

*М.С. Грицкевич, А.В. Гарбарук*

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет  
Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДВУСТАДИЙНОГО RANS/LES ПОДХОДА ДЛЯ РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЙ С ОТРЫВНОЙ ЗОНОЙ УМЕРЕННОГО РАЗМЕРА**

### **АННОТАЦИЯ**

В настоящей работе рассматривается применение двустадийного RANS/LES подхода на примере обтекания подводного крыла с умеренной по размерам отрывной зоны. Показано, что данное течение неудовлетворительно описывается как в рамках RANS подхода (с использованием SST модели), так и в рамках гибридных подходов (с использованием SST DDES и SST IDDES подходов). Использование же двустадийного RANS/LES подхода позволяет с высокой степенью точности предсказать основные характеристики течения, при этом данный подход требует значительно меньших вычислительных ресурсов по сравнению с методом моделирования крупных вихрей.

### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

Турбулентность, двустадийный RANS/LES подход, гибридные подходы, генератор синтетической турбулентности

### **ВВЕДЕНИЕ**

При выборе метода расчета отрывных течений существенную роль играет соотношение толщины пограничного слоя перед отрывом и характерный размер самого отрыва. Так, для моделирования течений со слабым отрывом (отрывная зона существенно тоньше пограничного слоя), хорошо зарекомендовали себя подходы, основанные на решении уравнений Рейнольдса (Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS) и замкнутых при помощи той или иной полуэмпирической модели турбулентности [1]. Для течений с массивным отрывом успешно применяются гибридные подходы, такие как метод моделирования отсоединенных вихрей (Detached Eddy Simulation, DES) [2] и его последние модификации DDES (Delayed Detached Eddy Simulation) [3] и IDDES (Improved Delayed Detached Eddy Simulation) [4]. Однако в случае отрывной зоны умеренного размера все вышеперечисленные подходы сталкиваются с определенными трудностями.

Одним из способов расчета течений с умеренным отрывом при незначительном увеличении вычислительных затрат является применение двустадийного RANS/LES под-

хода с использованием генератора синтетической турбулентности для задания входных граничных условий в LES область. В настоящей работе показано преимущество данного подхода на примере обтекания подводного крыла с отрывом вблизи задней кромки.

## **ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД**

Для решения задачи использовался код общего назначения ANSYS Fluent 13 [5].

В случае использования RANS подхода определяющие уравнения (уравнения Рейнольдса) решались в стационарной постановке и замыкались при помощи модели переноса сдвиговых напряжений (Shear Stress Transport, SST) [6]. Конвективные члены интерполировались на грань при помощи противопоточной схемы второго порядка [5], а давление - при помощи гибридной схемы, сшивающей противопоточные схемы первого и второго порядка с коэффициентом из поправки Рай-Чоу [7]. Аппроксимация градиентов в определяющих уравнениях производилась при помощи теоремы Гаусса-Грина записанной относительно центров граней. Полученные в результате аппроксимаций дискретные уравнения решались совместно [5] точечным методом Гаусса-Зейделя с поправкой Рай-Чоу для конвективных потоков [7], целью которой является подавление осцилляций давления, при этом для ускорения сходимости итераций используется алгебраический многосеточный метод.

В случае использования гибридных подходов, решение задачи производилось в нестационарной постановке, при этом использовались две современные модификации метода моделирования отсоединённых вихрей (DES) [2]–DDES [3] и IDDES [4]. Конвективные члены интерполировались на грань при помощи центрально-разностной схемы второго порядка [5], а давление и градиенты – также как и в случае RANS. Производные по времени аппроксимировались при помощи трехслойной схемы Эйлера второго порядка. Для решения полученных в результате аппроксимаций дискретных уравнений на каждом шаге по времени использовался безитерационный метод продвижения по времени (NITA) [5,8,9], позволяющий производить интегрирование определяющих уравнений по времени без привлечения дополнительных итераций. Решение полученных в результате аппроксимации дискретных уравнений производилось также как и для RANS подхода.

