



## ПМ Лазурит в 2025 году.

Жигалкин А.С., Любимов Д.А.



# Характеристики кода

Название кода:	<i>ПМ Лазурит</i>
Что моделируется (классы течений):	<i>сжимаемые течения: дозвук – сверхзвук, аэроакустика</i>
Моделирование турбулентных течений:	<i>RANS, URANS, RANS/ILES</i>
Сетки и сеточные технологии:	<i>структурированные многоблочные криволинейные сетки, импорт сеток и граничных условий из CFD-GEOM, ручное построение сеток и задание граничных условий</i>
Численные методы:	<i>Конечно-объемные Переменные: физические Порядок аппроксимации по пространству 1-9 для предраспадных параметров в схеме Roу</i>
Интегрирование по времени:	<i>неявная схема (dual time stepping)</i>
Ускорение вычислений:	<i>OpenMP-MPI</i>
Язык программирования:	<b>FORTRAN</b>

## Где что заявлено

- **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020615925 Российская 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 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».**
  - **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025681475 Российская 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/ILES(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.

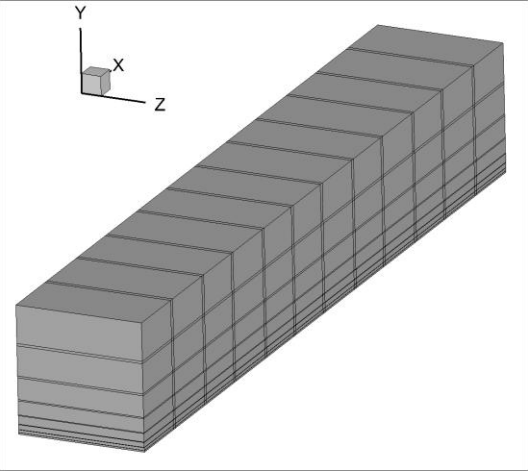
# Моделирование RANS/ILES(i) методом погранслоя на плоской пластине без градиента давления при различных числах Маха

# 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  $M_\infty$  (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 развивающего 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]:  $T_\infty=288.15$  K и  $\rho_\infty=1.225$  кг/м<sup>3</sup>.
  - 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  $p_\infty$ .
- 
- 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  $Re_\tau=252$ . Для напряжений Рейнольдса использовалось неравномерное вертикальное распределение из сечения  $Re_\tau=252$  “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  $Re_\tau=252$  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 погранслоя 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 $M_e=2$

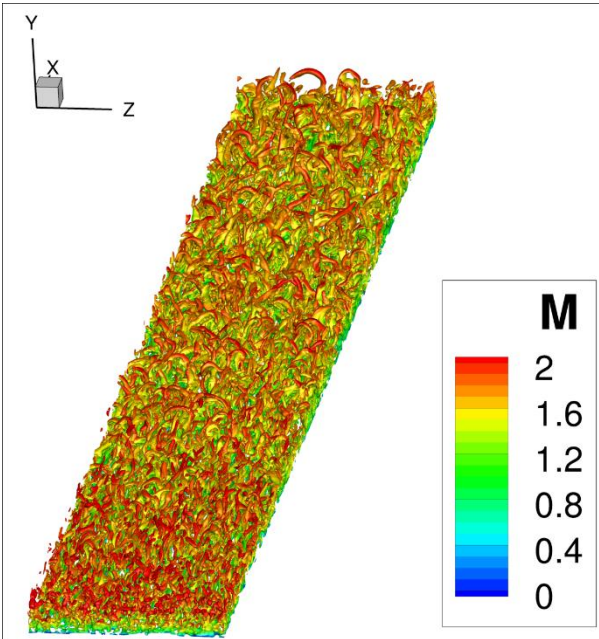
№	Метод	$(L_x \times L_y \times L_z) \delta_{99,t}$	$\Delta Re_{\vartheta,1}$	$\Delta Re_{\vartheta,2}$	$\Delta x / \delta_{99,t}$	$\Delta x^+$	$\Delta z^+$	$\Delta \bar{t}$	$\Delta y_{\min} / \delta_{99,t}$	$\Delta y^+_{\min}$	$\Delta y^+_{\max}$	$N_x \times N_y \times N_z$	$N_z \times 10^{-6}$
1	RANS/ILES(i)	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 ( $\Delta x^+$ ,  $\Delta y^+$  и  $\Delta z^+$ ) применительно к рассматриваемой задаче как правило выражают в единицах закона стенки, определенным по параметрам погранслоя 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).

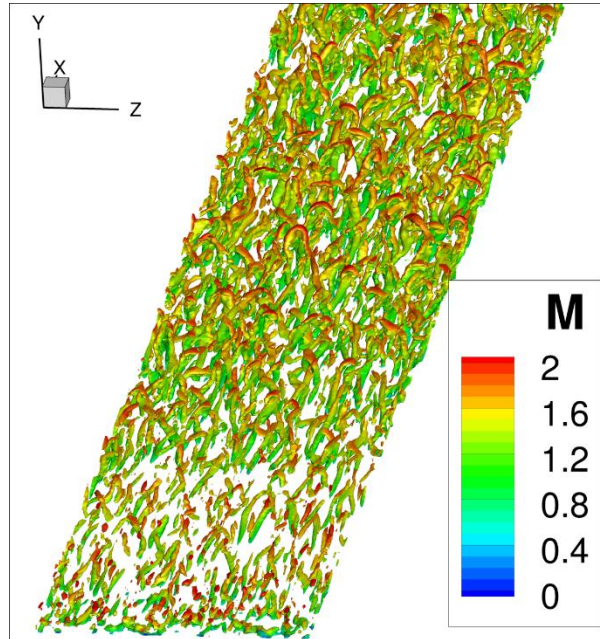


# Влияние величины пристеночного шага. Изоповерхности Q-критерия $Q = 5 \times 10^{12} \text{ 1/c}^2$ .

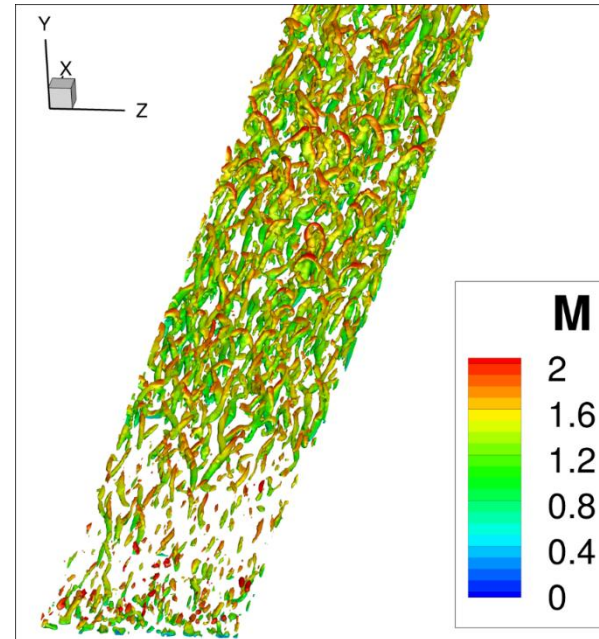
ILES(i)-7,  $(31 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$ ,  
 $\Delta y_{\min}^+ = 0.63$ ,  $N_z = 24.16 \times 10^6$



