



ПМ Лазурит в 2025 году.

Жигалкин А.С., Любимов Д.А.



Характеристики кода

Название кода:

ПМ Лазурит

Что моделируется (классы течений): *сжимаемые течения: дозвук – сверхзвук, аэроакустика*

Моделирование турбулентных течений: *RANS, URANS, RANS/ILES*

Сетки и сеточные технологии:

*структурированные многоблочные криволинейные сетки,
импорт сеток и граничных условий из CFD-GEOM, ручное
построение сеток и задание граничных условий*

Численные методы:

*Конечно-объемные
Переменные: физические
Порядок аппроксимации по пространству 1-9 для
предраспадных параметров в схеме Рой*

Интегрирование по времени:

неявная схема (dual time stepping)

Ускорение вычислений:

OpenMP-MPI

Язык программирования:

FORTRAN

Где что заявлено

- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020615925 Российской федерация. «Программный модуль компьютерного моделирования на основе уравнений RANS/ILES» («Лазурит RANS-ILES»): опубликовано 04.07.2020 / Д.А. Любимов, Л.А. Бендерский; правообладатель ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова».
 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № № 2023666963 Российской федерация. «Программный модуль компьютерного моделирования физических процессов в авиационных силовых установках» («Лазурит»): опубликовано 08.08.2023 / Любимов Д.А., Бендерский Л.А.; правообладатель ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова».
 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025681475 Российской федерация. «Лазурит 25»: дата регистрации 14.08.2025 / Д.А. Любимов, Л.А. Бендерский, Р.Ш. Аюпов, А.С. Жигалкин; правообладатель ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова».
-
- Комбинированные вихреразрешающие подходы, описанные в статьях [1] и [2] соответственно. Различаются способом переключения RANS/ILES. В ПМ Lazurit RANS/ILES переключение, аналогично DES: по размеру текущей ячейки и ее расстоянию до стенки. В ПМ Lazurit RANS/LES(i) не только по размеру ячейки, но и по параметрам течения в ней, подобно тому, как это сделано в IDDES.
 - Версия RANS/ILES(i) с пониженной схемной диффузией при дозвуковых числах Маха описана в статье [3].
 - В области RANS у стенок для замыкания используется модель SA. Для аппроксимации конвективных членов в уравнениях Н-С доступны сохраняющие монотонность схемы MP5 и MP9, в скалярных уравнениях используется WENO5.

1. Любимов, Д. А. Разработка и применение метода высокого разрешения для расчета струйных течений методом крупных вихрей / Д. А. Любимов // ТВТ. – 2012. – Т. 50, вып. 3. – С. 450–466.
2. Любимов, Д. А. Исследование RANS/ILES-методом течения в высокоскоростном воздухозаборнике смешанного сжатия на различных режимах работы / Д. А. Любимов, А. О. Честных // ТВТ. – 2018. – Т. 56, вып. 5. – С. 729–737.
3. А. С. Жигалкин, Д. А. Любимов. Улучшение разрешения RANS/ILES(i) методом турбулентных вихревых структур при дозвуковых числах Маха // ТВТ, 2025. Т. 63. №1, с. 57-67.

Моделирование RANS/ILES(i) методом погранслоя на плоской пластине без градиента давления при различных числах Маха

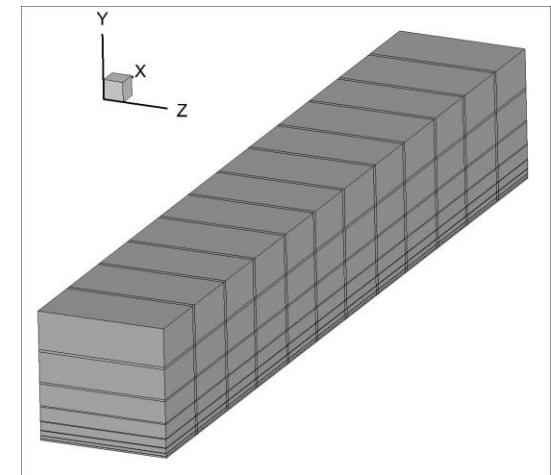
Цели работы

- Основная цель: оценка точности расчетов RANS/ILES(i) методом [1, 2] пограничного слоя на грубых сетках. Для этого проведены расчеты погранслоя на пластине при относительно больших величинах пристеночного шага расчетной сетки при числах Маха в свободном потоке $M_\infty = 2$ и $M_\infty = 0.5$.
- Оценка точности предсказания с помощью RANS/ILES(i) метода [1, 2] уровня трения на пластине, а также распределений осредненных и пульсационных параметров течения поперек пограничного слоя (ПС).
- Точность расчета оценивается сравнением с “эталонными” результатами, в качестве которых используются данные работы [3], которой где проведено моделирование методом DNS ПС на плоской пластине с нулевым градиентом давления в широком диапазоне чисел Маха свободного потока M_∞ (от 0.3 до 2.5) и широком диапазоне чисел Рейнольдса.
- Определение длины **переходной зоны** с пониженным уровнем трения, возникающей около входа в расчетную область при задании на входе **синтетическую турбулентности**.

1. Любимов, Д. А. Исследование RANS/ILES-методом течения в высокоскоростном воздухозаборнике смешанного сжатия на различных режимах работы / Д. А. Любимов, А. О. Честных // ТВТ. – 2018. – Т. 56, вып. 5. – С. 729–737.
2. Д. А.. Улучшение разрешения RANS/ILES(i) методом турбулентных вихревых структур при дозвуковых числах маха/ А. С. Жигалкин, Д. А. Любимов // ТВТ. - 2025. - Т. 63, № 1, - С. 57-67.
3. DNS of compressible turbulent boundary layers and assessment of data-/scaling-law quality / C. Wenzel, B. Selent, M. Kloker, U. Rist // J. Fluid Mech. – 2018.

Постановка задачи и граничные условия (1)

- Моделирование развивающегося турбулентного ПС на плоской пластине осуществляется на **прямоугольной расчетной сетке** в области, имеющей форму **прямоугольного параллелепипеда**.
- Расчеты проведены для $M_\infty=0.5$ и $M_\infty=2$. Температура и плотность в набегающем потоке задавались такими же, как в работе [1]: $T_\infty=288.15$ К и $\rho_\infty=1.225$ кг/м³.
- На **нижней** границе расчетной области задавалось условие **адиабатической стенки**.
- На **боковых** - условие **периодичности**.
- На **выходной границе** при сверхзвуковом потоке параметры течения экстраполировались изнутри расчетной области. В расчетах с $M_\infty=0.5$ задавалось статическое давление набегающего потока p_∞ .
- На **верхней** границе задавалось граничное условие на основе **инвариантов Римана** [2].
- На **входной** границе задавались распределения давления, температуры и осредненной продольной скорости, рассчитанные на основе приближенной модели сжимаемого ПС на плоской пластине, основанной на концепции эффективной скорости Ван Дриста [3, 4].
- К профилю осредненной скорости добавлялись пульсации скорости, сгенерированные **методом синтетических вихрей (SEM)** [5]. **Линейный масштаб** турбулентности задавался постоянным и равным $0.15\delta_{99,t}$, где $\delta_{99,t}$ – толщина пограничного слоя в целевом сечении $Re_t=252$. Для напряжений Рейнольдса использовалось неравномерное вертикальное распределение из сечения $Re_t=252$ “эталонного” расчета [1].



1. [DNS of compressible turbulent boundary layers and assessment of data-/scaling-law quality / C. Wenzel, B. Selent, M. Kloker, U. Rist // J. Fluid Mech. – 2018.](#)
2. [Carlson, J.-R. Inflow/Outflow Boundary Conditions with Application to FUN3D: NASA Technical Memorandum NASA/TM-2011-217181 / J.-R. Carlson. – NASA, 2011. – 32 pp.](#)
3. [White, F. M. Viscous Fluid Flow / F. M. White. – 2nd edition. – McGraw-Hill, Inc., 1991. – 614 p.](#)
4. [Van Driest, E. R. Turbulent Boundary Layer in Compressible Fluids / E. R. Van Driest // Journal of the Aeronautical Sciences. – 1951. – V. 18, № 3. – P. 1012-1028.](#)
5. [Jarrin, N. Synthetic inflow boundary conditions for the numerical simulation of turbulence: PhD thesis / Jarrin Nicolas; The University of Manchester. – Manchester, United Kingdom, 2008. – 258 pp.](#)

Постановка задачи (2)

- **Длина расчетной области** определялась таким образом, чтобы целевое сечение $Re_t=252$ гарантированно находилось между входной и выходной границей расчетной области на некотором удалении от них. Распределение параметров ПС по длине заранее неизвестно, поэтому для задания длины расчетной области, как и для задания граничного условия на входе, использовалась приближенная модель на основе концепции эффективной скорости Ван Дриста [1, 2] (далее VD1).
- **Длина расчетной области задавалась набором из двух значений** $\Delta Re_{\theta,1} = Re_{\theta,t} - Re_{\theta,1}$ и $\Delta Re_{\theta,2} = Re_{\theta,2} - Re_{\theta,t}$, где $Re_{\theta,t}$, $Re_{\theta,1}$, $Re_{\theta,2}$ - числа Рейнольдса соответственно в целевом, входном и выходном сечениях.
- **Шаг по времени** задавался в безразмерном виде $\Delta \bar{t} = \Delta t u_e / \delta_{99,1}$, где u_e – скорость свободного потока, $\delta_{99,1}$ – толщина пограничного слоя в сечении входа. Расчеты проведены для одного значения $\Delta \bar{t} : 0.085$.
- Поля основных параметров течения **осреднялись по времени**. Осреднение начиналось через промежуток времени $T_{av,start} = (4 \dots 6)L/u_e$ (где L – длина расчетной области) с момента начала расчета, и продолжалось в течении $T_{av} = (12 \dots 20)L/u_e$.
- После осреднения по времени осуществлялось **пространственное осреднение** в поперечном направлении.

1. White, F. M. Viscous Fluid Flow / F. M. White. – 2nd edition. – McGraw-Hill, Inc., 1991. – 614 p.
2. Van Driest, E. R. Turbulent Boundary Layer in Compressible Fluids / E. R. Van Driest // Journal of the Aeronautical Sciences. – 1951. – V. 18, № 3. – P. 1012-1028.

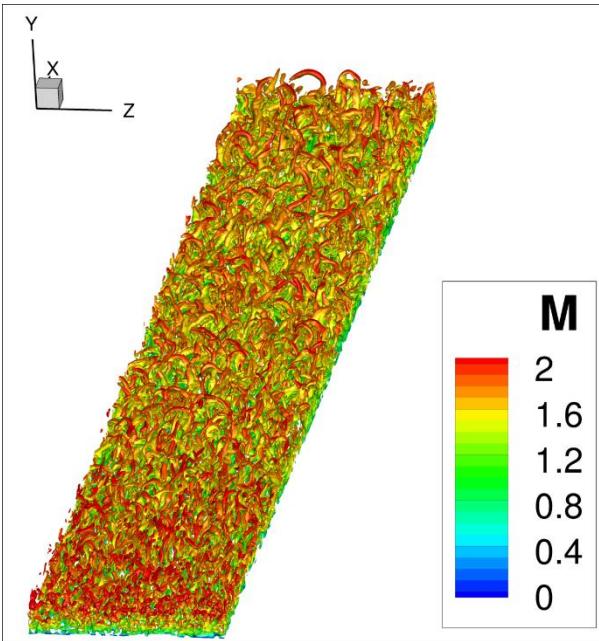
Основные параметры расчетов для $M_e=2$

№	Метод	$(L_x \times L_y \times L_z) \delta_{99,t}$	$\Delta Re_{\vartheta,1}$	$\Delta Re_{\vartheta,2}$	$\Delta x / \delta_{99,t}$	Δx^+	Δz^+	$\Delta \bar{t}$	$\Delta y_{\min} / \delta_{99,t}$	Δy^+_{\min}	Δy^+_{\max}	$N_x \times N_y \times N_z$	$N_{\Sigma} \times 10^{-6}$
1	RANS/ILES(i)	38×5×5	480	90	0.164	45	15	0.085	0.022	6	27.6	231×80×92	1.70
2	RANS/ILES(i)	49×5×5	680	90	0.155	45	15	0.085	0.021	6	27.6	313×84×97	2.55
3	RANS/ILES(i)	38×5×5	480	90	0.164	45	15	0.085	0.044	12	27.6	231×66×92	1.40
4	RANS/ILES(i)	49×5×5	680	90	0.155	45	15	0.085	0.041	12	27.6	313×70×97	2.13
5	RANS/ILES(i)	54×5×5	800	90	0.147	45	15	0.085	0.039	12	27.6	367×73×103	2.76
6	RANS/ILES(i)	38×7×7	480	70	0.164	45	15	0.085	0.003	0.85	27.6	231×173×128	5.12
7	ILES	31×5×5	390	70	0.056	15	5	0.085	0.001	0.63	20.4	558×164×264	24.16

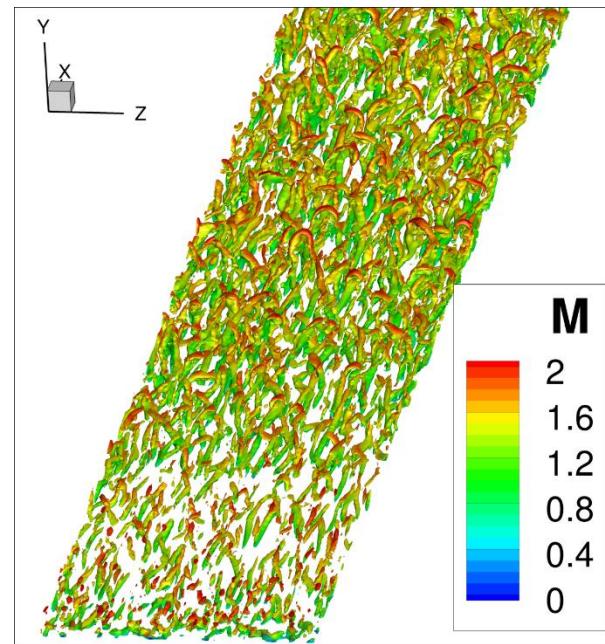
В литературе шаги сетки (Δx^+ , Δy^+ и Δz^+) применительно к рассматриваемой задаче как правило выражают в единицах закона стенки, определенным по параметрам пограничного слоя во входном сечении. Также сделано и в настоящей работе. При переменном положении входного сечения (как здесь из-за изменения длины расчетной области) величина трения в нем изменяется. В результате величина шагов в физических единицах при перемещении входного сечения вниз по течению несколько уменьшается, что приводит к некоторому дополнительному сгущению сетки. Это видно по данным, приведенным в таблице: увеличение длины расчетной области с $38\delta_{99,t}$ до $54\delta_{99,t}$ за счет смещения входного сечения привело к росту числа ячеек N_y и N_z с 66 и 92 до, соответственно, 73 и 103, т.е. где-то на 11%. Хотя шаги сетки уменьшаются в заметно меньшей пропорции, чем растет длина, тем не менее, данное обстоятельство может быть одним из факторов, обуславливающих некоторые полученные в расчетах эффекты, возникающие при удлинении расчетной области (например, сокращение переходной области).

Влияние величины пристеночного шага. Изоповерхности Q-критерия $Q = 5 \times 10^{12} \text{ } 1/\text{c}^2$.