Все вышеперечисленные гибридные подходы основаны на использовании единой модели турбулентности во всей расчетной области, которая вблизи стенки (RANS область) работает как полуэмпирическая модель турбулентности для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, а вдали от стенки (LES область), в об-

ласти свободного течения, эта модель работает в качестве модели подсеточных напряжений. В оригинальной версии метода DES [2] для достижения этой цели используется модификация модели турбулентности, основанная на замене линейного масштаба, который учитывается в модели переноса сдвиговых напряжений [6] путем модификации диссипативного члена в уравнении переноса кинетической энергии турбулентности.

Одной из проблем, возникающих при применении метода DES в оригинальной форме, является значительное падение модельных напряжений в случае, когда переключение в LES режим происходит внутри пограничного слоя. Такое падение трения может привести к существенным ошибкам в описании течения, вплоть до преждевременного отрыва пограничного слоя при измельчении сетки. Метод DDES отличается от оригинальной версии метода DES введением дополнительной защитной функции, целью которой является недопущение переключения модели в LES режим в присоединенном пограничном слое [3].

Методы DES и DDES предполагают использование RANS ветви единой модели турбулентности в присоединенном пограничном слое. В то же время, использование этих методов для LES расчета с пристеночным моделированием (Wall Modeling LES, WMLES), хотя и возможно, но приводит к существенным ошибкам. Так, для течения в плоском канале при больших числах Рейнольдса, профиль средней скорости имеет два логарифмических участка, с правильным наклоном, но смещенных относительно друг друга (так называемый “log-layer mismatch”). Метод IDDES совмещает DDES и гибридную RANS-LES модель, предназначенную для WMLES: в случае отсутствия разрешенных турбулентных пульсаций активна DDES ветвь модели, а при их наличии используется WMLES ветвь модели.

## **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

В настоящей работе рассматривается обтекание подводного крыла, экспериментально исследованное в работе Блэйка [10]. Это течение было численно исследовано с использованием метода моделирования крупных вихрей Вэнгом и Мойном [11,12]. Рассматриваемая задача характеризуется наличием отрывной зоны умеренного размера вблизи задней кромки, при этом точка отрыва не является фиксированной. Число Рейнольдса, построенное по скорости набегающего потока  $u_\infty$  и длине хорды  $C$ , равно  $2.2 \cdot 10^6$ , что соответствует числу Рейнольдса построенному по толщине крыла  $H$  равному  $1.01 \cdot 10^5$ .

Расчетная область для данной задачи представлена на рис. 1-а и состояла из двух частей, условно названных здесь «1» и «2». Границы расчетной области «1» по оси  $x$  находились в пределах от  $x/H=-60$  до  $x/H=20$ , а по оси  $y$  – от  $y/H=-40$  до  $y/H=40$ , при этом начало координат находилось на задней кромке подводного крыла. Область «2» начиналась в  $x/H=-4$  на верхней поверхности крыла и в  $x/H=-1$  на нижней. Следует отметить, что границы «2» области выбирались таким образом, чтобы весь отрыв лежал внутри этой области.

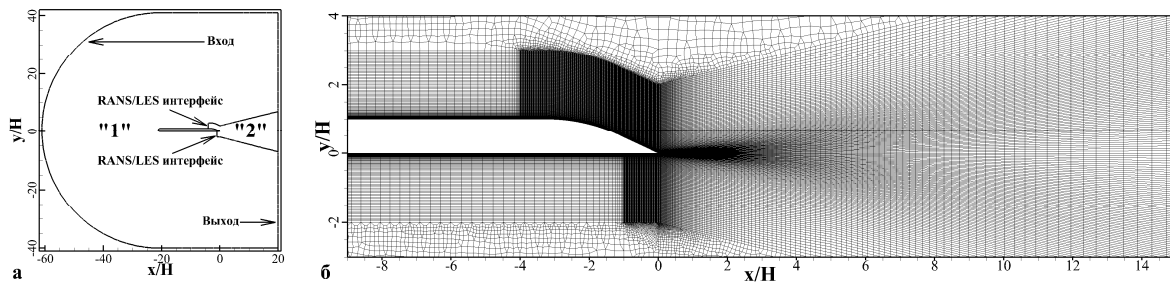


Рис. 1. Расчетная область и фрагмент расчетной сетки для задачи об обтекании подводного крыла