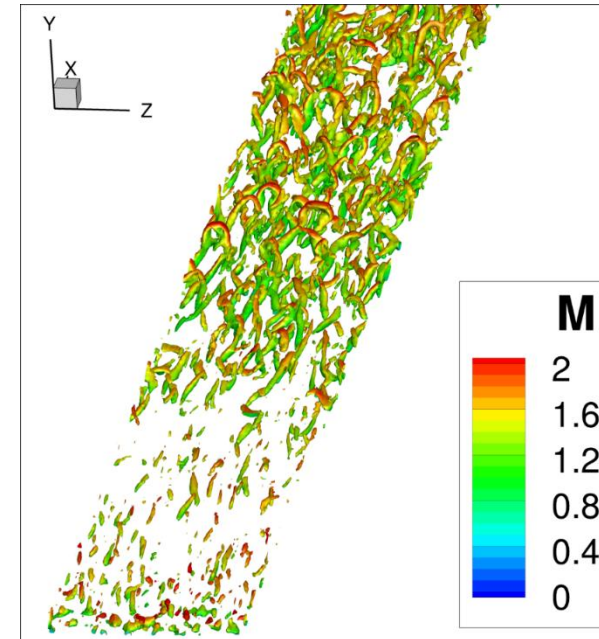
RANS/ILES(i)-6,  $(38 \times 7 \times 7) \delta_{99,t}$ ,  
 $\Delta y_{\min}^+ = 0.85$ ,  $N_z = 5.1 \times 10^6$



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



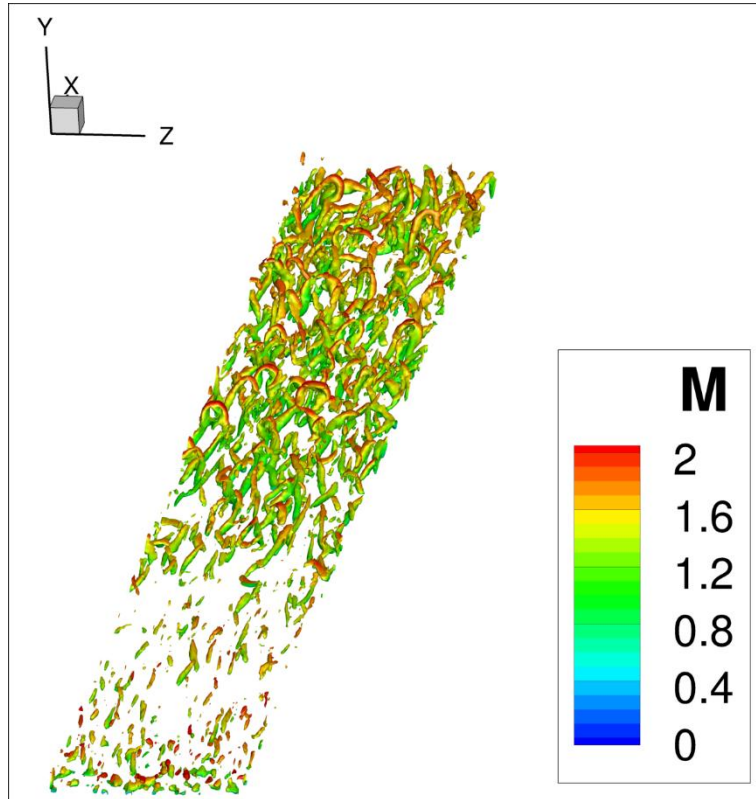
RANS/ILES(i)-3,  $(38 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$ ,  
 $\Delta y_{\min}^+ = 12$ ,  $N_z = 1.40 \times 10^6$



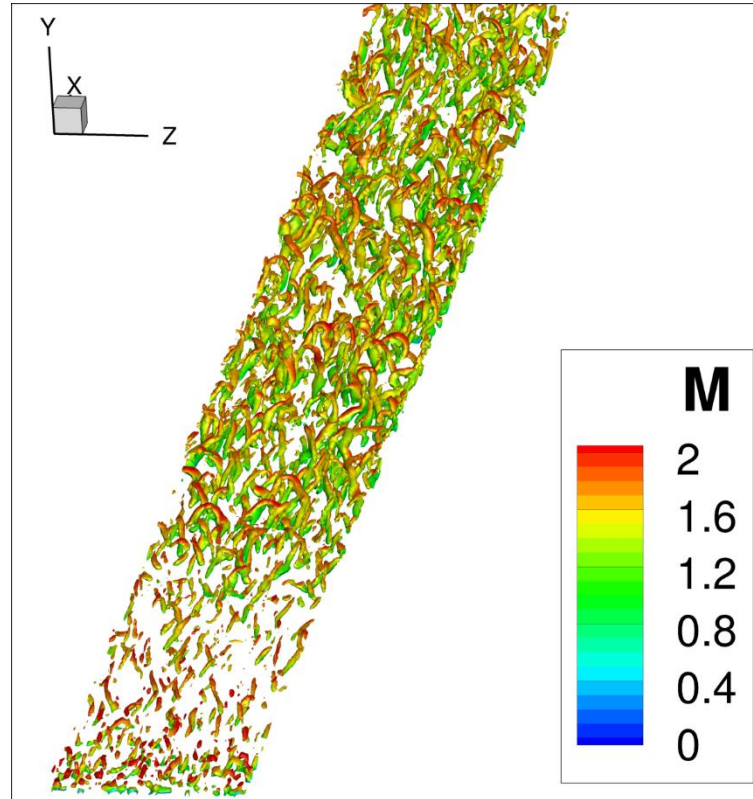
Увеличение  $\Delta y_{\min}^+$  до 6 ведет к некоторому увеличению переходной зоны и небольшому уменьшению числа вихревых структур. При  $\Delta y_{\min}^+ = 12$  число вихревых структур становится еще меньше, а длина переходной зоны растет.

# Влияние длины расчетной области при $\Delta y_{\min}^+ = 12$ . Изоповерхности $Q$ -критерия $Q = 5 \times 10^{12} \text{ 1/c}^2$ .

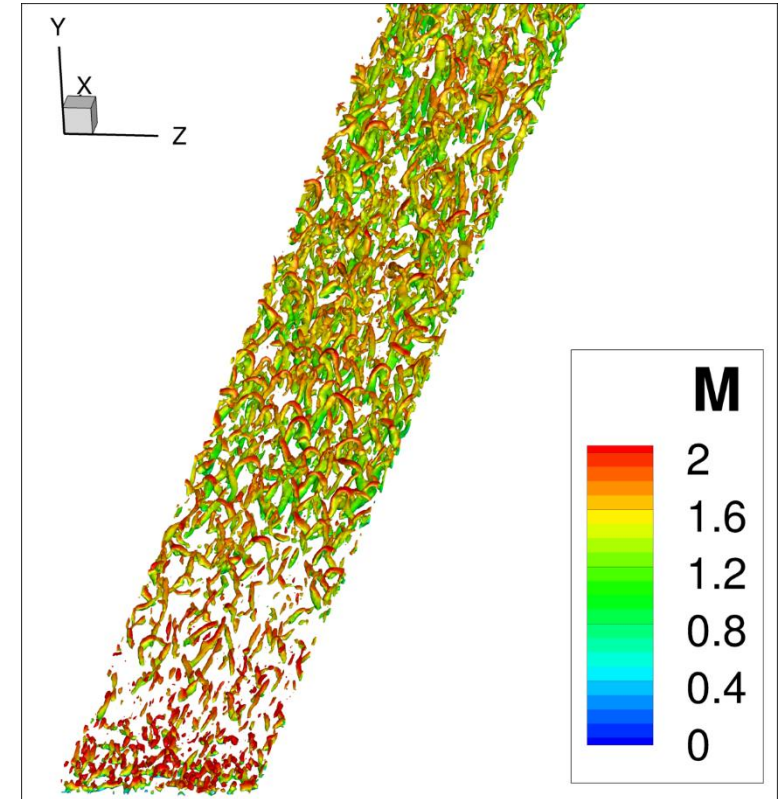
RANS/ILES(i)-3,  $(38 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$ ,  
 $N_z = 1.40 \times 10^6$



RANS/ILES(i)-4,  $(49 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$ ,  
 $N_z = 2.13 \times 10^6$



