach in combination with two methods for turbulent content generation namely Vortex Method (VM) and recently proposed method of Volume Source of Turbulence (VST) are presented. It is shown that the SST-URANS approach is unable to predict properties of the considered flow with sufficient accuracy and the best agreement with experimental data is obtained with the zonal IDDES approach in combination with VST method.