Фрагмент расчетной сетки вблизи задней кромки крыла представлен на рис. 1-б. Вблизи поверхности крыла сетка строилась со сгущением по нормали к стенке так, чтобы обеспечить значения  $\Delta y_w^+ < 1$  на всей поверхности крыла. В области «1» сетка строилась таким образом, чтобы максимальный шаг сетки был бы больше толщины пограничного слоя во всей области «1», чтобы обеспечить работу всех используемых гибридных подходов в RANS режиме в этой области. Для сокращения размеров расчетной сетки и предотвращения возникновения слишком вытянутых ячеек на удалении более чем  $2H$  от крыла расчетная сетка являлась смешанного типа, т.е. состоящей из призм и параллелепипедов. В поперечном направлении расчетная сетка в области «1» имела 5 ячеек, а размер сетки составлял  $2.0 \cdot 10^5$  ячеек.

В области «2» расчетная сетка имела одинаковый постоянный шаг в направлении течения и в поперечном направлении, который равнялся  $0.01H$  и составлял примерно 5% от толщины пограничного слоя. Такая сетка является достаточной для проведения WMLES расчетов [4]. В поперечном направлении в области «2» расчетная сетка имела 50 ячеек, а размер сетки составлял  $3.6 \cdot 10^6$  ячеек. Безразмерный шаг по времени для данной задачи равнялся  $\Delta t=0.005$ , что соответствовало числу Куранта меньше единицы во всей расчетной области.

При решении задачи использовались следующие граничные условия на свободных границах. На входной границе в расчетную область задавались компоненты скорости и

турбулентные характеристики, а давление экстраполировалось изнутри расчетной области. На выходной границе задавалось давление, а все остальные переменные экстраполировались из расчетной области. Для задания граничных условий на поверхности крыла использовались автоматические пристенные функции [6]. В поперечном направлении задавалось условие периодичности. В случае одностадийных расчетов RANS/LES интерфейс, изображенный на рис. 1-а отсутствовал и вся граница между областями «1» и «2» трактовалась как внутренняя область.

В случае использования двухстадийного RANS/LES подхода на первой стадии (RANS) проводилось решение стационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых при помощи модели SST. На второй стадии (LES) RANS/LES интерфейс рассматривался как граница и на нем использовались следующие граничные условия. Для области «1» интерфейс является выходной границей, и поэтому на нем задавалось давление из RANS решения на первой стадии, а остальные переменные экстраполировались изнутри области «1». Для области «2» интерфейс является входной границей, и поэтому на нем необходимо задать компоненты скорости и турбулентные характеристики, а давление экстраполировать изнутри области «2». Для получения нестационарных компонент скорости был использован генератор синтетической турбулентности, предложенный в работе Адамьяна и Травина [13], при этом входные данные для него брались из RANS решения на первой стадии. Значение удельной частоте диссипации турбулентности брались из RANS решения, а кинетическая энергия турбулентности вычислялась в соответствии со следующей формулой.

$$k = \min(k_{RANS}, \omega_{RANS} \cdot v_t)$$

$$v_t = (C_{Smag} \cdot \min(C_w \cdot \max(d_w, h_{max}), h_{max}))^2 \cdot S$$

Здесь  $k_{RANS}$  и  $\omega_{RANS}$  – значения кинетической энергии турбулентности и удельной частоте диссипации турбулентности соответственно,  $v_{t,Smag}$  – турбулентная вязкость вычисленная при помощи модели Смагоринского с масштабом длины взятым из SST IDDES,  $d_w$  – расстояние до стенки,  $h_{max}$  – максимальный размер ребра ячейки и  $S$  – модуль тензора скоростей деформаций. Константы данной модели являются  $C_{Smag}=0.2$  и  $C_w=0.15$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 2 представлены результаты расчетов, полученные по всем используемым в настоящей работе подходам – одностадийные SST RANS, SST DDES и SST IDDES

подходы и двустадийный RANS/LES подход с использованием SST IDDES в качестве WMLES модели (далее двустадийный RANS/LES подход).