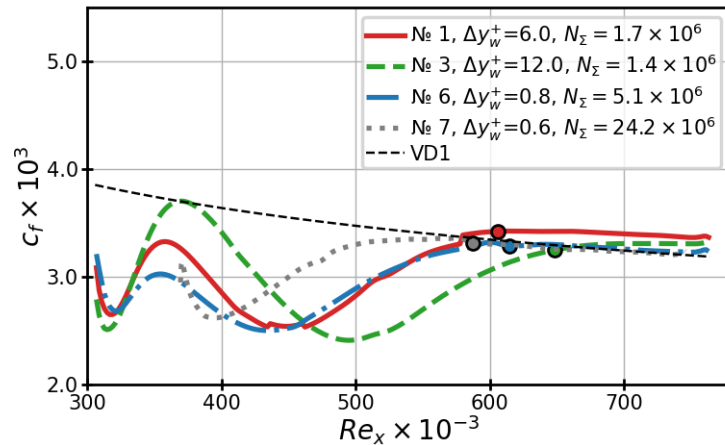
RANS/ILES(i)-5,  $(54 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$ ,  
 $N_z = 2.76 \times 10^6$



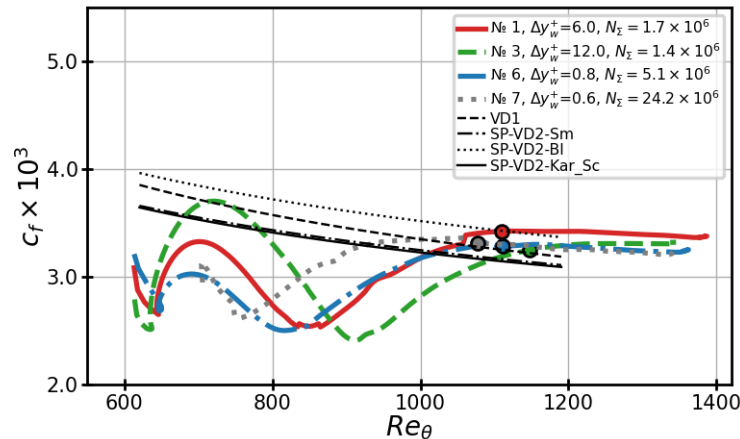
Увеличение длины расчетной ведет к росту числа вихревых структур и уменьшению переходной зоны.

# Влияние величины пристеночного шага на основные параметры ПС

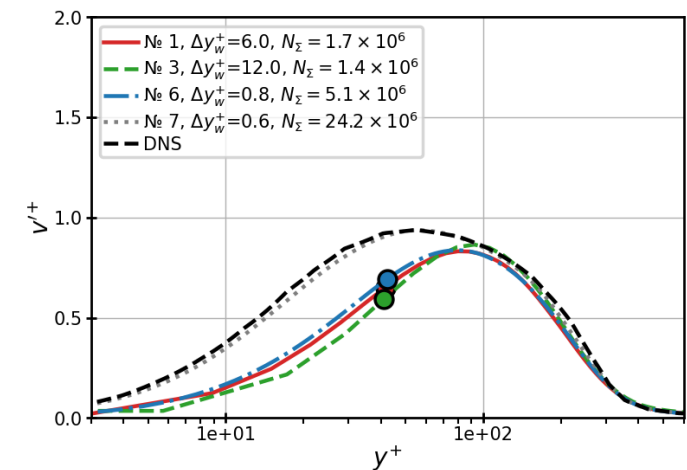
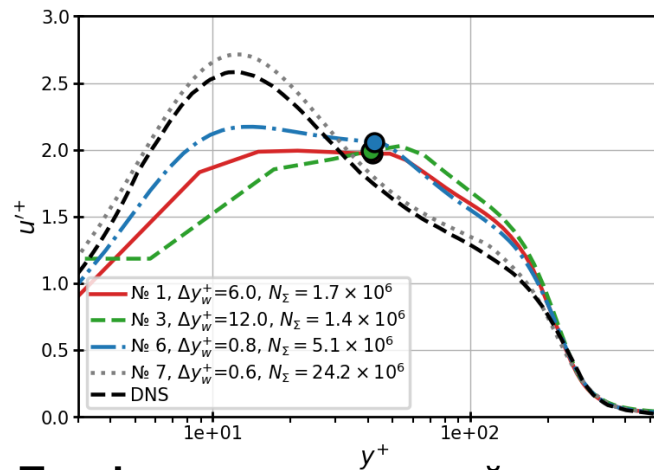
## Коэффициент трения



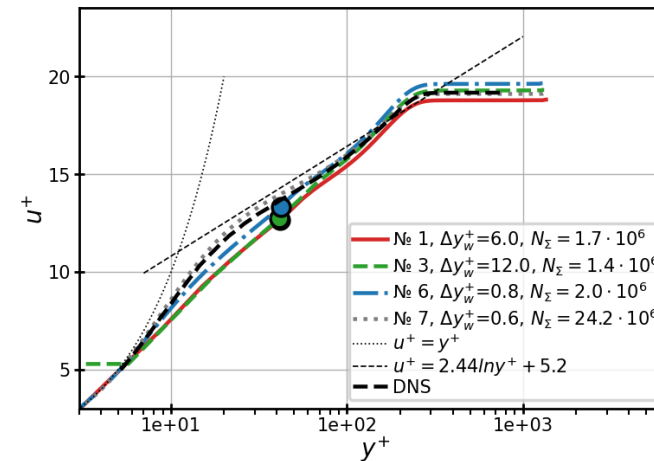
Кружками обозначено положение сечения  $Re_\tau = 252$



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

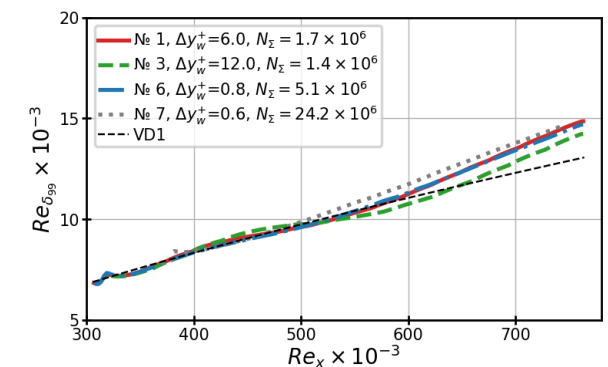


## Профиль осредненной скорости



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

## Распределение $Re_{\delta_{99}}$

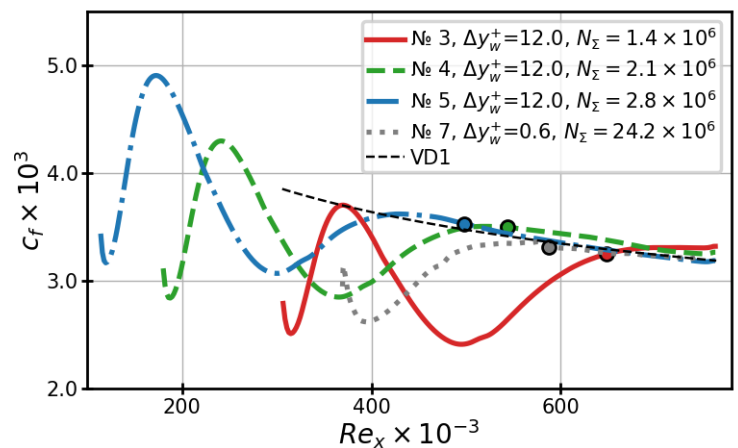


- Во всех приведенных RANS/ILES(i) расчетах происходит восстановление трения.
- При  $\Delta y_w^+ = 12$  длина восстановления трения наибольшая:  $\Delta Re_x \approx 420 \times 10^3$  против  $\Delta Re_x \approx 300 \times 10^3$  в расчетах при  $\Delta y_w^+ = 6$  и  $\Delta y_w^+ = 0.85$ . В целевом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