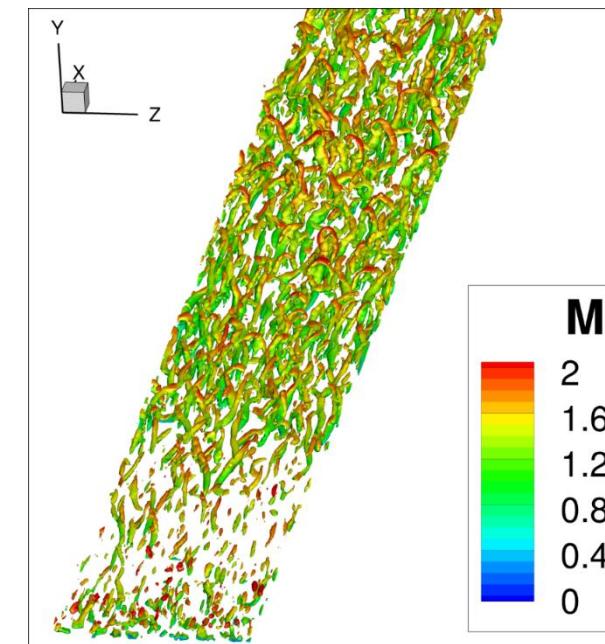
ILES(i)-7, $(31 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$,
 $\Delta y^+_{\min} = 0.63, N_{\Sigma} = 24.16 \times 10^6$



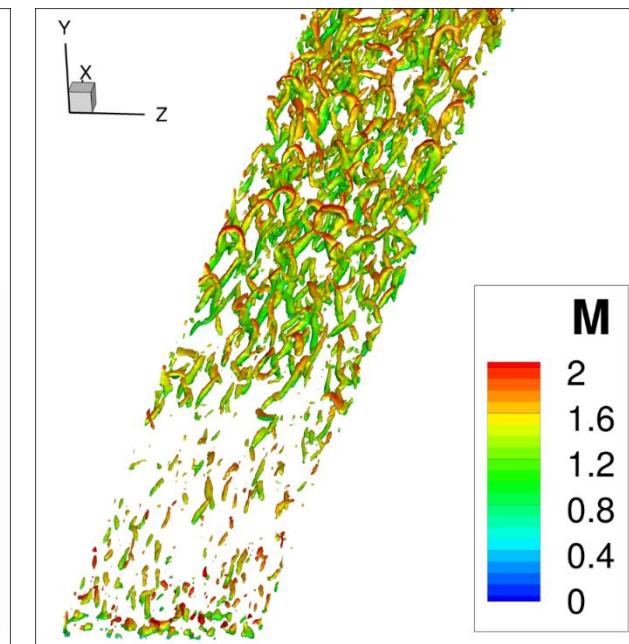
RANS/ILES(i)-6, $(38 \times 7 \times 7) \delta_{99,t}$,
 $\Delta y^+_{\min} = 0.85, N_{\Sigma} = 5.1 \times 10^6$



RANS/ILES(i)-1, $(38 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$,
 $\Delta y^+_{\min} = 6, N_{\Sigma} = 1.70 \times 10^6$



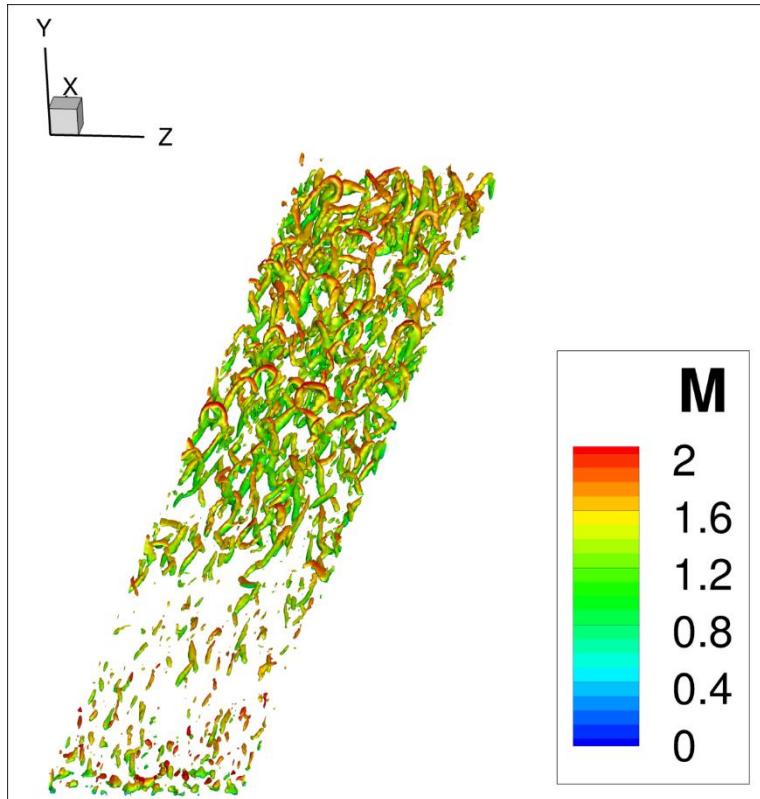
RANS/ILES(i)-3, $(38 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$,
 $\Delta y^+_{\min} = 12, N_{\Sigma} = 1.40 \times 10^6$



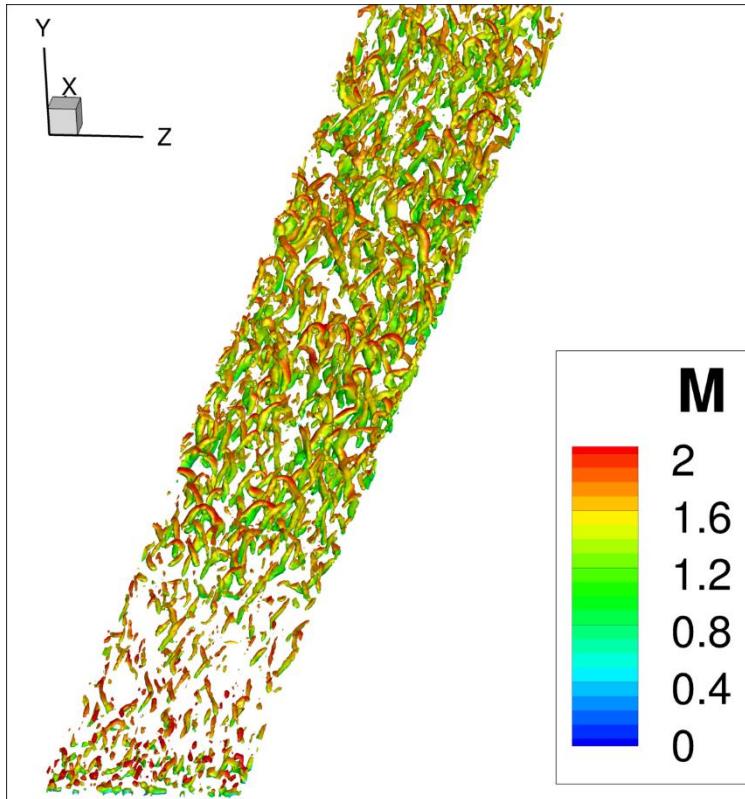
Увеличение Δy^+_{\min} до 6 ведет к некоторому увеличению переходной зоны и небольшому уменьшению числа вихревых структур. При $\Delta y^+_{\min} = 12$ число вихревых структур становится еще меньше, а длина переходной зоны растет.

Влияние длины расчетной области при $\Delta y^+_{\min}=12$. Изоповерхности Q-критерия $Q=5\times10^{12} \text{ } 1/\text{c}^2$.

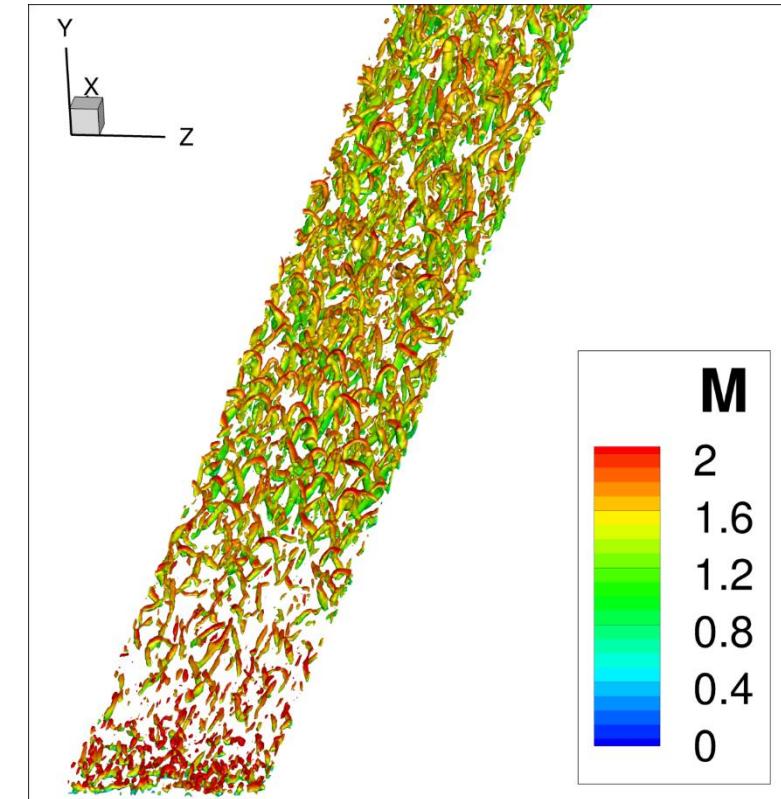
RANS/ILES(i)-3, $(38\times5\times5)$ $\delta_{99,t}$,
 $N_\Sigma=1.40\times10^6$



RANS/ILES(i)-4, $(49\times5\times5)$ $\delta_{99,t}$,
 $N_\Sigma=2.13\times10^6$



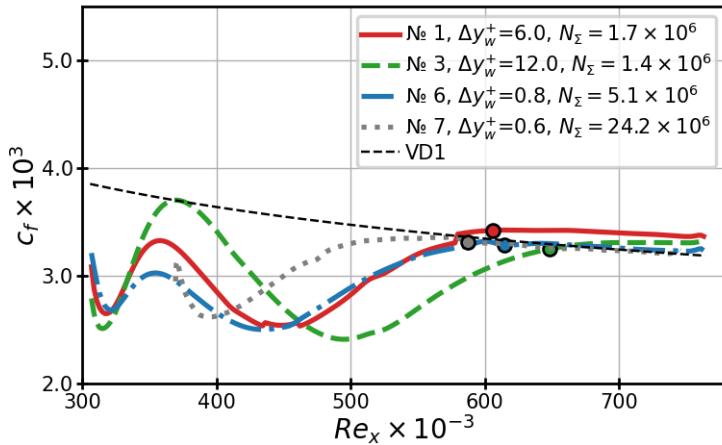
RANS/ILES(i)-5, $(54\times5\times5)$ $\delta_{99,t}$,
 $N_\Sigma=2.76\times10^6$



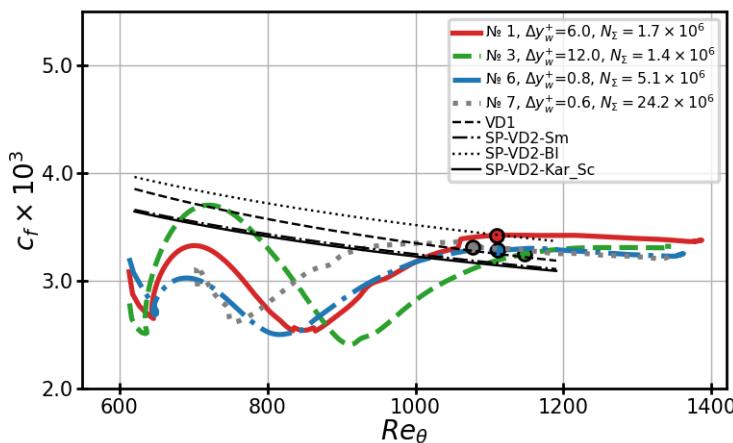
Увеличение длины расчетной ведет к росту числа вихревых структур и уменьшению переходной зоны.

Влияние величины пристеночного шага на основные параметры ПС

Коэффициент трения

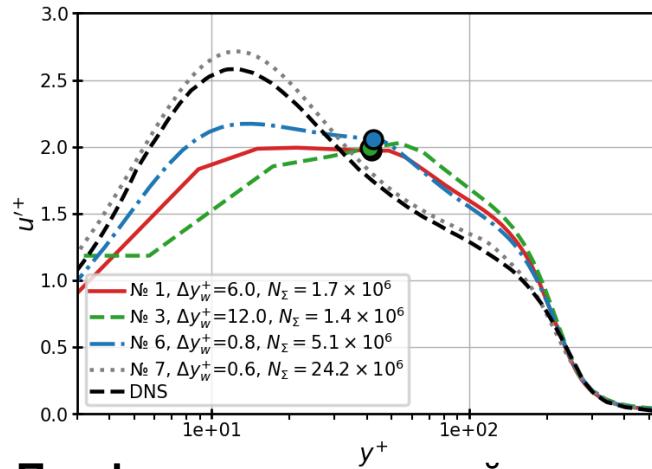


Кружками обозначено положение сечения $Re_t=252$

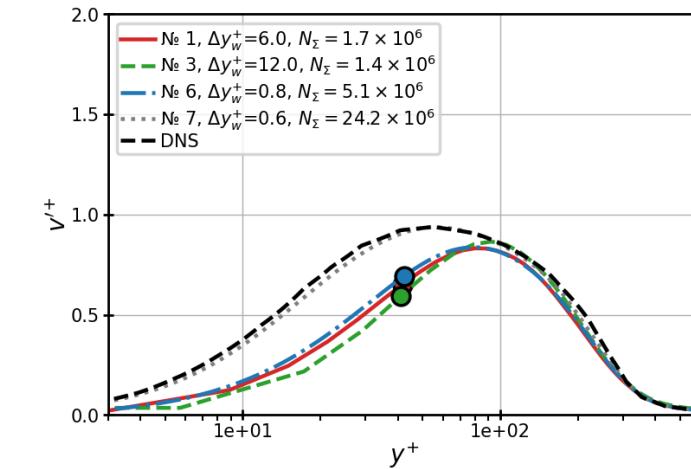
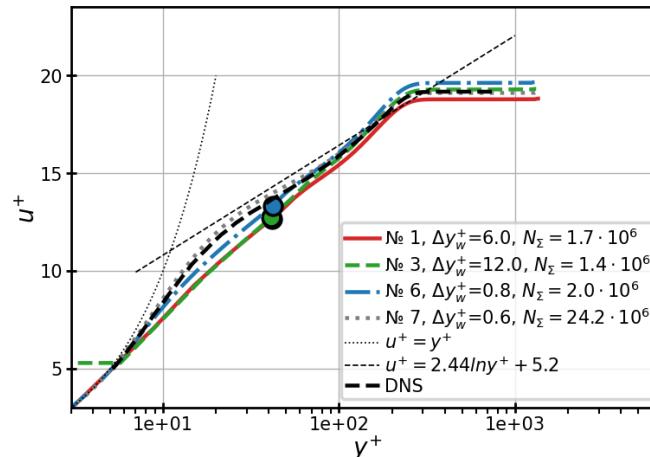


- Во всех приведенных RANS/ILES(i) расчетах происходит восстановление трения.
- При $\Delta y_w^+=12$ длина восстановления трения наибольшая: $\Delta Re_x \approx 420 \times 10^3$ против $\Delta Re_x \approx 300 \times 10^3$ в расчетах при $\Delta y_w^+=6$ и $\Delta y_w^+=0.85$. В целевом сечении трение полностью не восстановлено.
- При $\Delta y_w^+=6$ трение восстанавливается почти также, как и при $\Delta y^+=0.85$, но после восстановления c_f оказывается завышенным: в целевом сечении c_f равен 3.45×10^{-3} при $\Delta y_w^+=6$ и 3.30×10^{-3} при $\Delta y_w^+=0.85$.