Для всех одностадийных подходов наблюдается плохое соответствие результатов, как с экспериментальными данными, так и с результатами данными LES. Видно, что распределения коэффициента трения (рис. 2-а) и коэффициента давления (рис. 2-б) на поверхности подводного крыла, а также профили скорости (рис. 2-в) и нормальных напряжений (рис. 2-г) неудовлетворительно предсказываются в рамках данных подходов. Использование гибридных подходов не приводит к улучшению решения по сравнению с RANS подходом, при этом в некоторых случаях наблюдается даже худшее совпадение с данными. Все одностадийные подходы имеют тенденцию предсказания более раннего отрыва, а также значительной недооценки нормальных напряжений во всех рассматриваемых сечениях. Наибольшие различия в профиле скорости наблюдаются в сечениях вблизи отрыва ( $x/H=-0.625$  и  $x/H=0$ ), где размер отрывной области заметно завышен, а также в следе за подводным крылом, где плохо предсказывается как толщина следа, так и его положение.

Значительное улучшение результатов происходит в случае использования двустадийного RANS/LES подхода. Так, положение точки отрыва практически полностью совпадает с результатами LES расчета, а коэффициент давления лучше согласуется с экспериментальными данными. Для профилей скорости наблюдается практически полное совпадение с результатами LES как на поверхности подводного крыла, так и в следе за ним, а профили нормальных напряжений незначительно отличаются от результатов LES.