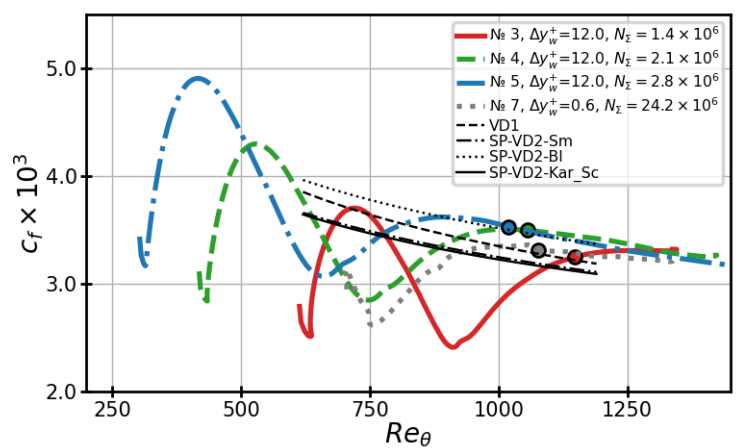


# Влияние длины расчетной области при $\Delta y^+_{min}=12$ на основные параметры ПС

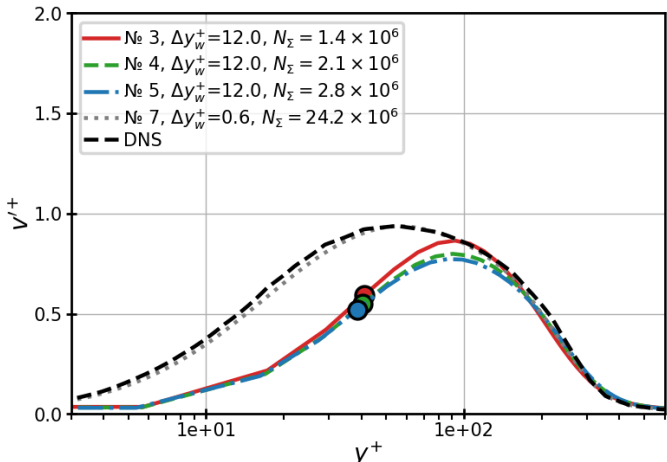
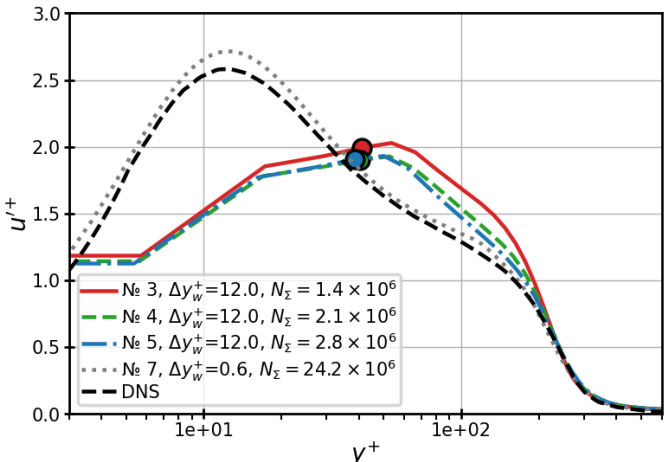
Коэффициент трения



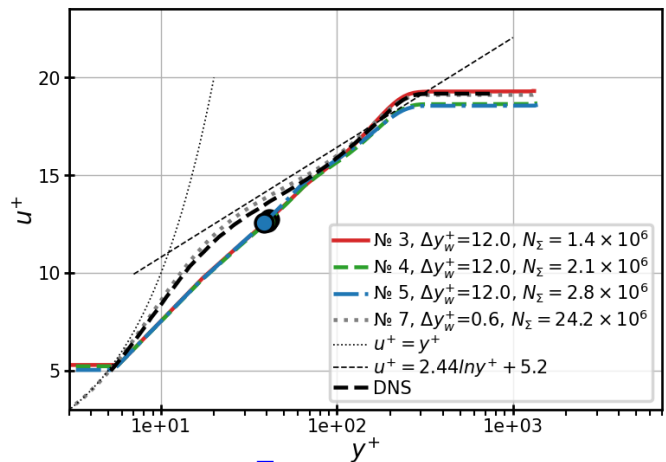
Кружками обозначено положение сечения  $Re_\tau=252$



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

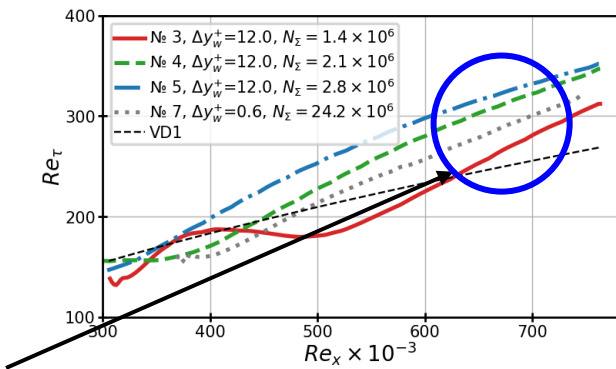


Профиль осредненной скорости



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

$Re_\tau$



- 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  $0.2 \times 10^{-3}$  (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  $0.25 \times 10^{-3}$  (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  $v'$  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  $N_z = 2.13 \times 10^6$  величина  $c_f$  в контрольном сечении оказалась на 6 % больше, чем в ILES расчете с  $N_z = 24.16 \times 10^6$ , 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 смещен 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  $\Delta y_w^+$  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	$(L_x \times L_y \times L_z) \delta_{99,t}$	$\Delta Re_{\vartheta,1}$	$\Delta Re_{\vartheta,2}$	$\Delta x / \delta_{99,t}$	$\Delta x^+$	$\Delta z^+$	$\Delta \bar{t}$	$\Delta y_{\min} / \delta_{99,t}$	$\Delta y^+_{\min}$	$\Delta y^+_{\max}$	$N_x \times N_y \times N_z$	$N_z \times 10^{-6}$	$C_m$
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 диффузионного 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  $\Omega$ .

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

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

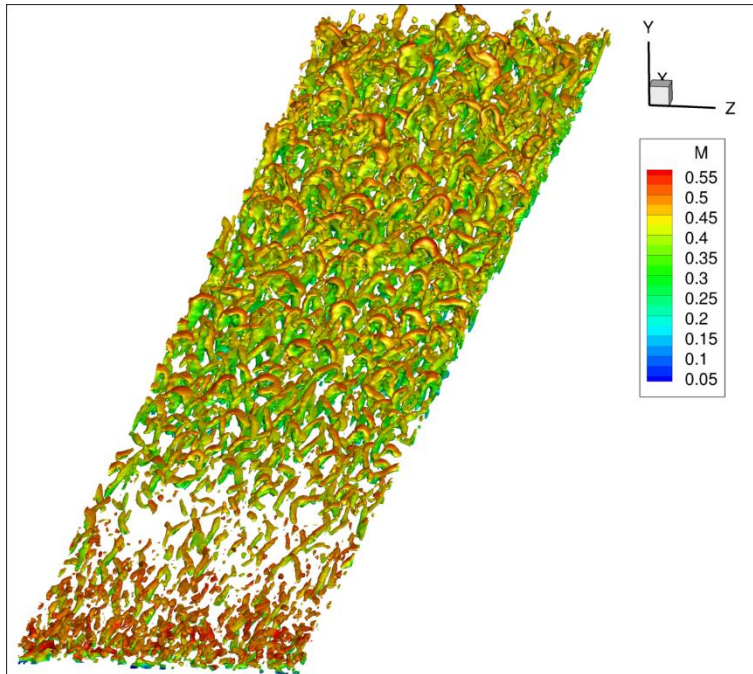
Подробно выбор вида функции  $F_{sum}$ , а также процесс калибровки входящих в ее состав констант, описан в работе [1].