Профили пульсаций компонент скорости в сечении $Re_t=252$

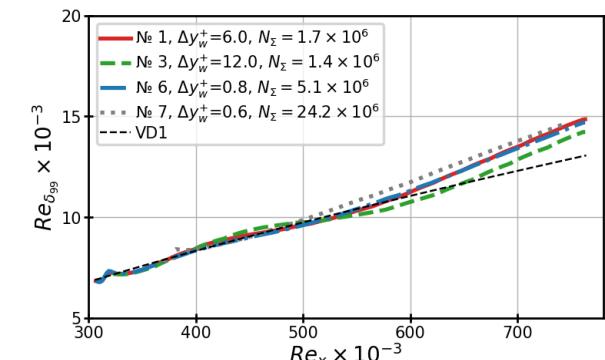


Профиль осредненной скорости



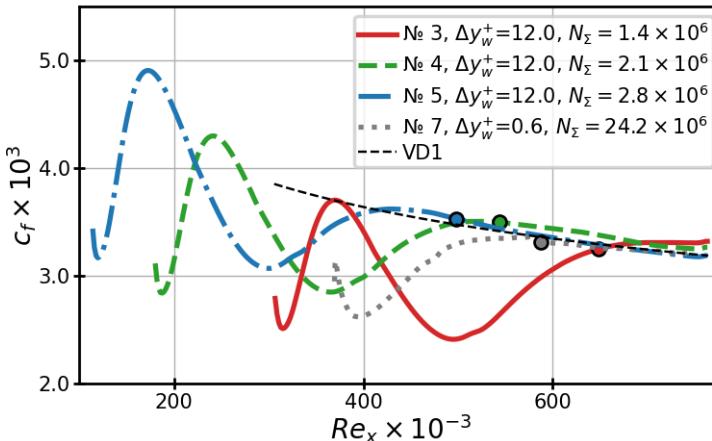
Кружками на графиках для расчетов методом RANS/ILES(i) указано место переключения между ветвями RANS и ILES. Во всех расчетах оно расположено при $y^+=40$.

Распределение $Re_{\delta99}$

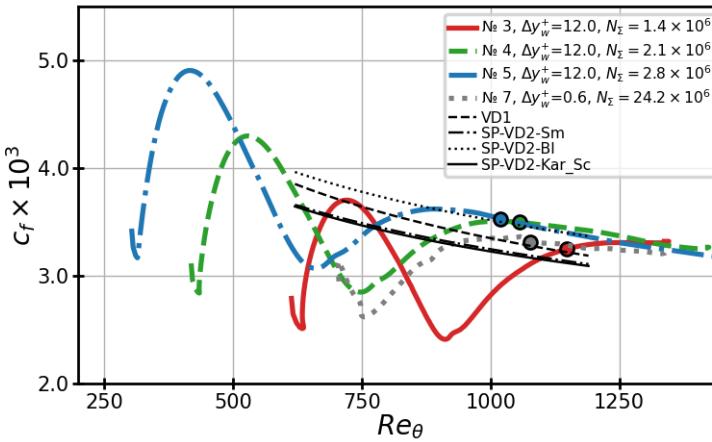


Влияние длины расчетной области при $\Delta y^+_{\min}=12$ на основные параметры ПС

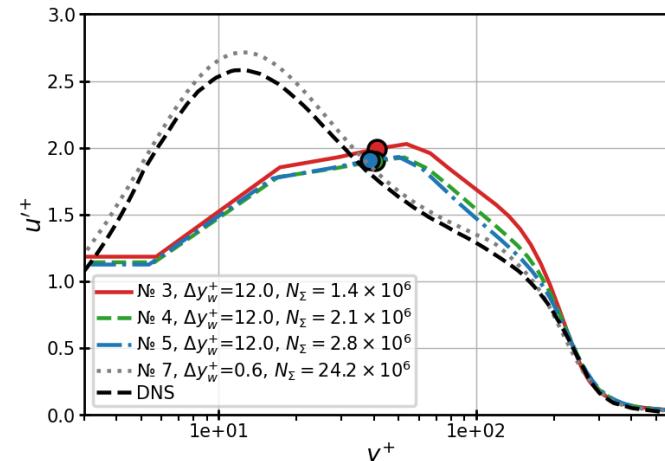
Коэффициент трения



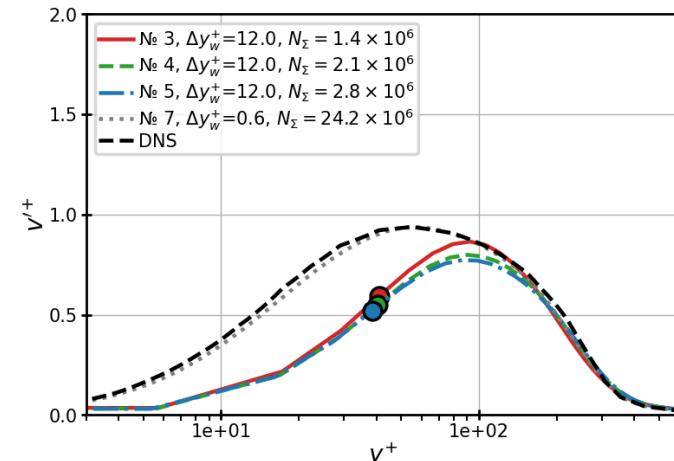
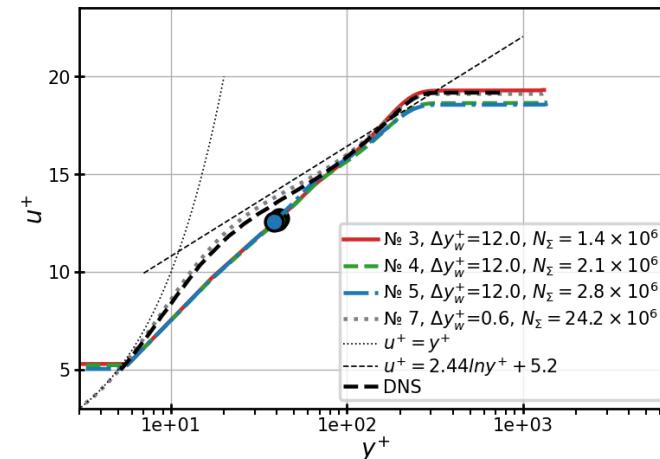
Кружками обозначено положение сечения $Re_t=252$



Профили пульсаций компонент скорости в сечении $Re_t=252$

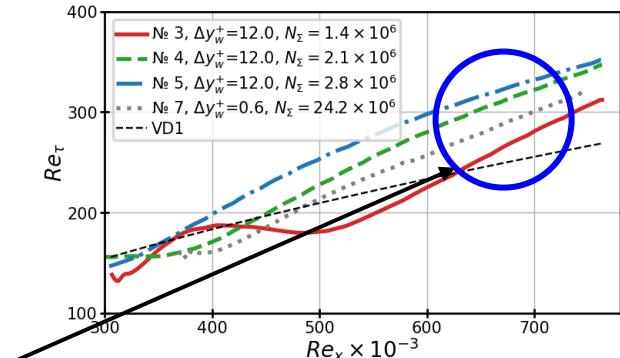


Профиль осредненной скорости



Кружками на графиках для расчетов методом RANS/ILES(i) указано место переключения между ветками RANS и ILES. Во всех расчетах оно расположено при $y^+=40$.

Re_t



- Во всех приведенных RANS/ILES(i) расчетах происходит восстановление трения. После восстановления значения c_f во всех RANS/ILES(i) расчетах превышают значения c_f в ILES расчете № 7 на 0.2×10^{-3} (6% от c_f в ILES расчете № 7 в целевом сечении). При этом по мере удаления от целевого сечения величина c_f в RANS/ILES(i) расчетах приближается к ее величине в расчете ILES.
- В расчете № 3 целевое сечение попало в конец переходной зоны. Величина c_f в нем оказалась меньше, чем в расчетах № 4 и № 5 на 0.25×10^{-3} (7%), а само целевое сечение оказалось расположенным дальше, чем в расчетах № 4 и № 5.
- В расчетах № 4 и № 5 величина переходной зоны достигает $\Delta Re_x \approx 340 \times 10^3$ и $\Delta Re_x \approx 370 \times 10^3$, а в расчете № 3 - $\Delta Re_x \approx 420 \times 10^3$.

Выводы

- Результаты ILES расчета оказались близки к результатам DNS: профиль скорости и распределение пульсаций u' в контрольном сечении практически совпали с данными DNS, пик на распределении пульсаций u' в ILES расчетах превышает результаты DNS на 4%.
- При использовании грубых сеток удалось добиться относительно неплохой точности предсказания параметров погранслоя. Например, расчете № 4 с $\Delta y^+_w=12$ и $N_\Sigma=2.13\times 10^6$ величина c_f в контрольном сечении оказалась на 6 % больше, чем в ILES расчете с $N_\Sigma=24.16\times 10^6$, а по направлению к выходу разница в c_f сократилась до 3 %.
- Точность предсказания уровня пульсаций в ILES области ($y^+>40$) в RANS/ILES(i) расчетах также оказалась вполне приемлемой. На участке $y^+>200$ уровень пульсаций обоих компонент скорости почти совпадает с ILES расчетом и результатами DNS, а уровень пульсаций поперечной компоненты скорости совпадает с результатами ILES вплоть до $y^+=200$.
- Пик пульсаций u' в RANS/ILES(i) расчетах с $\Delta y^+_w=12$ составляет 70-75% от ILES расчета и смешен в точку $y^+=50$, (а в ILES он расположен в точке $y^+=12$).
- Структура крупных вихрей в погранслое, полученная в RANS/ILES(i) расчетах, качественно близка к полученной в ILES расчете, хотя и число мелких вихрей в RANS/ILES(i) расчетах существенно меньше.
- При увеличении Δy^+_w до 12 длина переходной области возрастает до $\Delta Re_x \approx 420 \times 10^3$ при $\Delta Re_x \approx 300 \times 10^3$ в расчетах при $\Delta y^+_w=6$ и $\Delta y^+_w=0.85..$
- Переходная зона при $\Delta y^+_w=12$ сокращается с увеличением длины: $\Delta Re_x \approx 420 \times 10^3$ при $38\delta_{99,t}$, $\Delta Re_x \approx 370 \times 10^3$ при $49\delta_{99,t}$ и $\Delta Re_x \approx 340 \times 10^3$ при $54\delta_{99,t}$.

Основные параметры расчетов для $M_e=0.5$

№	Метод	$(L_x \times L_y \times L_z) \delta_{99,t}$	$\Delta Re_{\vartheta,1}$	$\Delta Re_{\vartheta,2}$	$\Delta x / \delta_{99,t}$	Δx^+	Δz^+	$\Delta \bar{t}$	$\Delta y_{min} / \delta_{99,t}$	Δy^+_{min}	Δy^+_{max}	$N_x \times N_y \times N_z$	$N_\Sigma \times 10^{-6}$	C_m
1	RANS/ILES(i)	49×7×7	440	110	0.198	60	20	0.085	0.003	0.85	52	244×114×106	2.95	0.2
2	RANS/ILES(i)	44×5×5	390	100	0.206	60	20	0.085	0.003	0.85	52	214×79×73	1.23	0.2
3	RANS/ILES(i)	44×5×5	390	100	0.137	40	15	0.085	0.003	0.85	52	320×79×112	2.83	0.2
4	RANS/ILES(i)	44×5×5	390	100	0.206	60	20	0.085	0.003	0.85	52	214×79×73	1.23	0.1
5	RANS/ILES(i)	44×5×5	390	100	0.206	60	20	0.085	0.003	0.85	52	214×79×73	1.23	1.0

Роль коэффициента C_m

В RANS/ILES(i) [1] методе аппроксимация конвективных потоков осуществляется с помощью модификации метода Роу [2] с пониженной схемной вязкостью, в которой формула для вычисления конвективных потоков имеет вид:

$$f_{i+1/2} = \frac{1}{2}[f(q_L) + f(q_R)] - \frac{1}{2}F_{sum}|A|(q_R - q_L).$$

Для предраспадных параметров q_L и q_R на гранях ячеек использована сохраняющая монотонность схема 9-го порядка MP-9 [3]. $F_{sum} \leq 1$ - функция от числа Маха, уменьшающая величину диффузационного члена в области ILES при $M < 1$ [1].

Функция F_{sum} определена на основе двух других функций: $F_{sum} = \max(F_{mloc}, F_{om})$.

Первая из них - F_{mloc} - обеспечивает снижение коэффициента F_{sum} в дозвуковых областях зоны ILES до значений меньших 1, но больших заданного коэффициента C_m : $F_{mloc} = C_m + (1-C_m)(1-(1-\min(1, M_{loc}))^{2.2})^8$, где $M_{loc} = \min(1, M)$, $C_m = 0.1-1$.

Вторая функция $F_{om} = 1 + (C_{om} - 1)\min(1, (|\Omega| / C_{oref}))$, $C_{om} = C_m$, $C_{oref} = 0.1-0.8$ (в настоящих расчетах $C_{oref} = 0.1$) позволяет избежать уменьшения схемной вязкости при малой завихренности Ω .

В области RANS снижения схемной вязкости не требуется и $F_{sum} = 1$. Это достигается модификацией M_{loc} :

$$M_{loc} = \min(1, M) \text{ при } d_{mod} = d_{ref}, \quad M_{loc} = 1 \text{ при } d_{mod} > d_{ref}$$

Подробно выбор вида функции F_{sum} , а также процесс калибровки входящих в ее состав констант, описан в работе [1].