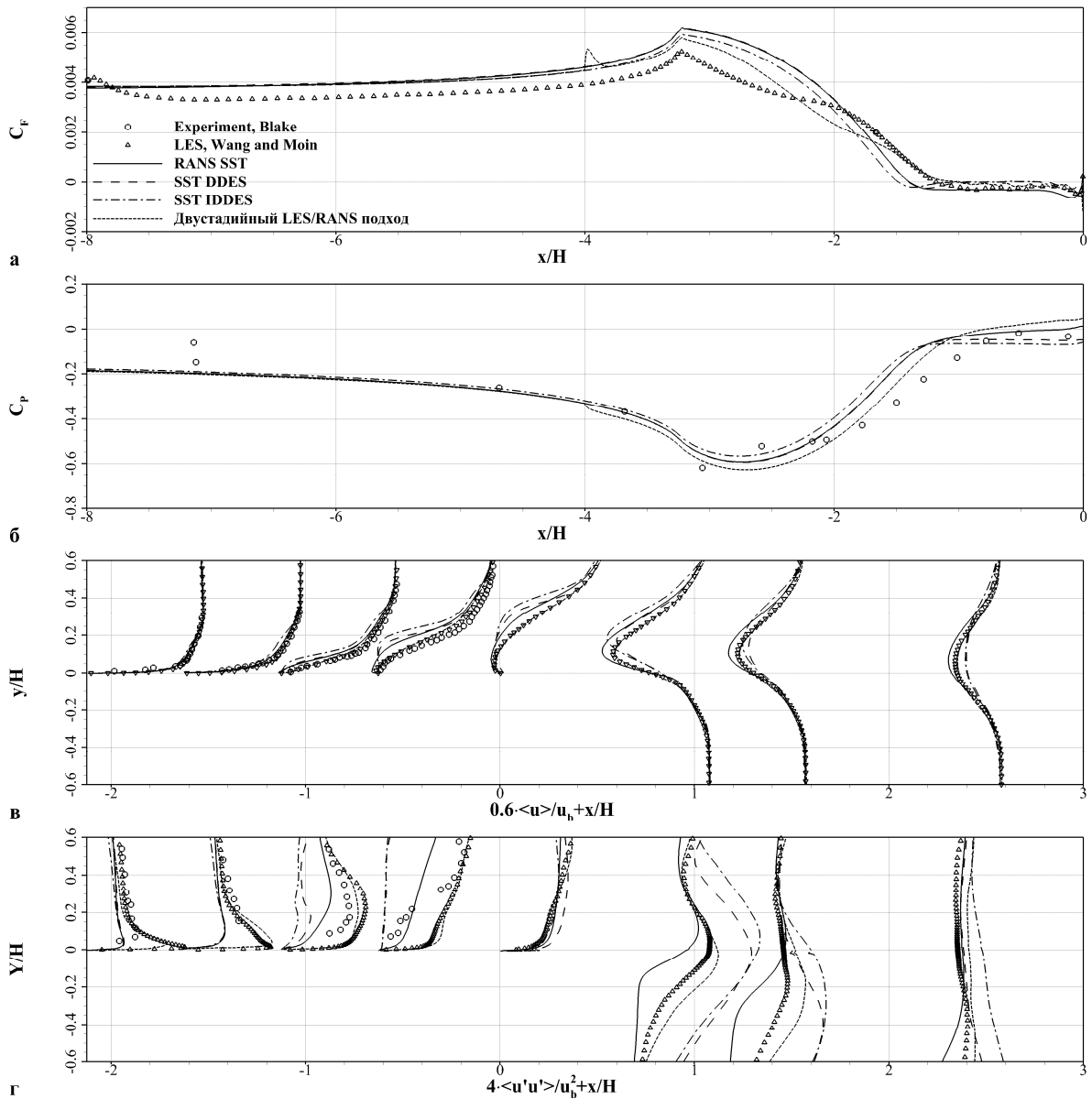


Рис. 2. Распределение коэффициента трения (а), коэффициента давления (б) на поверхности подводного крыла и профили скорости (в) и нормальных напряжений (г) в сечениях с  $x/H = -2.125, -1.625, -1.125, -0.625, 0.0, 0.5, 1.0$  и  $2.0$

Для того чтобы проиллюстрировать причину столь существенного превосходство двустадийного RANS/LES подхода над SST IDDES на рис. 3 приведены мгновенные поля завихренности  $|\Omega| = \sqrt{0.5(\partial u_i / \partial x_j - \partial u_j / \partial x_i)^2}$ . Видно, что при одностадийном подходе слой смешения остается практически стационарным до задней кромки крыла (см. рис. 3-а), в результате чего в значительной части зоны отрыва SST IDDES работает в RANS режиме. В случае же двустадийного расчета пограничный слой перед отрывом и слой смешения являются трехмерными и нестационарными (см. рис. 3-б), в результате чего SST IDDES функционирует в режиме WMLES во всей зоне отрыва. Именно это

обстоятельство обеспечивает преимущество двустадийного подхода при расчете течений с умеренной зоной отрыва.