1. А. С. Жигалкин, Д. А. Любимов. Улучшение разрешения RANS/ILES(i) методом турбулентных вихревых структур при дозвуковых числах Маха // ТБТ, 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

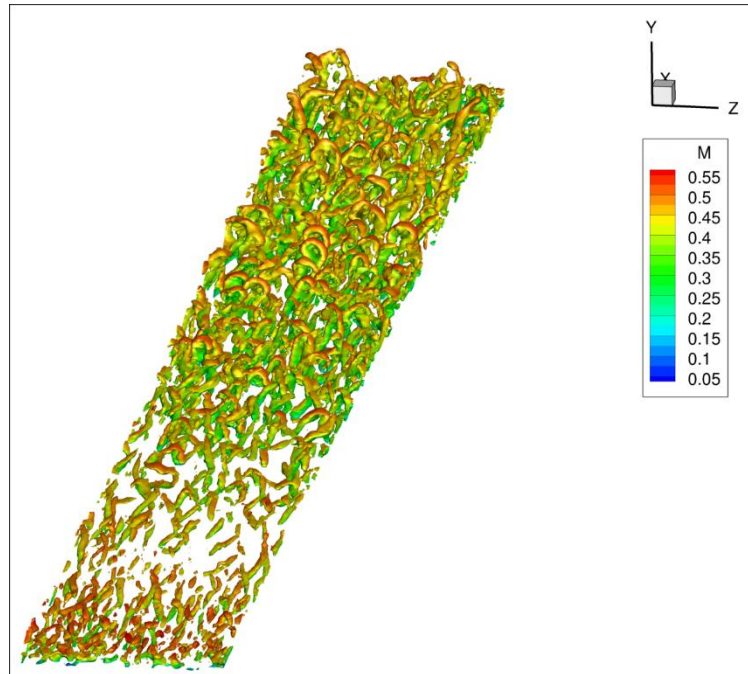


# Влияние размера расчетной области и шага сетки. Изоповерхности $Q$ -критерия $Q=5 \times 10^{10} \text{ 1/c}^2$ .

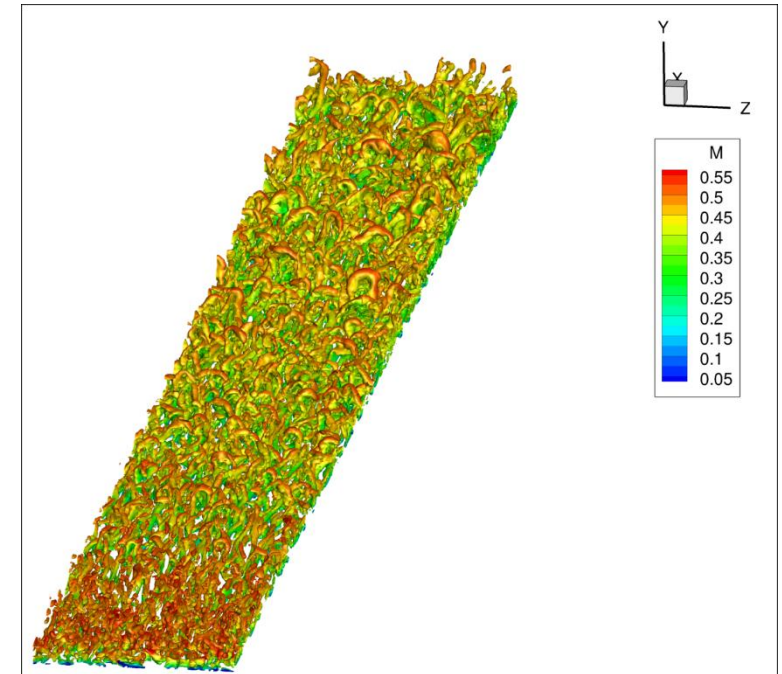
RANS/ILES(i)-1,  $(49 \times 7 \times 7) \delta_{99,t}$ ,  
 $\Delta x^+ = 60$ ,  $N_z = 2.95 \times 10^6$



RANS/ILES(i)-2,  $(44 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$ ,  
 $\Delta x^+ = 60$ ,  $N_z = 1.23 \times 10^6$



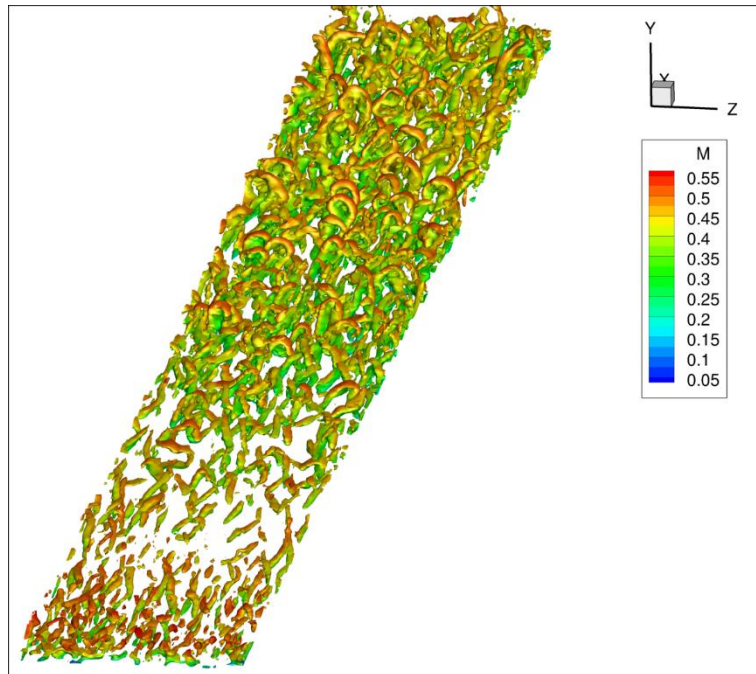
RANS/ILES(i)-3,  $(44 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$ ,  
 $\Delta x^+ = 40$ ,  $N_z = 2.83 \times 10^6$



- Уменьшение  $\Delta x^+$  с 60 до 40 приводит к существенному росту числа вихревых структур, а также сокращению переходной зоны
- Увеличение размеров расчетной области с  $(44 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$  до  $(49 \times 7 \times 7) \delta_{99,t}$  при постоянном  $\Delta x^+$  привело к небольшому сокращению длины переходной зоны.

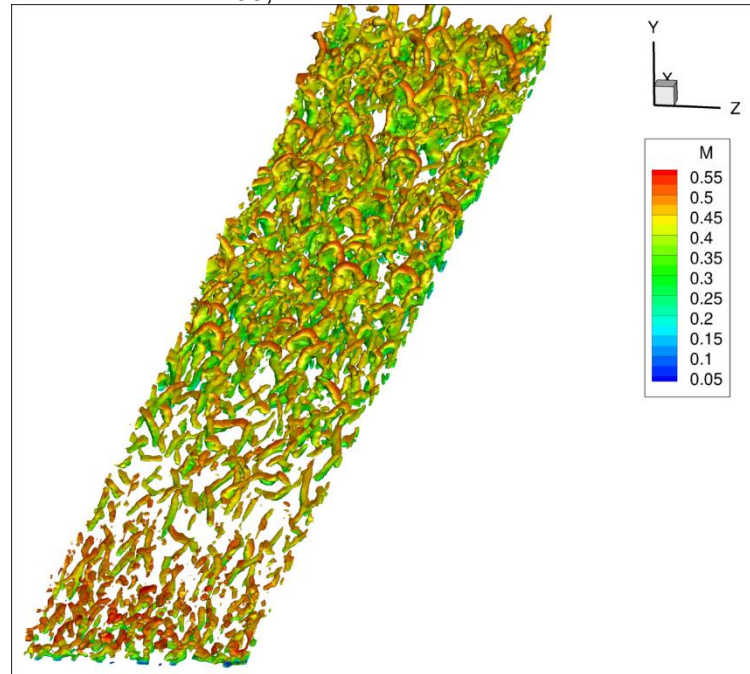
# Влияние $C_m$ . Изоповерхности Q-критерия $Q=5 \times 10^{12} \text{ 1/c}^2$ .