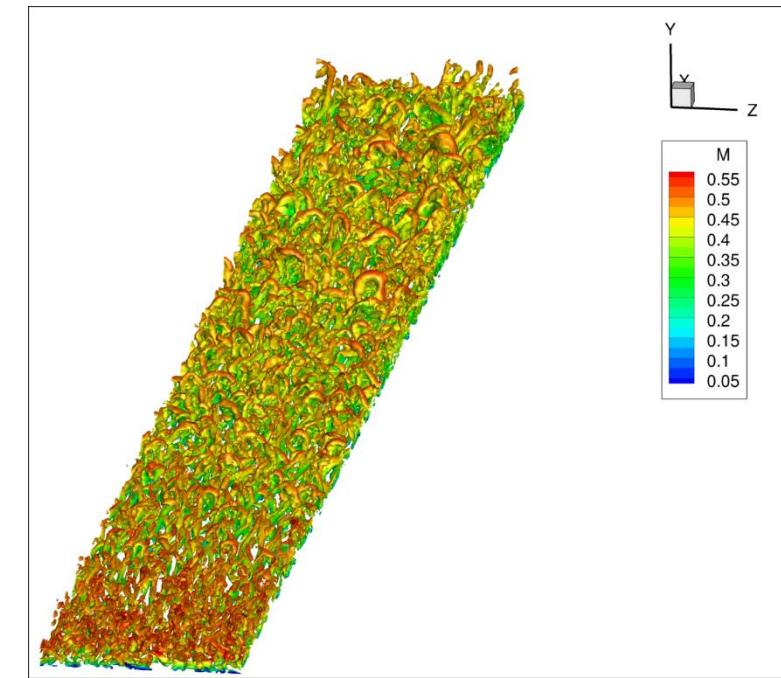
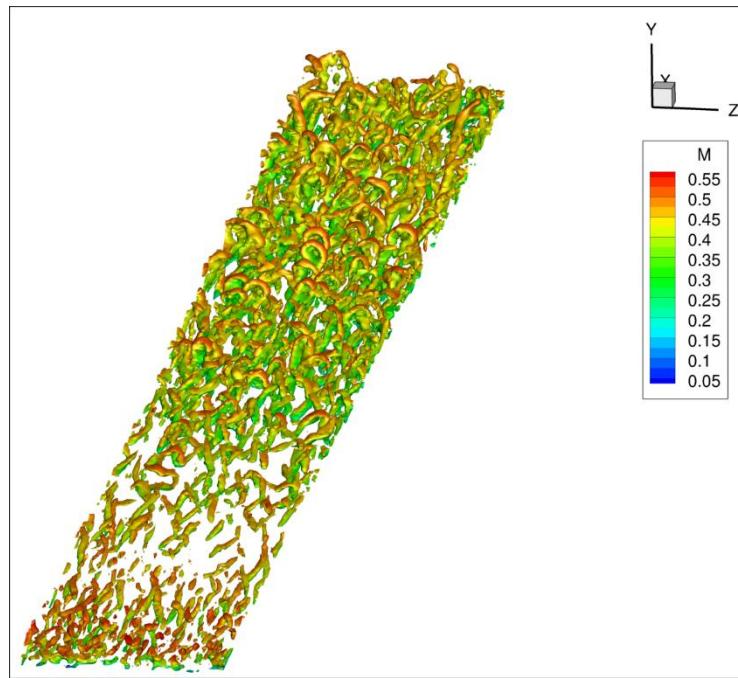
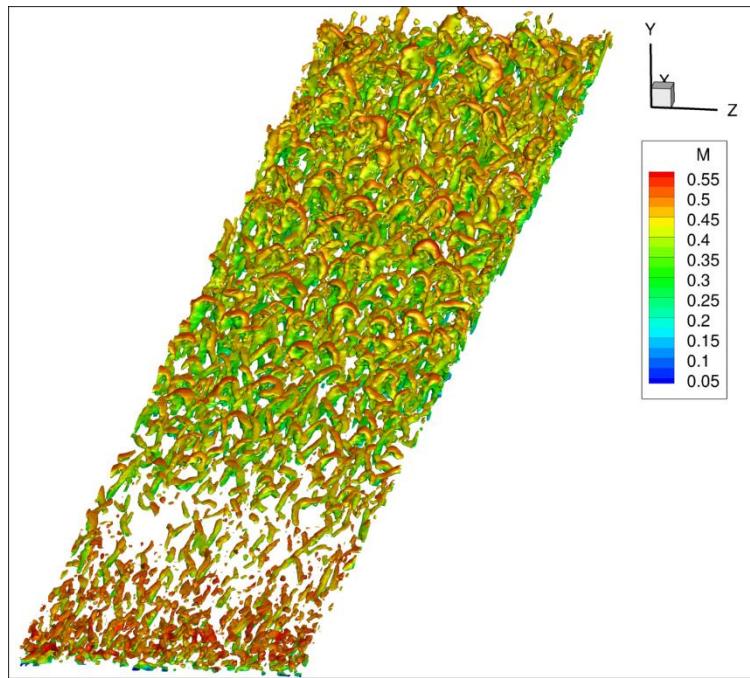
1. А. С. Жигалкин, Д. А. Любимов. Улучшение разрешения RANS/ILES(i) методом турбулентных вихревых структур при дозвуковых числах Маха // ТВТ, 2025. Т. 63. №1, с. 57-67.
2. P. L. Roe. Approximate Riemann Solvers, Parameters Vectors, and Difference Schemes // J. Comp. Phys, 1981, v. 43, p. 357-372.
3. A. Suresh, H. T. Huynh. Accurate Monotonicity—Preserving Schemes with Runge-Kutta Time Stepping // J. of Comp. Phys, 1997, v. 136, № 1, p. 83-99

Влияние размера расчетной области и шага сетки. Изоповерхности Q-критерия $Q=5\times10^{10} \text{ } 1/\text{c}^2$.

RANS/ILES(i)-1, $(49\times7\times7)\delta_{99,t}$,
 $\Delta x^+=60, N_z=2.95\times10^6$

RANS/ILES(i)-2, $(44\times5\times5)\delta_{99,t}$,
 $\Delta x^+=60, N_z=1.23\times10^6$

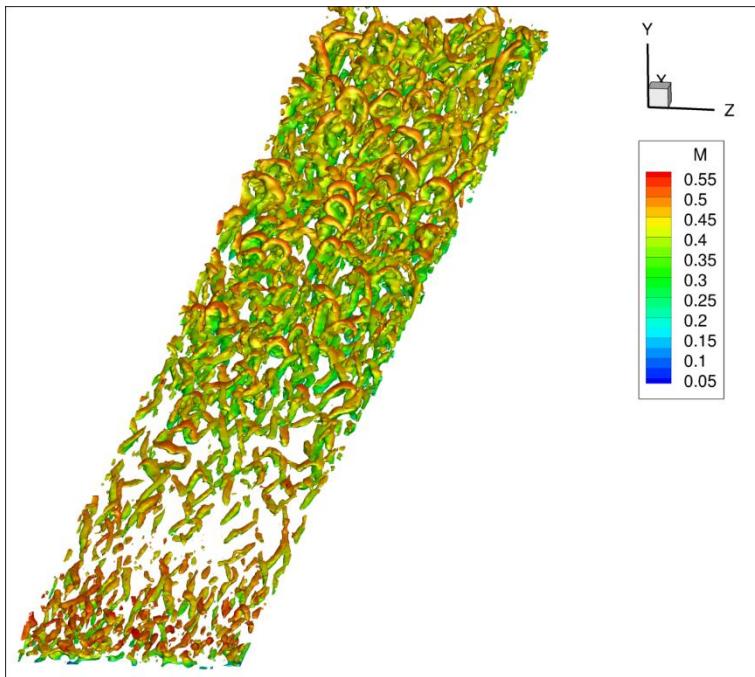
RANS/ILES(i)-3, $(44\times5\times5)\delta_{99,t}$,
 $\Delta x^+=40, N_z=2.83\times10^6$



- Уменьшение Δx^+ с 60 до 40 приводит к существенному росту числа вихревых структур, а также сокращению переходной зоны
- Увеличение размеров расчетной области с $(44\times5\times5)\delta_{99,t}$ до $(49\times7\times7)\delta_{99,t}$ при постоянном Δx^+ привело к небольшому сокращению длины переходной зоны.

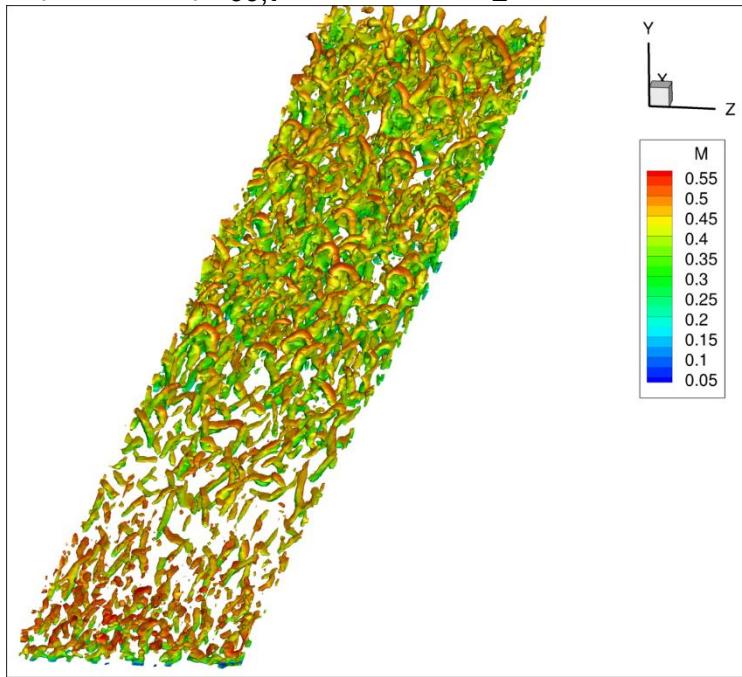
Влияние C_m . Изоповерхности Q-критерия $Q=5\times10^{12} \text{ 1/c}^2$.

RANS/ILES(i)-2, $C_m=0.2$

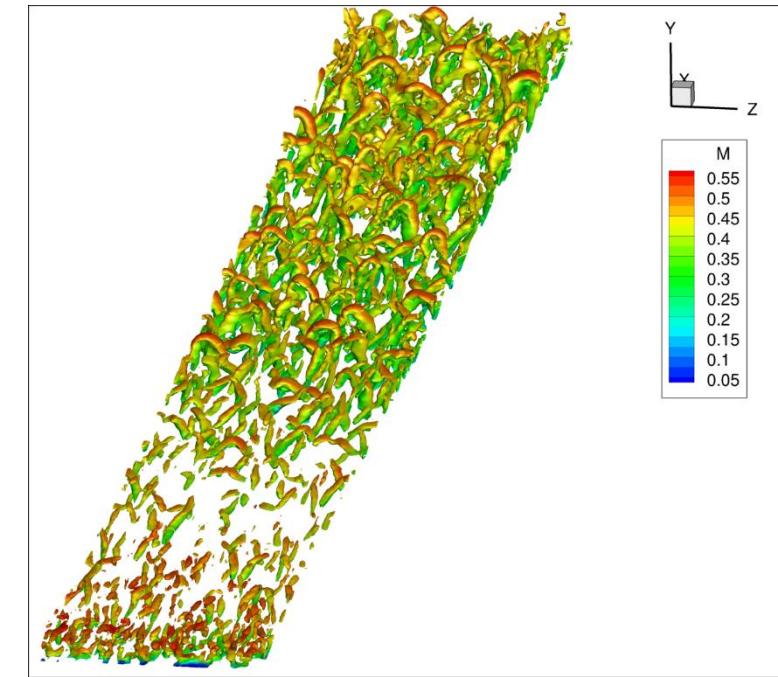


RANS/ILES(i)-4, $C_m=0.1$

$(44\times5\times5)\delta_{99,t}, \Delta x^+=60, N_\Sigma=1.23\times10^6$



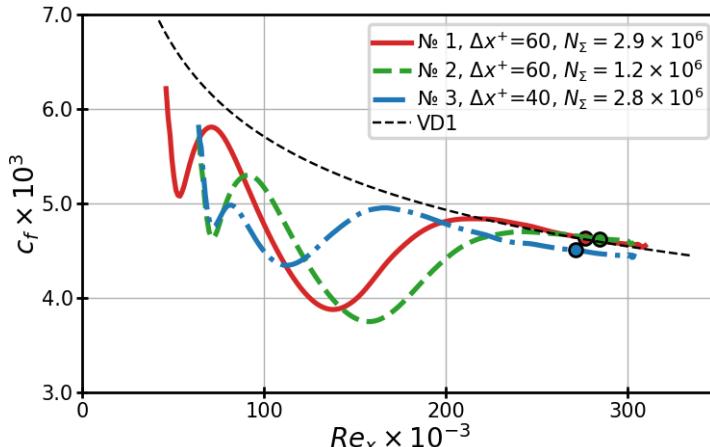
RANS/ILES(i)-5, $C_m=1.0$



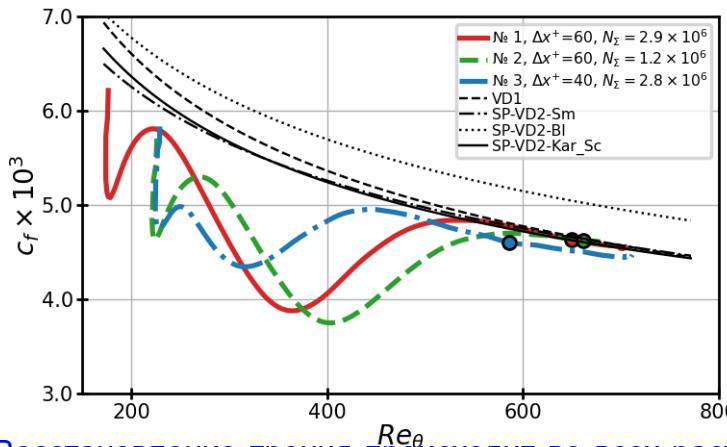
- Уменьшение C_m с 1.0 до 0.1 приводит к росту числа мелких вихревых структур, а также сокращению переходной зоны.