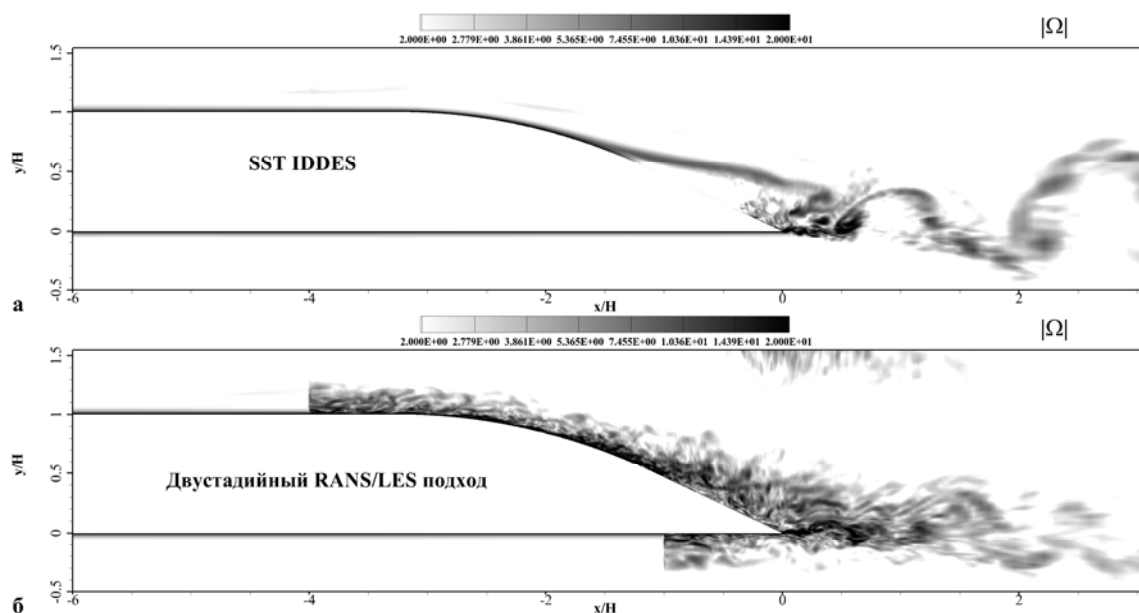


Рис. 3. Контуры завихренности для SST IDDES и двустадийного RANS/LES подхода

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на примере подводного крыла с отрывом умеренного размера вблизи задней кромки показано, что применение одностадийных RANS и гибридных подходов для описания характеристик течения приводит к неудовлетворительным результатам. В случае же применения двустадийного RANS/LES подхода наблюдается значительное улучшение согласия результатов расчета с экспериментальными данными и результатами LES расчета, при этом требования к расчетным сеткам, и, следовательно, к вычислительным ресурсам, для данного подхода значительно меньше, чем для метода моделирования крупных вихрей. Таким образом, данный подход является удобным и экономичным инструментом для расчета течений с умеренным по размерам отрывом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] D.M. Driver, "Reynolds shear stress measurements in a separated boundary layer flow," *AIAA-91-1787*, 1991.
- [2] P.R. Spalart, W.H. Jou, M. Strelets, and S.R. Allmaras, "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.



- [3] P.R. Spalart, S. Deck, M.L. Shur, K.D. Squires, M.K. Strelets, and A. Travin, "A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities," *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 2006, pp. 181-195.
- [4] M.L. Shur, P.R. Spalart, M.K. Strelets, and A.K. Travin, "A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 29, 2008, pp. 1638-1649.
- [5] "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide," 2009.
- [6] F.R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry, "Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model," *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, vol. 4, 2003, pp. 625-632.
- [7] C.M. Rhie and W.L. Chow, "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation," *AIAA Journal*, vol. 21, 1983, p. 1525-1532.
- [8] J.P. Vandoormaal and G.D. Raithby, "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows," *Numer. Heat Transfer*, vol. 7, 1984, p. 147-163.
- [9] J.K. Dukowicz and A.S. Dvinsky, "Approximate Factorization as a High-Order Splitting for the Implicit Incompressible Flow Equations," *Journal of Computational Physics*, vol. 102, 1992, p. 336-347.
- [10] W.K. Blake, "A statistical description of pressure and velocity fields the trailing edge of a flat strut," *David Taylor Naval Ship R & D Center Report 4241, Bethesda*, 1975.
- [11] M. Wang and P. Moin, "Dynamic wall modeling for large-eddy simulation of complex turbulent flows," *Physics of Fluids*, vol. 14, 2002, pp. 2043-2051.
- [12] M. Wang and P. Moin, "Computation of Trailing-Edge Flow and Noise Using Large-Eddy Simulation No Title," *AIAA Journal*, vol. 38, 2000, pp. 2201-2209.
- [13] D. Adamian and A. Travin, "An Efficient Generator of Synthetic Turbulence at RANS-LES Interface in Embedded LES of Wall-Bounded and Free Shear Flows," *ICCFD6*, 2010.

*M.S. Gritskevich, A.V. Garbaruk*

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

## **APPLICATION OF TWO-STAGE RANS/LES APPROACH FOR PREDICTION OF THE AERODYNAMICS OF A FLOW WITH MODERATE SEPARATION ZONE**

### **ABSTRACT**

An application of the two-stage RANS/LES approach to the hydrofoil with trailing edge separation flow is considered. It was shown, that the flow is unsatisfactorily predicted with

the use of RANS (SST) and scale resolving (DDES, IDDES) single-stage approaches. In contrast, the two-stage RANS/LES approach shows good agreement with the experimental and LES data. Moreover, one more advantage of such approach is that it consumes less computational resources comparing to the LES approach.

**KEY WORDS**

Turbulence, hydrofoil with trailing edge separation, scale resolving simulation (SRS), inflow synthetic turbulence generator, two-stage RANS/LES approach