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

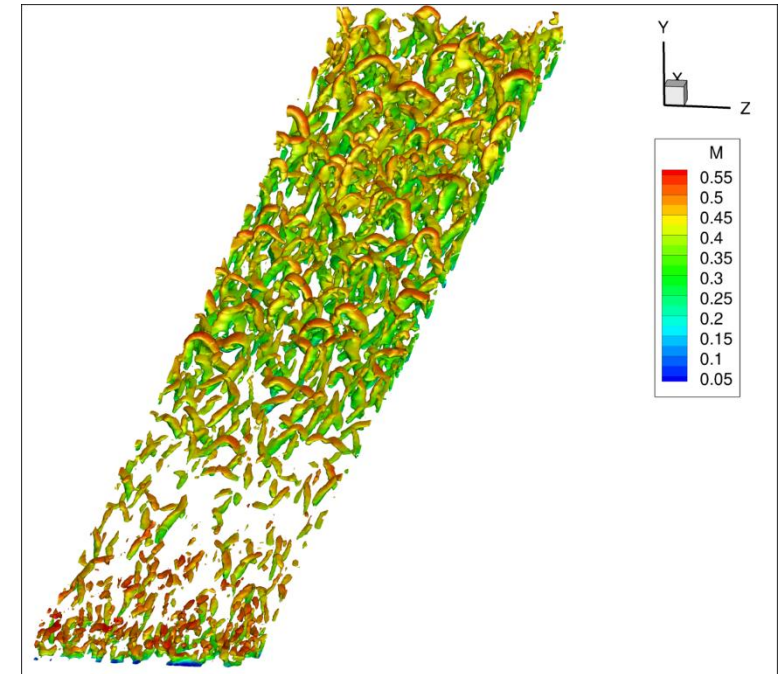


RANS/ILES(i)-4,  $C_m=0.1$

$(44 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$ ,  $\Delta x^+ = 60$ ,  $N_\Sigma = 1.23 \times 10^6$



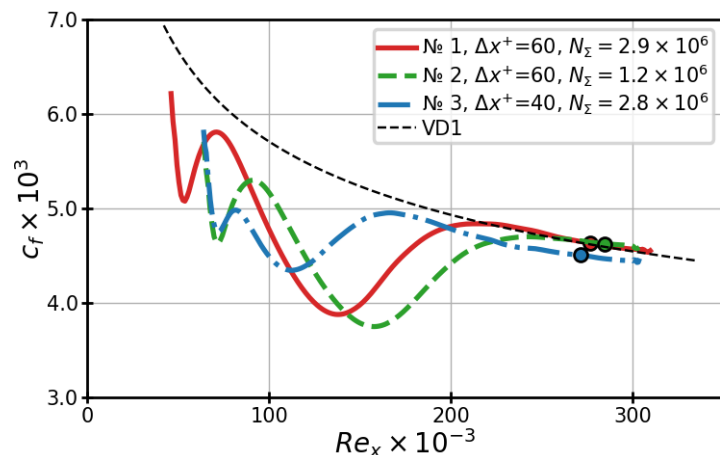
RANS/ILES(i)-5,  $C_m=1.0$



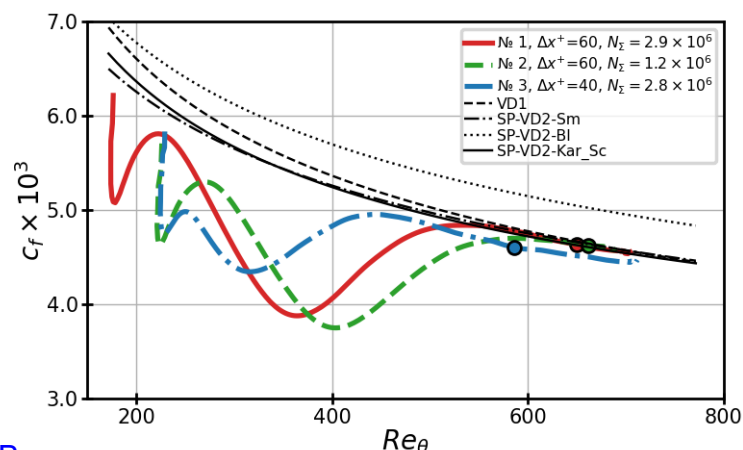
- Уменьшение  $C_m$  с 1.0 до 0.1 приводит к росту числа мелких вихревых структур, а также сокращению переходной зоны.

# Влияние размера расчетной области и шагов сетки $\Delta x^+$ и $\Delta z^+$ на основные параметры ПС

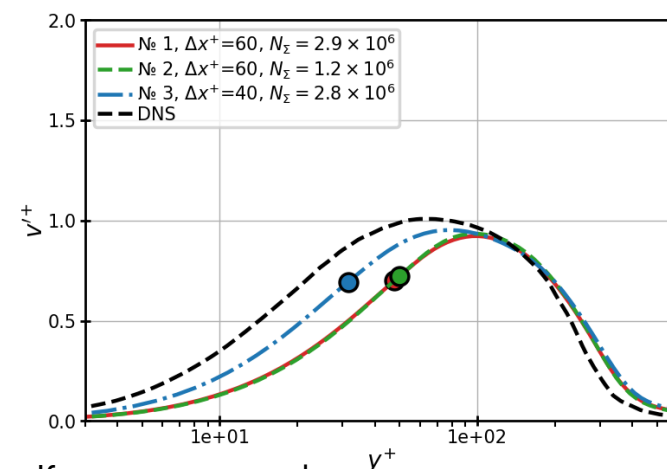
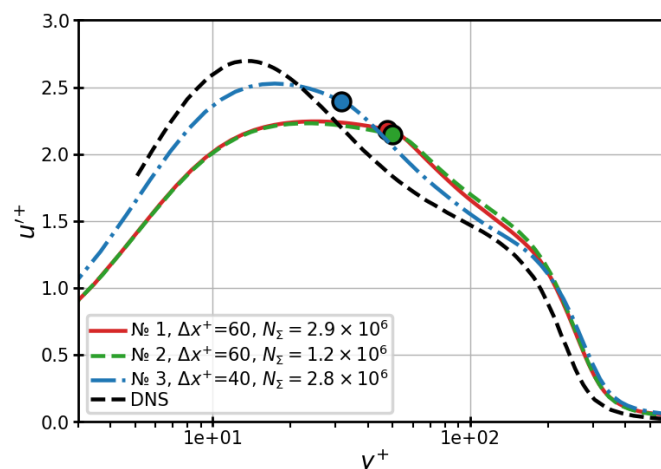
## Коэффициент трения



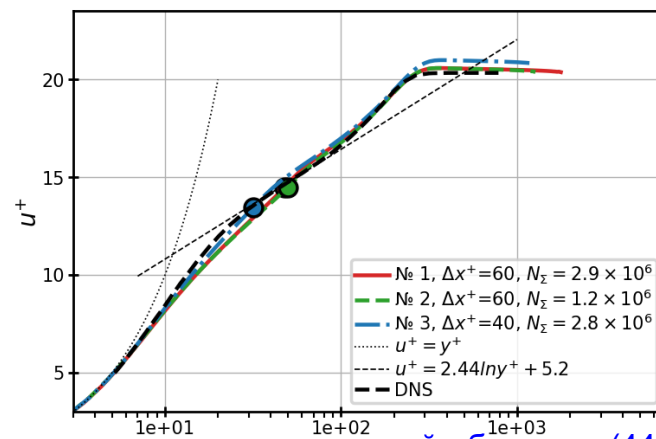
Кружками обозначено положение сечения  $Re_{\tau}=252$



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

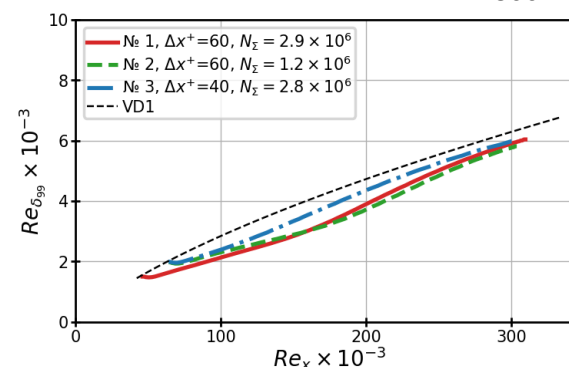


## Профиль осредненной скорости



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  $y^+=30$ .