Влияние размера расчетной области и шагов сетки Δx^+ и Δz^+ на основные параметры ПС

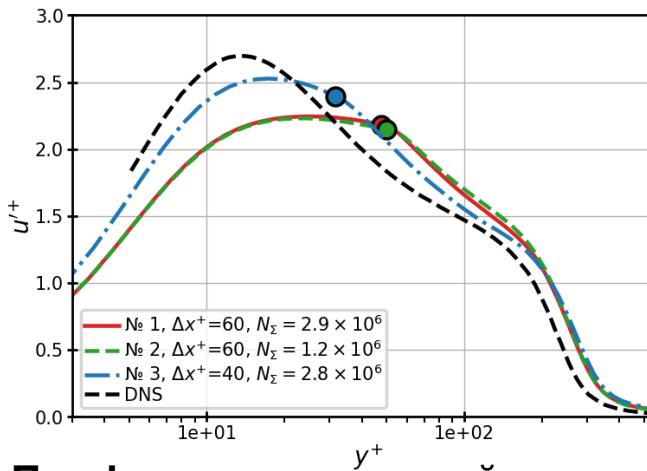
Коэффициент трения



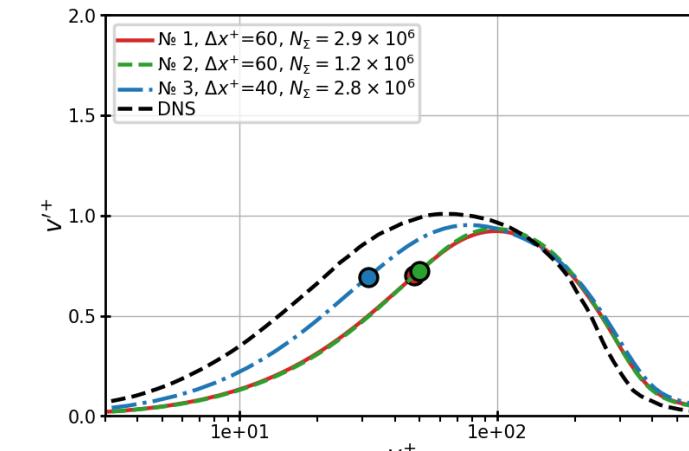
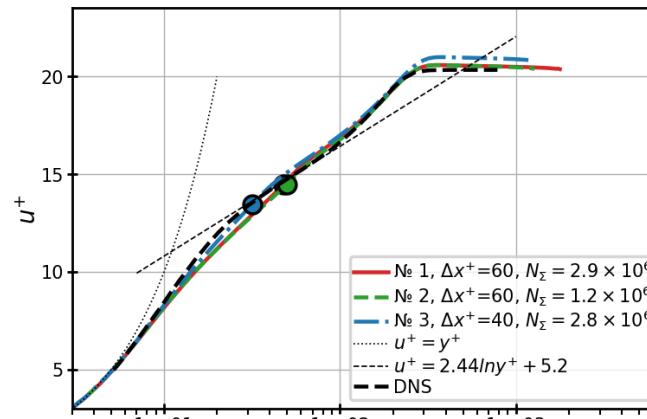
Кружками обозначено положение сечения $Re_\tau = 252$



Профили пульсаций компонент скорости в сечении $Re_\tau = 252$

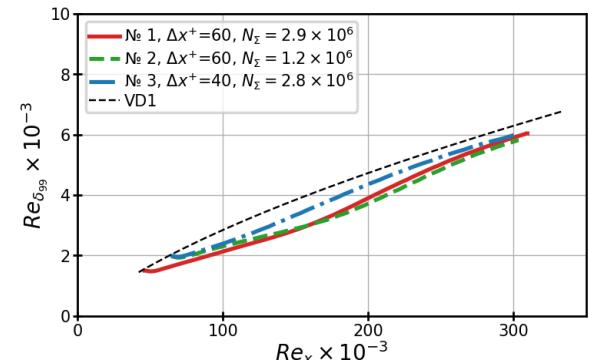


Профиль осредненной скорости



Кружками на графиках для расчетов методом RANS/ILES(i) указано место переключения между ветками RANS и ILES. При $\Delta x^+ = 60$ оно в расположено при $y^+ = 50$; а при $\Delta x^+ = 40$ оно в расположено при $y^+ = 30$.

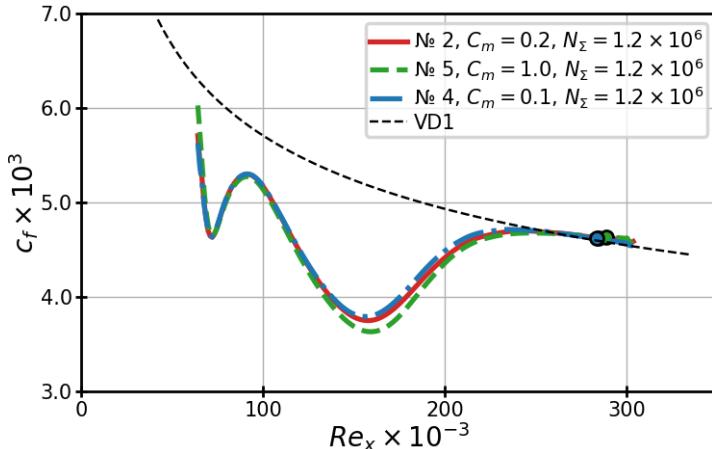
Распределение $Re_{\delta_{99}}$



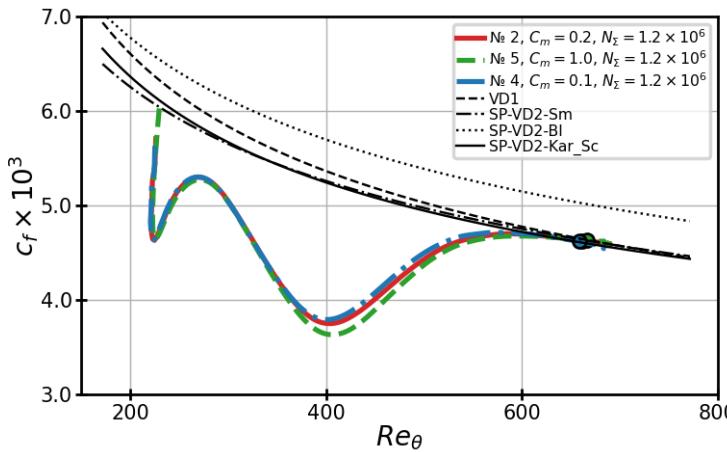
- Восстановление трения происходит во всех расчетах. Увеличение размеров расчетной области с $(44 \times 5 \times 5)\delta_{99,t}$ до $(49 \times 7 \times 7)\delta_{99,t}$ дало уменьшение длины переходной зоны ΔRe_x с 200×10^3 до 180×10^3 в расчетах №2 и №1 соответственно.
- Уменьшение шагов расчетной сетки Δx^+ и Δz^+ с 60 и 20 в расчете №2 до 40 и 15 в расчете №3 привело к уменьшению переходной зоны ΔRe_x с 200×10^3 до 110×10^3 .
- В расчетах №1 и №2 величина c_f после восстановления оказалась выше, чем в расчете №3 на $(0.15-0.2) \times 10^{-3}$ (3.5-4.5% от величины c_f в целевом сечении в расчете №3).

Влияние C_m на основные параметры ПС

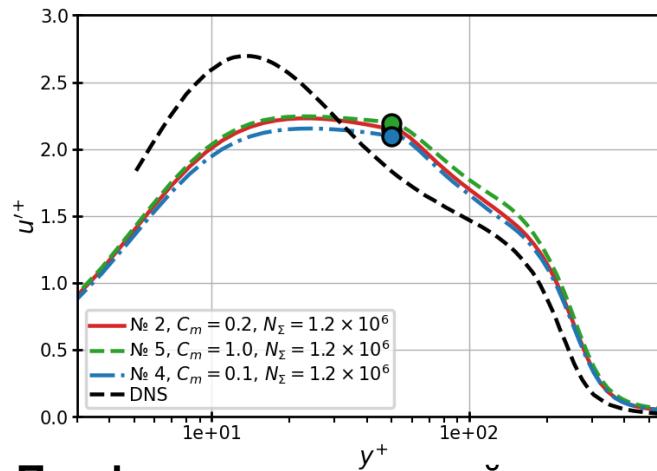
Коэффициент трения



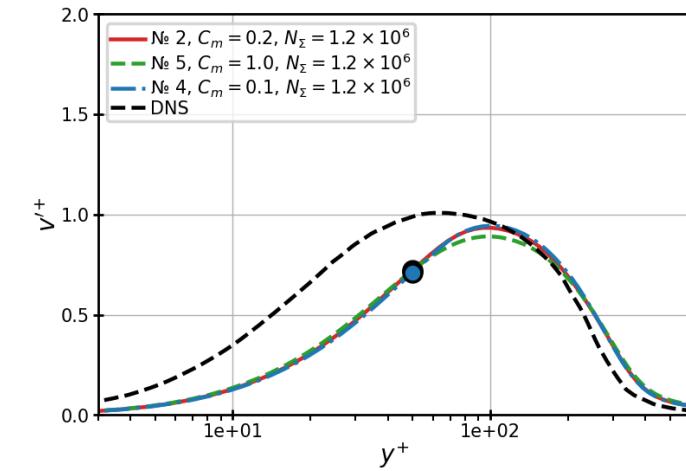
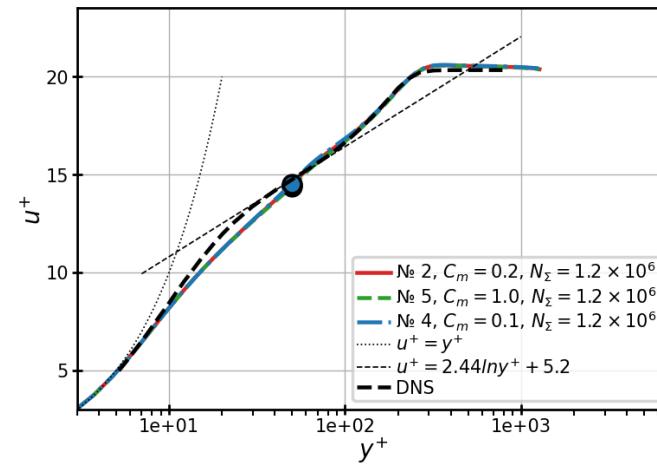
Кружками обозначено положение сечения $Re_t=252$



Профили пульсаций компонент скорости в сечении $Re_t=252$



Профиль осредненной скорости



Кружками на графиках для расчетов методом RANS/ILES(i) указано место переключения между ветками RANS и ILES. Во всех расчетах оно расположено при $y^+=50$.

- Уменьшение C_m на выбранном расчетном режиме не оказalo существенного влияния на длину зоны восстановления трения. Во всех расчетах она составила $\Delta Re_x = 200 \times 10^3$.
- При величине $C_m = 0.1$ в расчете № 4 минимальное значение c_f в переходной зоне составило 81 % от значения c_f в целевом сечении, а в расчете № 5 при $C_m = 1.0$ – 77 %.

Выводы

- Увеличение размеров расчетной области с $(44 \times 5 \times 5)\delta_{99,t}$ в расчете № 2 до $(49 \times 7 \times 7)\delta_{99,t}$ в расчете № 1 привело к уменьшению длины переходной зоны ΔRe_x с 200×10^3 до 180×10^3 .
- Уменьшение шагов расчетной сетки Δx^+ и Δz^+ с 60 и 20 в расчете № 2 до 40 и 15 в расчете № 3 привело к уменьшению переходной зоны ΔRe_x с 200×10^3 до 110×10^3 .
- В расчетах № 1 и № 2 с шагами сетки $\Delta x^+ = 60$ и $\Delta z^+ = 20$ величина c_f после восстановления оказалась выше, чем в расчете № 3 с $\Delta x^+ = 40$ и $\Delta z^+ = 15$ на $(0.15 - 0.2) \times 10^{-3}$ (что составляет 3.5-4.5% от величины c_f в контрольном сечении в расчете № 3).
- Уменьшение C_m привело к росту числа мелких вихревых структур в ILES области.
- Влияние C_m на выбранном расчетном режиме на переходную зону минимально, что, во-видимому, может быть связано с наличием около стенке RANS подобласти, в которой $C_m = 1$. Во всех расчетах длина переходной зоны составила $\Delta Re_x = 200 \times 10^3$. При величине $C_m = 0.1$ в расчете № 4 минимальное значение c_f в переходной зоне составило 81 % от значения c_f в целевом сечении, а в расчете № 5 при $C_m = 1.0$ – 77 %.

Исследование RANS/ILES(i) методом влияния крупномасштабных вихрей в набегающем потоке на работу дозвукового воздухозаборника при различных углах атаки

Цель работы

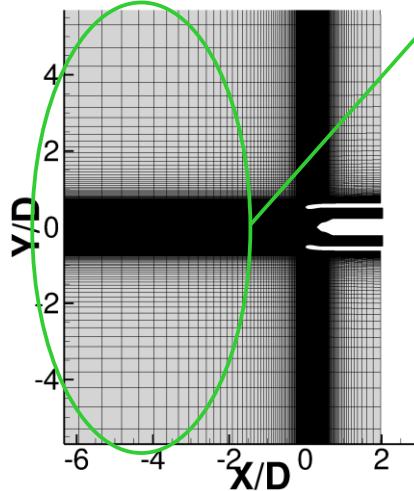
Целью настоящей работы являлся анализ с помощью RANS/ILES(i) метода [1], реализованного в ПМ «Лазурит» [2], влияния КМВ на течение в модельном дозвуковом ВЗ, типичном для пассажирских самолетов. Расчеты проводились при невозмущенном набегающем потоке и набегающем потоке, в котором присутствуют КМВ, **которые оказывают наибольшее влияние на течение в ВЗ**, сгенерированные с помощью синтетической турбулентности. Параметры набегающего потока, соответствовали режиму взлета, рассмотрены углы атаки 5° и 12° . Проанализировано влияние КМВ в набегающем потоке и угла атаки на мгновенные и осредненные поля течения внутри канала ВЗ, а также на величины интегральных параметров течения и уровень турбулентных пульсаций в выходном сечении ВЗ.

1. А. С. Жигалкин, Д. А. Любимов. Улучшение разрешения RANS/ILES(i) методом турбулентных вихревых структур при дозвуковых числах маха // ТВТ, 2025. Т. 63. №1, с. 57-67.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № № 2023666963 Российская федерация. «Программный модуль компьютерного моделирования физических процессов в авиационных силовых установках» («Лазурит»): опубликовано 08.08.2023 / Любимов Д.А., Бендерский Л.А.; правообладатель ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

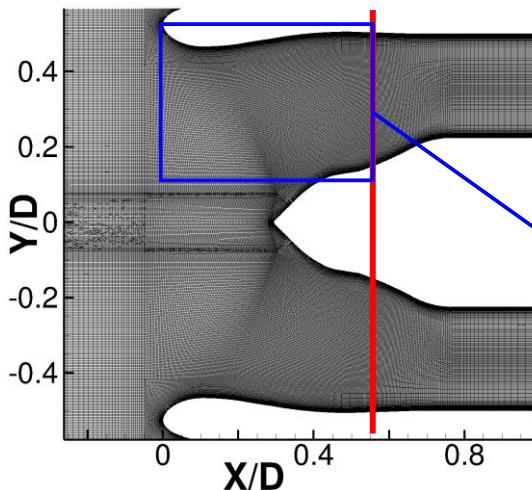
Геометрия ВЗ, режимные параметры, расчетная область



Общий вид геометрии ВЗ



Расчетная сетка в продольном сечении. Красной линией обозначено сечение выхода, в котором рассчитывались осредненные параметры.



Размер ячеек в области набегающего потока не превышает $L_t/4$

- Объект исследования представляет собой **модельный осесимметричный дозвуковой ВЗ**, типичный для пассажирских самолетов. Его геометрия соответствует численно исследованной в работе [1].
- **Параметры набегающего потока** соответствуют взлету самолета: число Маха равно 0.3, углы атаки – 5° и 12°, температура – 288 К и статическое давление – 100.1 кПа.
- Расчеты были проведены в **модельной постановке**, без вентилятора, втулка вентилятора оставалась неподвижной.
- **Расчетная область** имела форму цилиндра с диаметром 11D и длиной 8D, где D – внешний диаметр цилиндрического участка канала ВЗ.
- **Уровень турбулентности** определялся двумя параметрами: уровнем пульсаций скорости $U_{0 rms}$ и линейным масштабом L_t , для которых были выбраны следующие значения – $U_{0 rms} = 15 \text{ м/с}$ и $L_t/D = 2$.
- **Число ячеек по длине участка между входом и выходным сечением ВЗ** составило 170, по радиусу – 125, в азимутальном направлении – 264, а **размер пристенных ячеек** лежал в диапазоне $(4.85...9.70) \times 10^{-5} D$

1. Р. Ш. Аюпов, Л. А. Бендерский, Д. А. Любимов. Анализ RANS/ILES методом влияния бокового ветра на характеристики турбулентного течения в дозвуковом воздухозаборнике самолета // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов в 4-х томах. Т. 2. Уфа: изд-во БашГУ, 2019, с. 282-284.