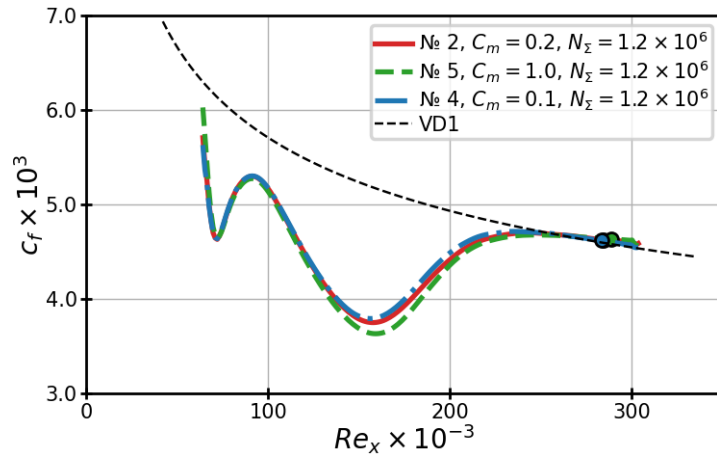
## Распределение $Re_{\delta_{99}}$



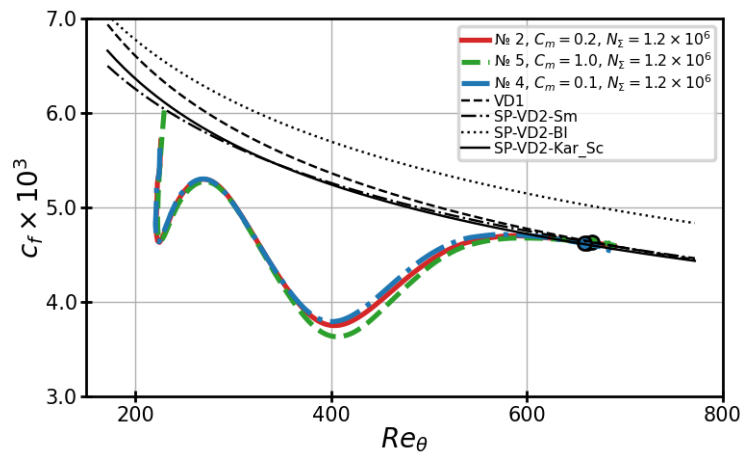
- Восстановление трения происходит во всех расчетах. Увеличение размеров расчетной области с  $(44 \times 5 \times 5) \delta_{99,t}$  до  $(49 \times 7 \times 7) \delta_{99,t}$  дало уменьшение длины переходной зоны  $\Delta Re_x$  с  $200 \times 10^3$  до  $180 \times 10^3$  в расчетах №2 и №1 соответственно.
- Уменьшение шагов расчетной сетки  $\Delta x^+$  и  $\Delta z^+$  с 60 и 20 в расчете №2 до 40 и 15 в расчете №3 привело к уменьшению переходной зоны  $\Delta Re_x$  с  $200 \times 10^3$  до  $110 \times 10^3$ .
- 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

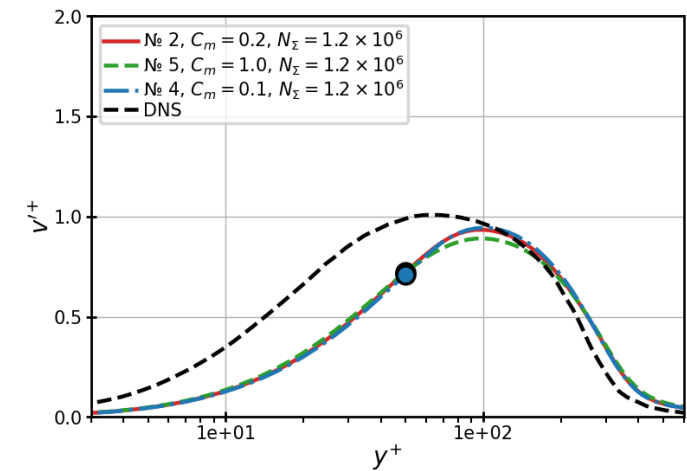
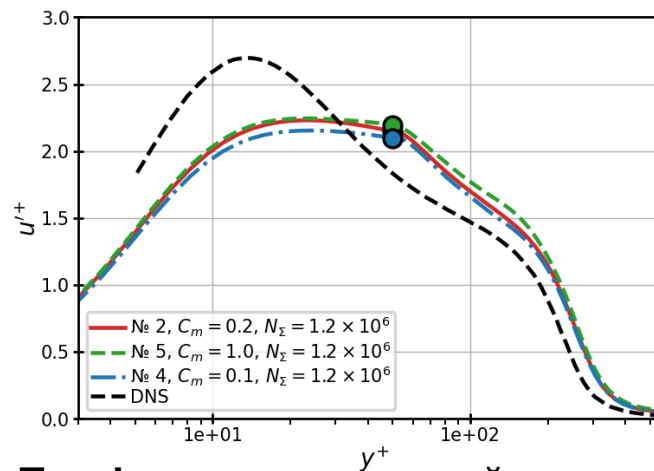
## Коэффициент трения



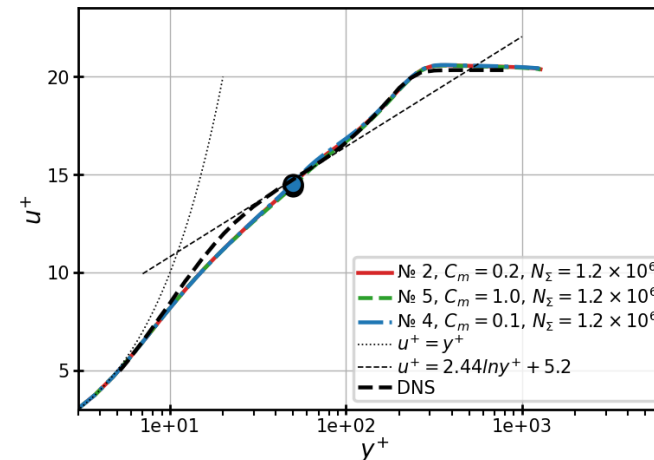
Кружками обозначено положение сечения  $Re_\tau = 252$



## 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. Во всех расчетах оно расположено при  $y^+ = 50$ .

- Уменьшение  $C_m$  на выбранном расчетном режиме не оказало 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  $\Delta Re_x$  с  $200 \times 10^3$  до  $180 \times 10^3$ .
- Уменьшение шагов расчетной сетки  $\Delta x^+$  и  $\Delta z^+$  с 60 и 20 в расчете № 2 до 40 и 15 в расчете № 3 привело к уменьшению переходной зоны  $\Delta Re_x$  с  $200 \times 10^3$  до  $110 \times 10^3$ .
- 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

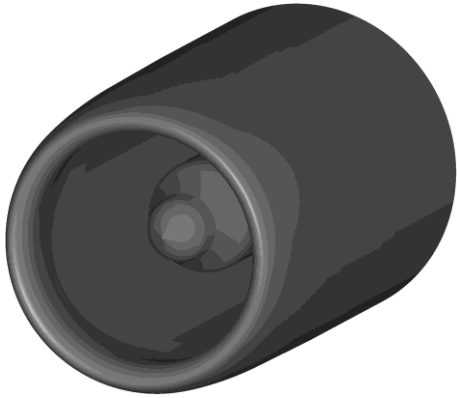
# Цель работы

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  $5^\circ$  и  $12^\circ$ . 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.