Границные условия

Поле числа Маха в набегающем потоке при турбулентном набегающем потоке

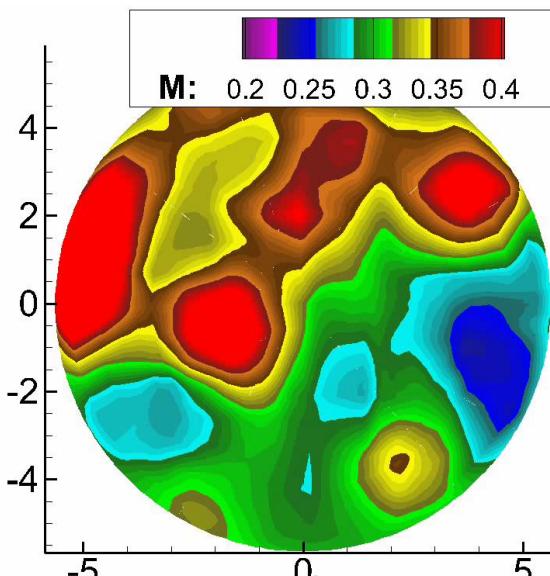
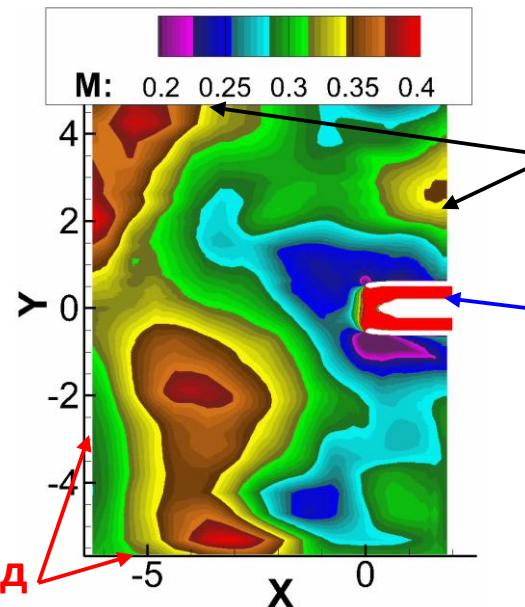


Таблица расчетов

№ Расчета	Уровень пульсаций, $U_{0 rms}$, м/с	Угол атаки, °
1	0.0	5
2	15.0	5
3	0.0	12
4	15.0	12

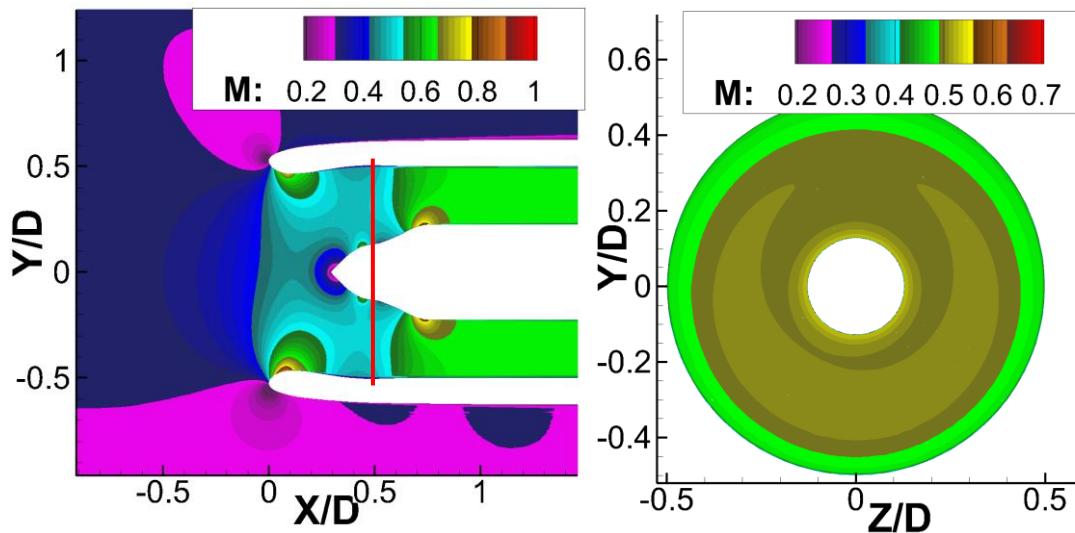


вход

- **На входе** в расчетную область задавались три компоненты скорости и статическая температура набегающего потока, а статическое давление экстраполировалось изнутри расчетной области.
 - **На выходе из внешней части** расчетной области задавалось статическое давление набегающего потока, а оставшиеся параметры экстраполировались.
 - **На выходе из канала В3** задавалось **статическое давление**, величина которого соответствовала значению газодинамической функции расхода $q(\lambda) = 0.75$.
 - **На стенках** В3 использовано комбинированное граничное условие «прилипание/функция стенки», которое выбиралось в зависимости от значения Y_+ в центре соседней со стенкой ячейки расчетной сетки.
 - **КМВ** в набегающем потоке моделировались добавлением к скорости потока на внешней границе расчетной области искусственных пульсаций, сгенерированных с помощью метода синтетических вихрей (SEM) [1].
1. N. Jarrin. Synthetic Inflow Boundary Conditions for the Numerical Simulation of Turbulence. - Manchester: University of Manchester, 2008, thesis ... Ph. D.

Влияние КМВ на мгновенное поле числа Маха

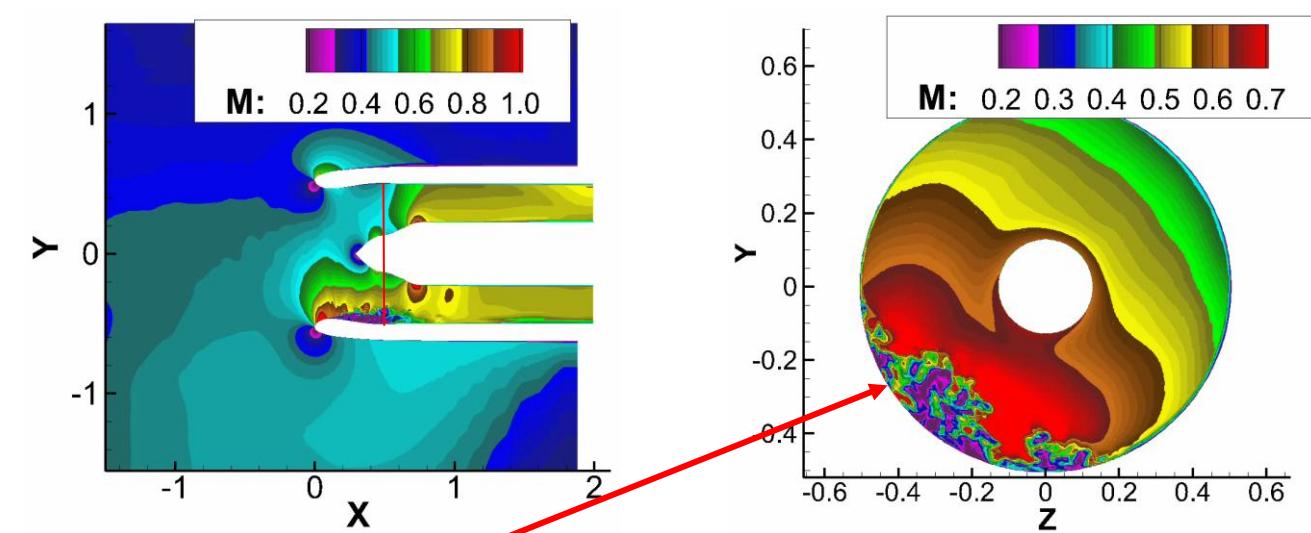
Невозмущенный набегающий поток



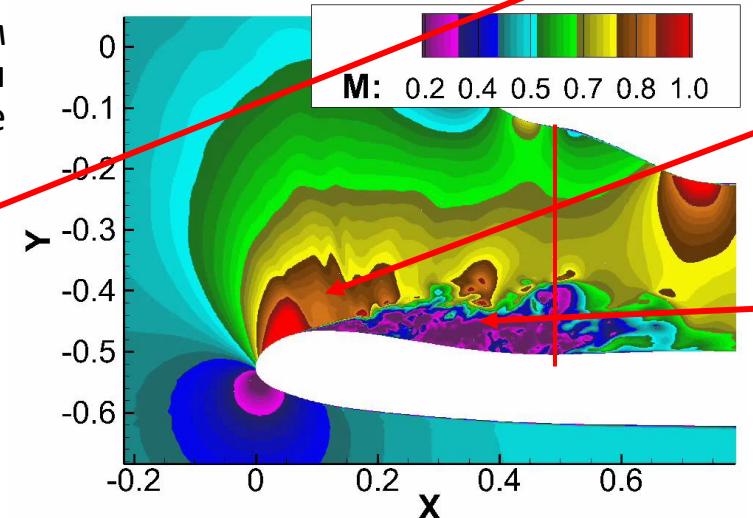
Течение в канале ВЗ при невозмущенном набегающем потоке практически стационарное, отрывные зоны отсутствуют. Мгновенное поле скорости практически симметрично относительно вертикальной оси.

Область отрыва может быть несимметрична относительно вертикальной оси, а смещена вбок. Это связано с тем, что пульсации скорости при выбранных параметрах турбулентности ($U_{0rms} = 15\text{м/c}$) могут существенно превышать вертикальную компоненту средней скорости набегающего потока (ок. 8 м/с при угле атаки 5°)

Набегающий поток с КМВ



На нижней части обечайки поток в отдельные моменты времени разгоняется до сверхзвуковой скорости и тормозится в системе скачков уплотнения.

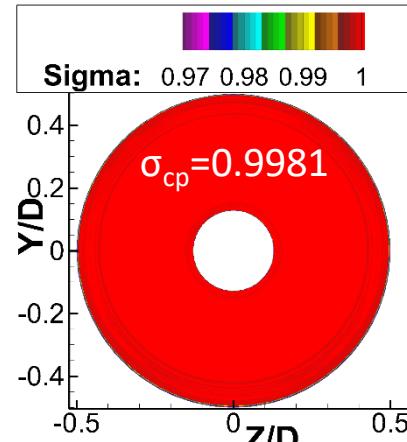


В некоторые моменты времени интенсивность скачка достаточно велика и его взаимодействие с погранслоем приводит к его отрыву.

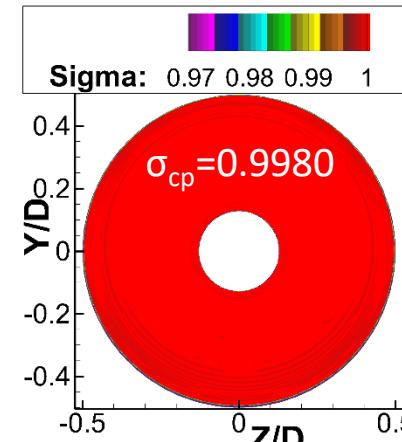
Влияние КМВ и α на осредненный уровень потерь полного давления в выходном сечении ВЗ

Осредненный к-т сохранения полного давления в выходном сечении

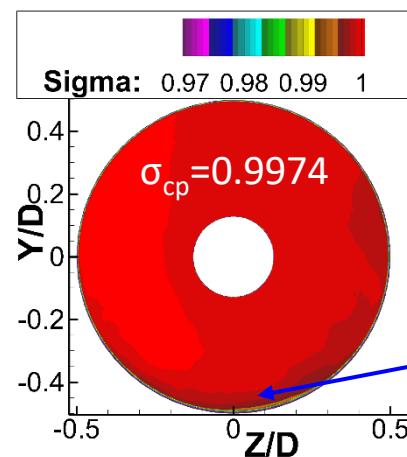
№ 1, $\alpha=5^\circ$



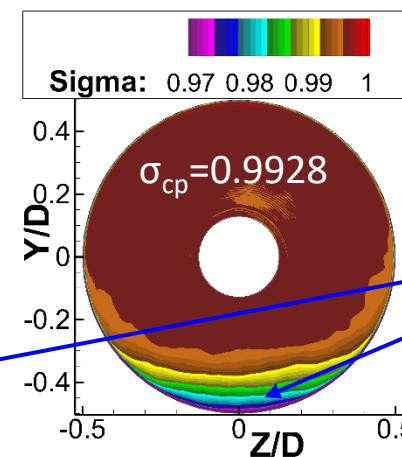
№ 3, $\alpha=12^\circ$



№ 2, $\alpha=5^\circ$



№ 4, $\alpha=12^\circ$



- При **невозмущенном набегающем потоке** потери полного давления при обоих углах атаки пренебрежимо малы – на **большей части площади выходного сечения** значения σ_{cp} составляют не менее 0.999.
- При **набегающем потоке с КМВ** в поле σ_{cp} в выходном сечении **области возникновения отрыва** появляется участок, в котором σ_{cp} имеет **пониженные значения** по сравнению со случаем невозмущенного набегающего потока.
- Максимальная толщина отрывной зоны** в радиальном направлении составляет **0.2D** при $\alpha=12^\circ$ против **0.1D** при $\alpha=5^\circ$.
- На стенке в **нижней точке выходного сечения** значения σ_{cp} при $\alpha=12^\circ$ составляет **0.916** против **0.945** при $\alpha=5^\circ$.

Влияние КМВ и α на интенсивность турбулентных пульсаций параметров течения в выходном сечении ВЗ

Влияние турбулентности на средние параметры в выходном сечении ВЗ

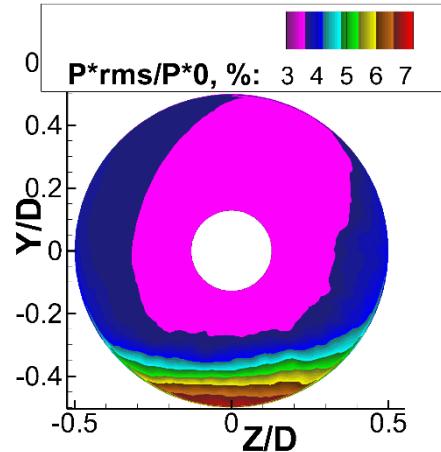
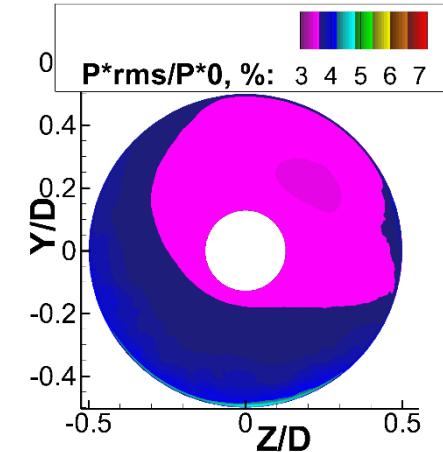
№ расчета / параметр	№ 1, $\alpha=5^\circ$	№ 2, $\alpha=5^\circ$	№ 3, $\alpha=12^\circ$	№ 4, $\alpha=12^\circ$
$U_{rms}/U_h, \%$	<0.1	6.8	0.16	9.8
$P_{rms}/P_h, \%$	<0.1	2.9	0.10	3.1
$P_{rms}^*/P_h^*, \%$	<0.1	3.6	<0.1	3.86
σ	0.9981	0.9974	0.9980	0.9928

- $\max(P_{rms}^*/P_h^*)$ при $\alpha=12^\circ$ составляет 6.9-7.0 %, при $\alpha=5^\circ$ - 4.6-4.7%, достигается в отрывной области.
- В остальной части выходного сечения величина P_{rms}^*/P_h^* для обоих углов атаки составляет 3.5-3.6 %.
- $\max(P_{rms}/P_h)$ достигается в отрывной области и составляет при $\alpha=12^\circ$ - 4.3-4.4 %, а при $\alpha=5^\circ$ - 3.0-3.1 %.
- В остальной части выходного сечения величина P_{rms}/P_h для обоих углов атаки составляет 2.8-2.9 %.

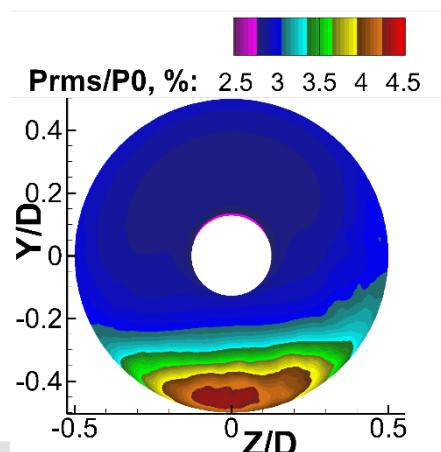
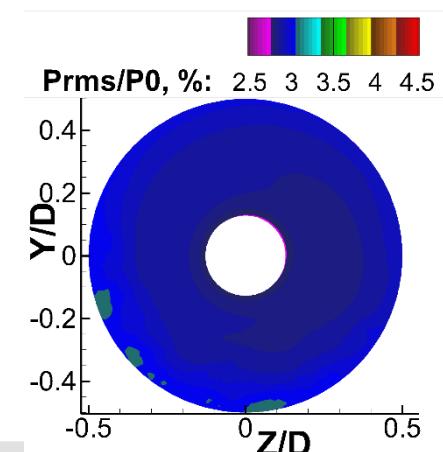
№ 2, $\alpha=5^\circ$

№ 4, $\alpha=12^\circ$

Пульсации полного давления



Пульсации статического давления



Выводы

- С помощью комбинированного RANS/ILES(i) метода высокого разрешения исследовано влияние КМВ в набегающем потоке при разных углах атаки на работу модельного дозвукового ВЗ, типичного для пассажирских самолетов. Параметры набегающего потока, соответствовали взлету самолета: число Маха 0.3, угол атаки 5° и 12° . Расчеты проведены при двух состояниях набегающего потока: невозмущенном и нестационарном с линейным масштабом вихрей $L_t/D = 2$ и $U_{0\,rms} = 15$ м/с.
- Установлено, что КМВ в набегающем потоке приводят к существенной нестационарности течения в канале ВЗ. Возникает «блуждающая» в азимутальном направлении отрывная зона на нижней половине канала ВЗ.
- Установлено, что средняя по площади выходного сечения величина σ_{cp} при добавлении КМВ изменяется незначительно.
- Получено, что при увеличении α с 5° до 12° при набегающем потоке с КМВ в выходном сечении увеличивается толщина области возникновения отрывной зоны с $0.1D$ до $0.2D$.
- Минимум значения σ_{cp} в выходном сечении ВЗ достигается в области возникновения отрывной зоны у нижней стенки канала и составляет 0.945 при $\alpha=5^\circ$ и 0.916 при $\alpha=12^\circ$.
- Максимум уровня пульсаций полного давления в выходном сечении ВЗ также достигается в указанной области и составляет 4.6-4.7 % при $\alpha=5^\circ$ и 6.9-7.0 % при $\alpha=12^\circ$. При этом в остальной части выходного сечения уровень пульсаций полного давления почти не меняется с изменением угла атаки и составляет 3.5-3.6 %.

RANS/ILES(i) метод с SST моделью турбулентности.

Предварительные результаты

RANS/ILES(i) метод с SST моделью турбулентности

За основу взят метод IDDES [M. S. Gritskevich, · A. V. Garbaruk, J. Schütze, · F. R. Menter Development of DDES and IDDES Formulations for the k- ω Shear Stress Transport Model. // Flow Turbulence Combust. DOI 10.1007/s10494-011-9378-4]

Однако, в него были внесены некоторые изменения в соответствии с идеологией RANS/ILES(i), первоначально разработанного для модели SA [Любимов Д.А., Честных А.О. Исследование RANS/ILES-методом течения в высокоскоростном воздухозаборнике смешанного сжатия на различных режимах работы // ТВТ. 2018. Т. 56. № 5. С. 729.]

Уравнения для SST модели турбулентности применительно к методу IDDES имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) &= \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \rho \sqrt{k^3} / l_{DDES} \\ \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \omega) &= \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega \frac{\nabla k \cdot \nabla \omega}{\omega} + \alpha \frac{\rho}{\mu_t} P_k - \beta \rho \omega^2\end{aligned}$$

Для RANS/ILES(i) метода масштаб длины l_{DDES} заменен на d_{ILES} :

$$d_{ILES} = \max(d_\Delta, d_f)$$

Входящие в соотношение для d_{ILES} величины зависят от расстояния до стенки:

$$\begin{aligned}d_\Delta &= d, \text{ при } d \leq C_\Delta \Delta_{max}, & d_\Delta &= 10^{-6} H, \quad \text{при } d > C_\Delta \Delta_{max} \\ d_f &= d f_d, \quad \text{при } f_d \geq f_{dmin}, & d_f &= 10^{-6} H, \quad \text{при } f_d < f_{dmin}\end{aligned}$$

Функция f_d имеет структуру аналогичную использованной в методе IDDES [Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.K., Travin A.K. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities // Int. J. Heat Fluid Flow. 2008. V. 29. P. 1638–1649.]:

$$f_d = \max(f_{dt}, f_b)(1 + f_e)$$

В выражении для f_d функции f_b , f_e и Ψ такие же, как и в методе IDDES. Функция f_{dt} определена следующим образом:

$$f_{dt} = \text{th}((C_{dt} r_{dt})^{Cdt2})$$

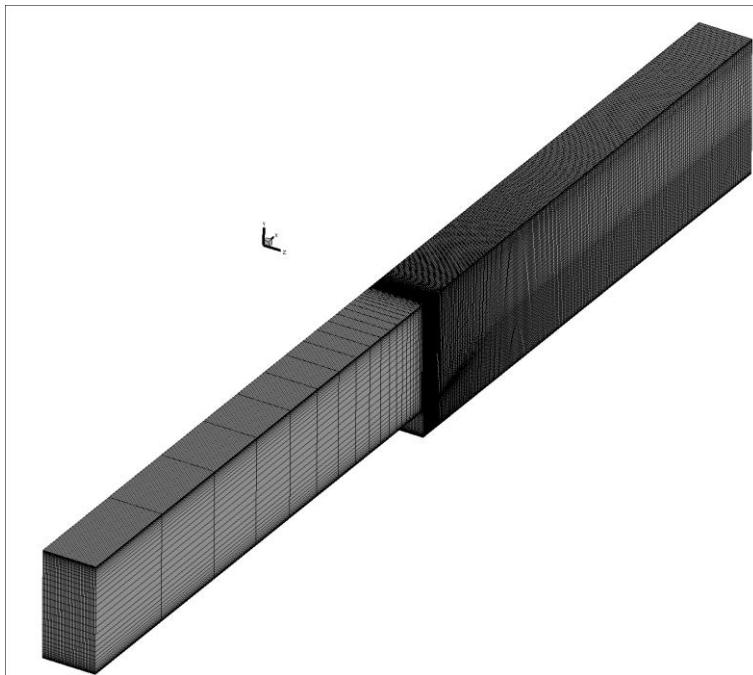
Значения C_{dt1} и C_{dt2} выбирались на основе тестовых расчетов. Другие функции, входящие в выражения для f_d и f_{dt} , совпадают с аналогичными в методе IDDES.

Особенности решения уравнений для модели турбулентности

- Уравнения для k и ω решались последовательно по неявной схеме.
- Обновление значений параметров производилось после решения обоих уравнений.
- Параметры на гранях ячеек в конвективных членах уравнений аппроксимировались с помощью противопоточной схемы второго порядка (TVD2), либо пятого (WENO5).
- Диффузионные члены аппроксимировались также на гранях ячеек с помощью центрально разностной схемы второго порядка.

Обтекание обратного уступа, параметры задачи

Общий вид расчетной области



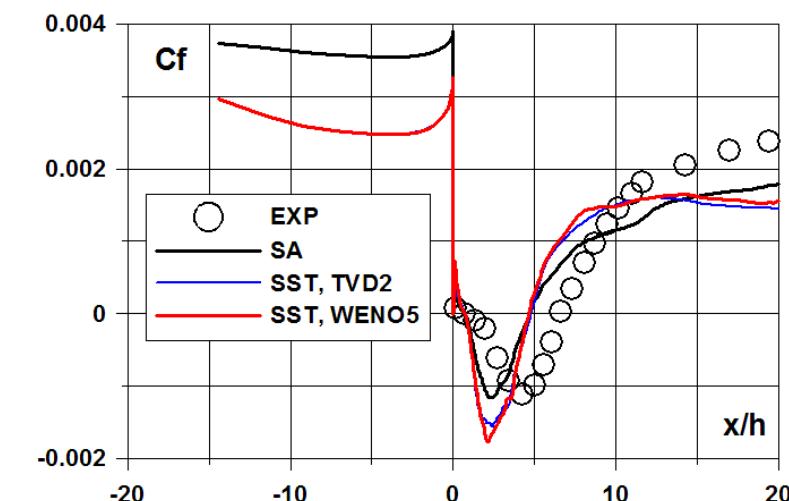
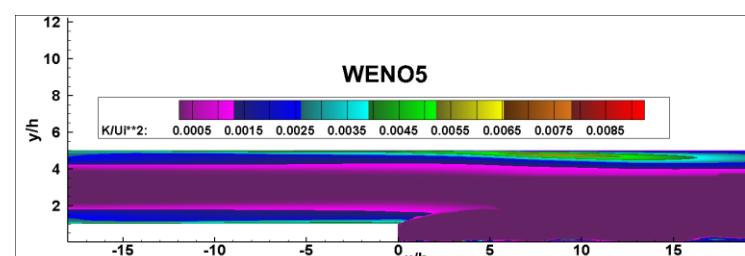
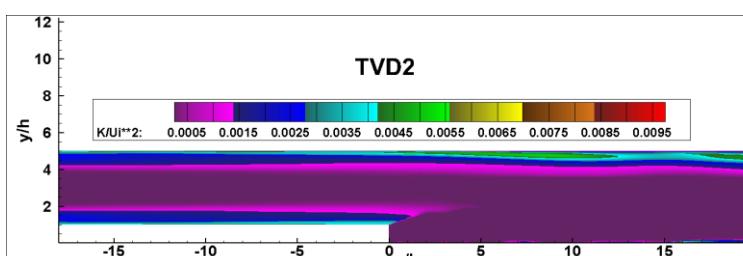
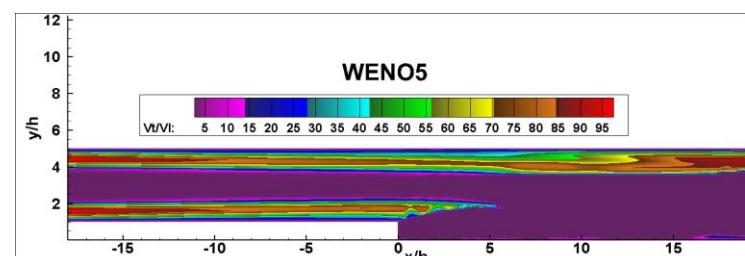
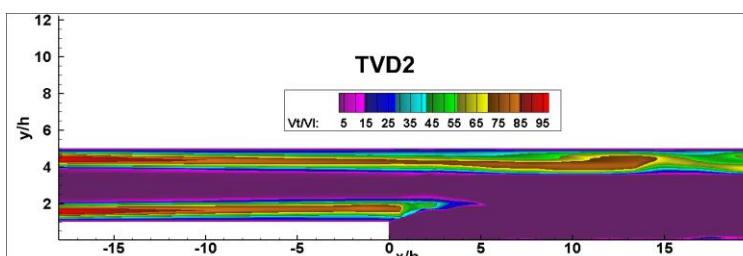
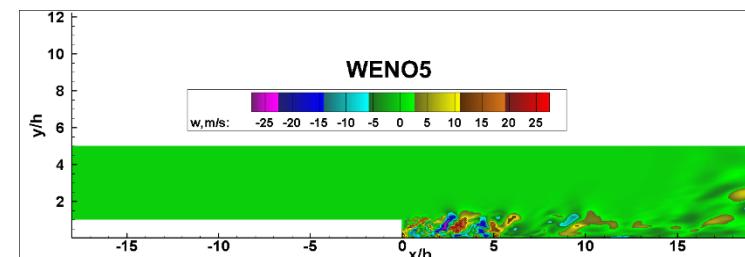
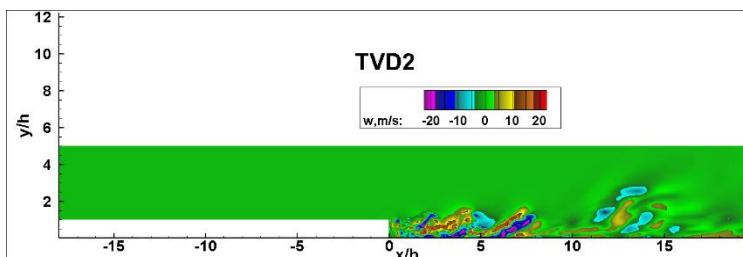
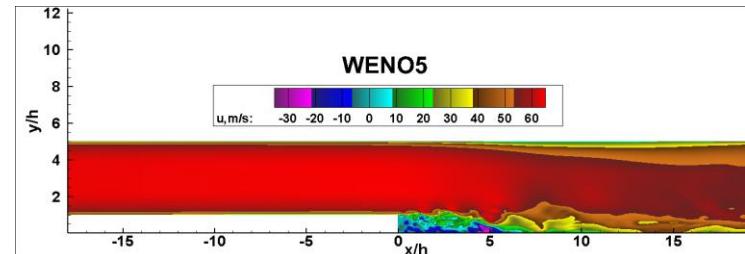
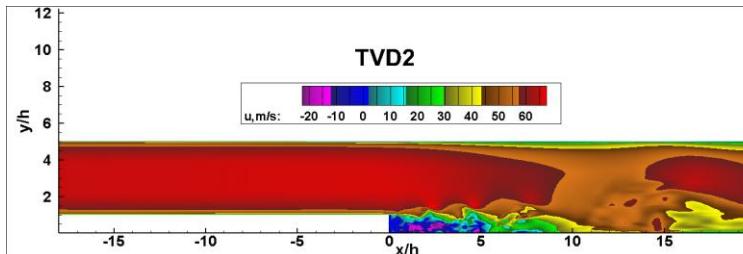
Сетка: $25 \times 40 \times 40 + 280 \times 80 \times 40$ ячеек

Параметры потока: $P_0 = 1000\text{КПа}$, $P_e = 98\text{КПа}$, $T = 300\text{K}$, $\text{Re} = 2.8 \times 10^4$

Границные условия

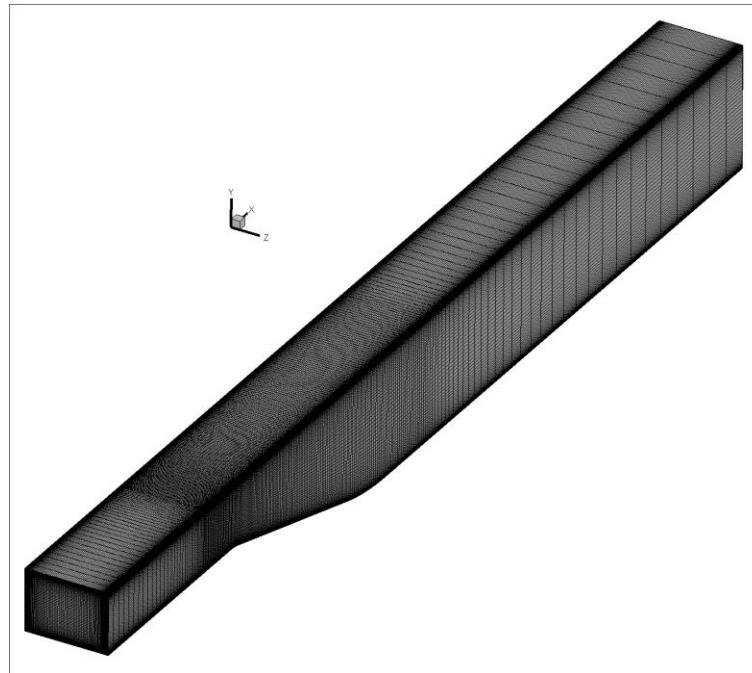
- На верхней и нижней и прилипание/функция стенки.
- На боковых стенках условие периодичности.
- На входе полные параметры и угол наклона вектора скорости.
- На выходе постоянное статическое давление.

Обтекание обратного уступа. Влияние способа аппроксимации конвективных членов



Асимметричный модельный диффузор, параметры задачи

Общий вид расчетной области



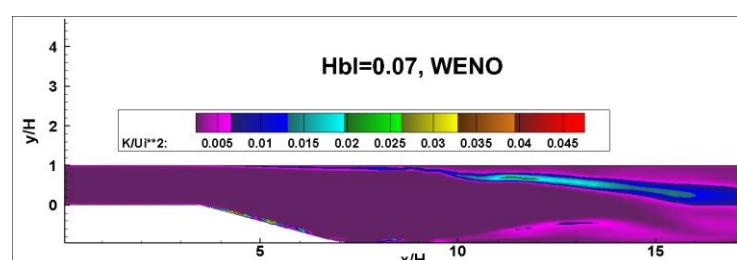
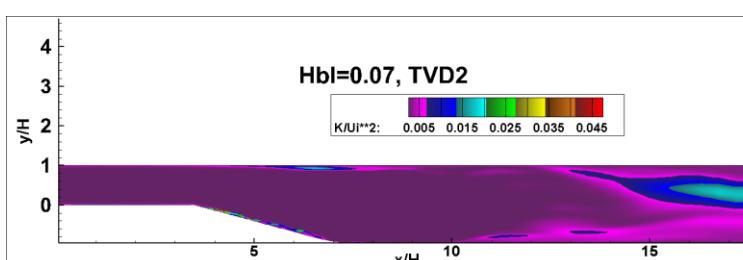
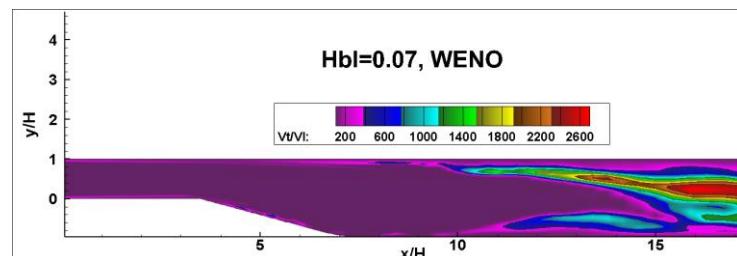
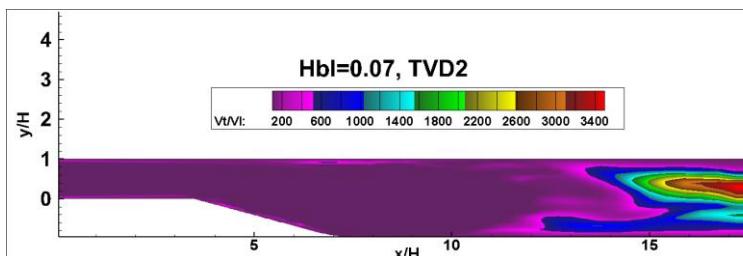
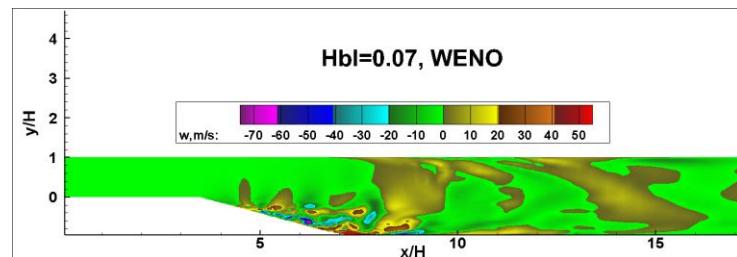
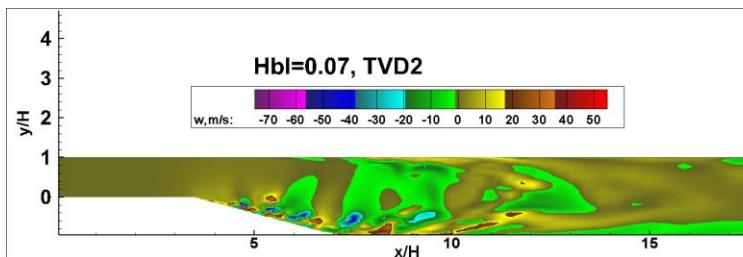
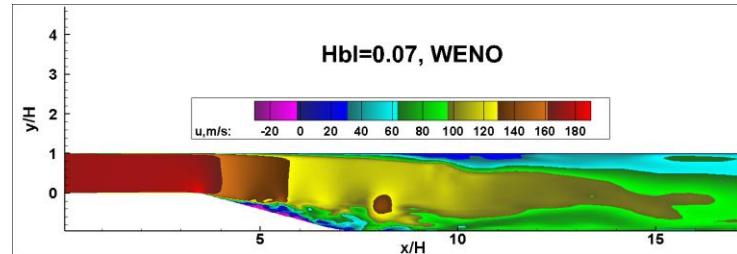
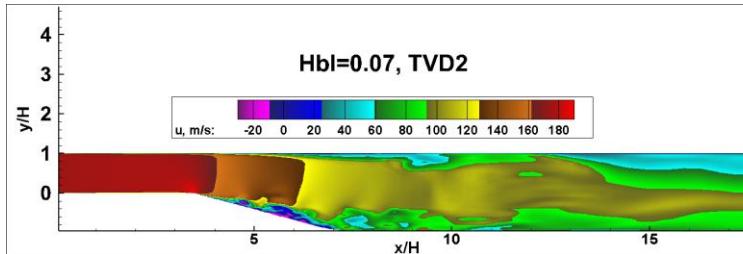
Сетка 225X80X100 ячеек

Параметры потока: $P_0=1000\text{КПа}$, $T=300\text{K}$, $P_e=93.7\text{КПа}$, $\text{Re}=5.2\times10^5$

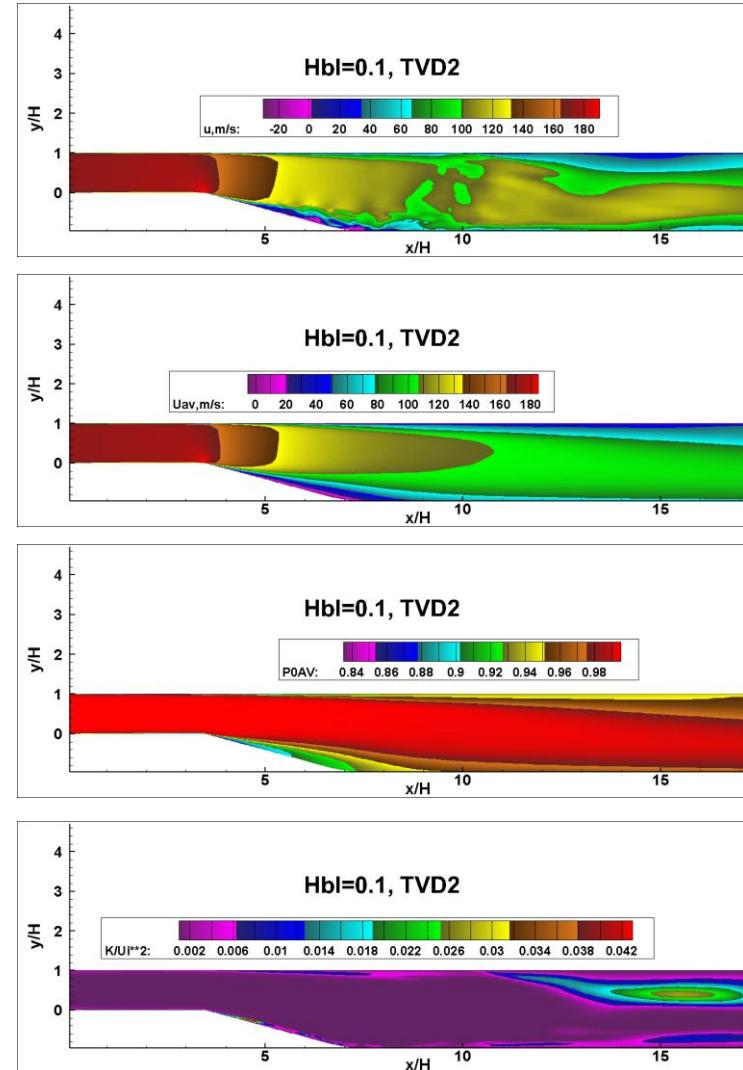
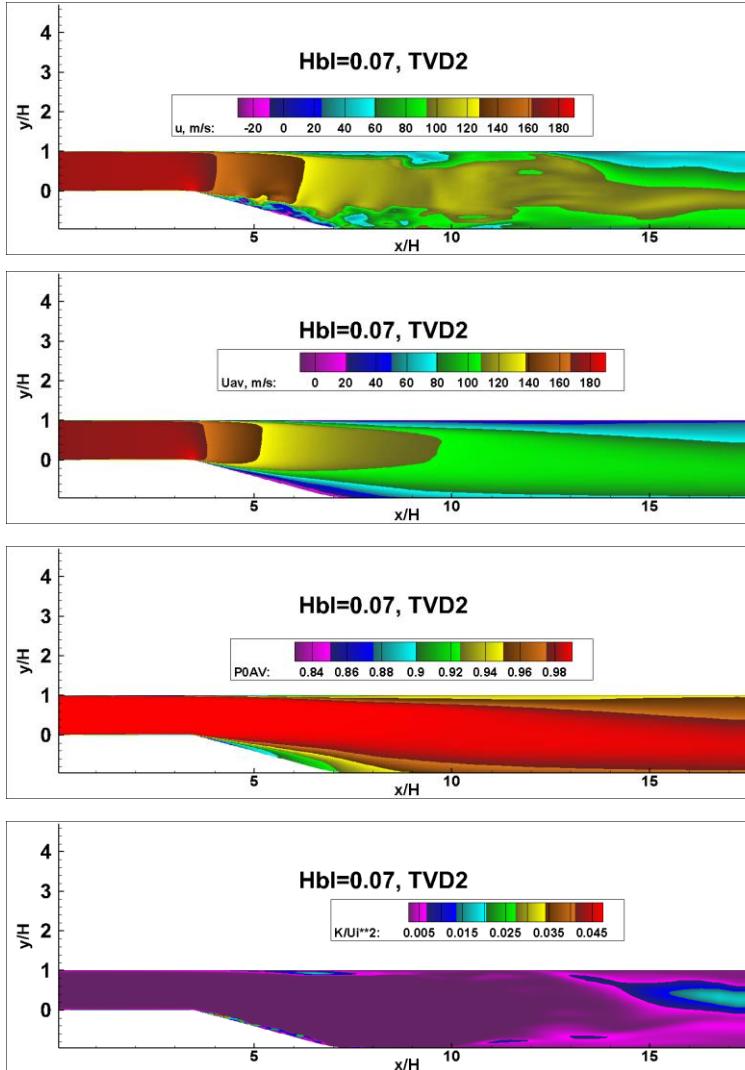
Границные условия

- На верхней, нижней и боковых стенках комбинированное условие прилипание/функция стенки.
- На входе полные параметры и угол наклона вектора скорости.
- На выходе постоянное статическое давление.

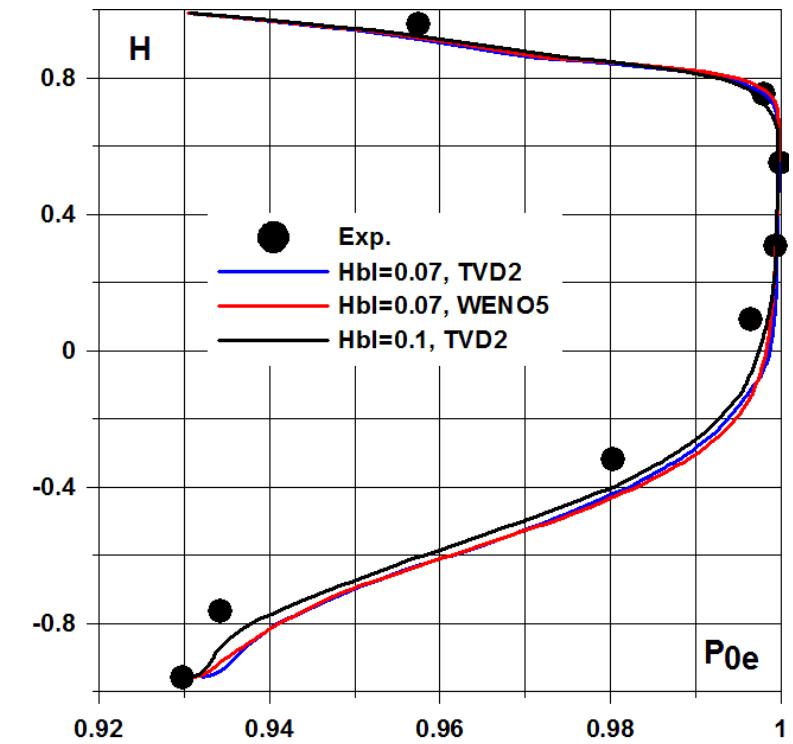
Асимметричный модельный диффузор. Влияние способа аппроксимации конвективных членов параметры задачи



Асимметричный модельный диффузор. Влияние толщины ПС на входе



Распределение осредненного полного давления по высоте канала в плоскости симметрии при $x/H=7.63$





Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова

Спасибо за внимание!

111116, Россия, Москва,
ул. Авиамоторная, 2
www.ciam.ru

Тел.: +7 (499) 763-61-67
E-mail: info@ciam.ru