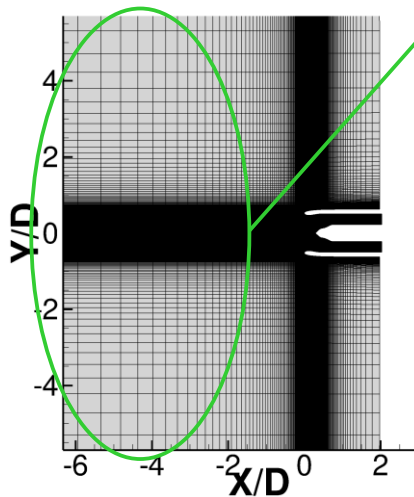
1. А. С. Жигалкин, Д. А. Любимов. Улучшение разрешения RANS/ILES(i) методом турбулентных вихревых структур при дозвуковых числах маха // ТВТ, 2025. Т. 63. №1, с. 57-67.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № № 2023666963 Российская федерация. «Программный модуль компьютерного 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

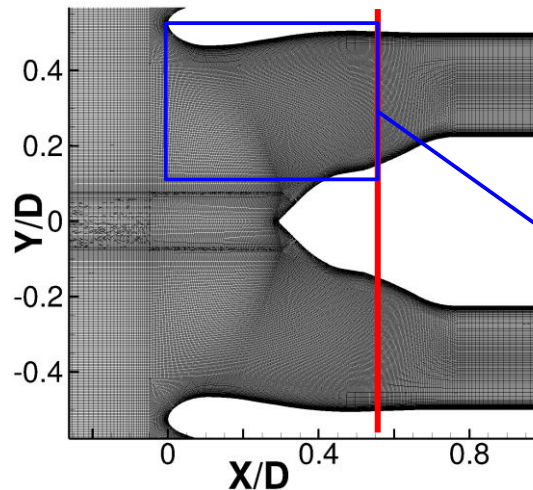


Общий вид геометрии ВЗ



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

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

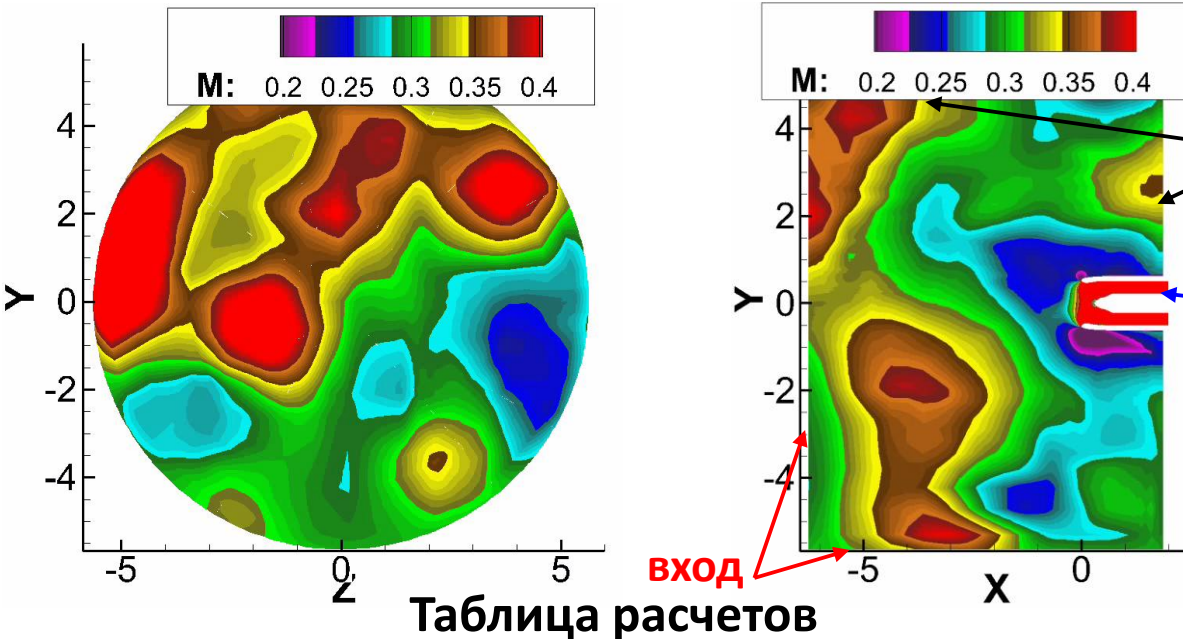


- Объект исследования представляет собой **модельный осесимметричный дозвуковой ВЗ**, типичный для пассажирских самолетов. Его геометрия соответствует численно исследованной в работе [1].
- **Параметры набегающего потока** соответствуют взлету самолета: число Маха равно 0.3, углы атаки –  $5^\circ$  и  $12^\circ$ , 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  $U_{0rms}$  и линейным масштабом  $L_t$ , для которых были выбраны следующие значения –  $U_{0rms} = 15$  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.

# Граничные условия

Поле числа Маха в набегающем потоке при турбулентном набегающем потоке



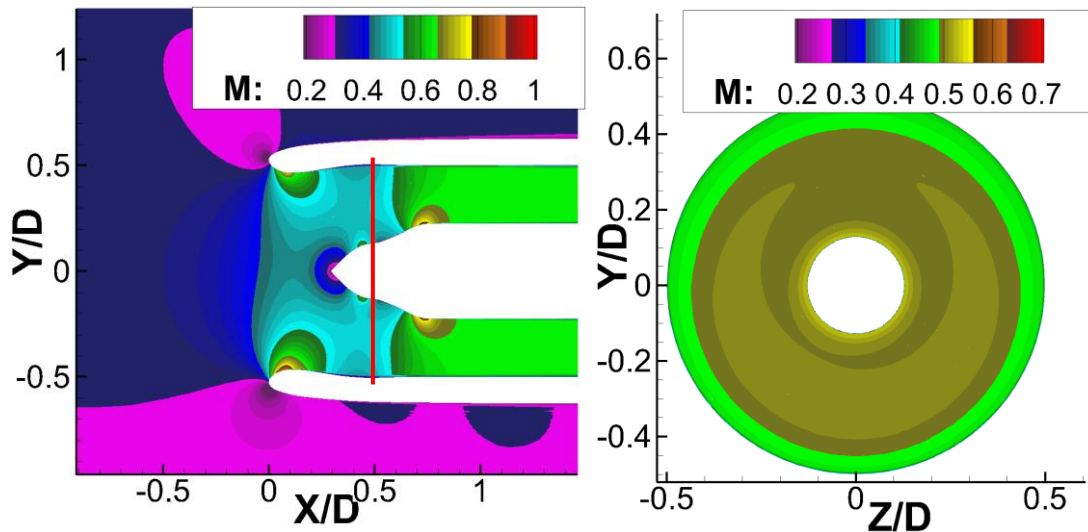
№ Расчета	Уровень пульсаций, $U_{0\,rms}$ м/с	Угол атаки, °
1	0.0	5
2	15.0	5
3	0.0	12
4	15.0	12

- **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 ВЗ** задавалось **статическое давление**, величина которого соответствовала значению газодинамической функции расхода  $q(\lambda) = 0.75$ .
- На **стенках ВЗ** 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

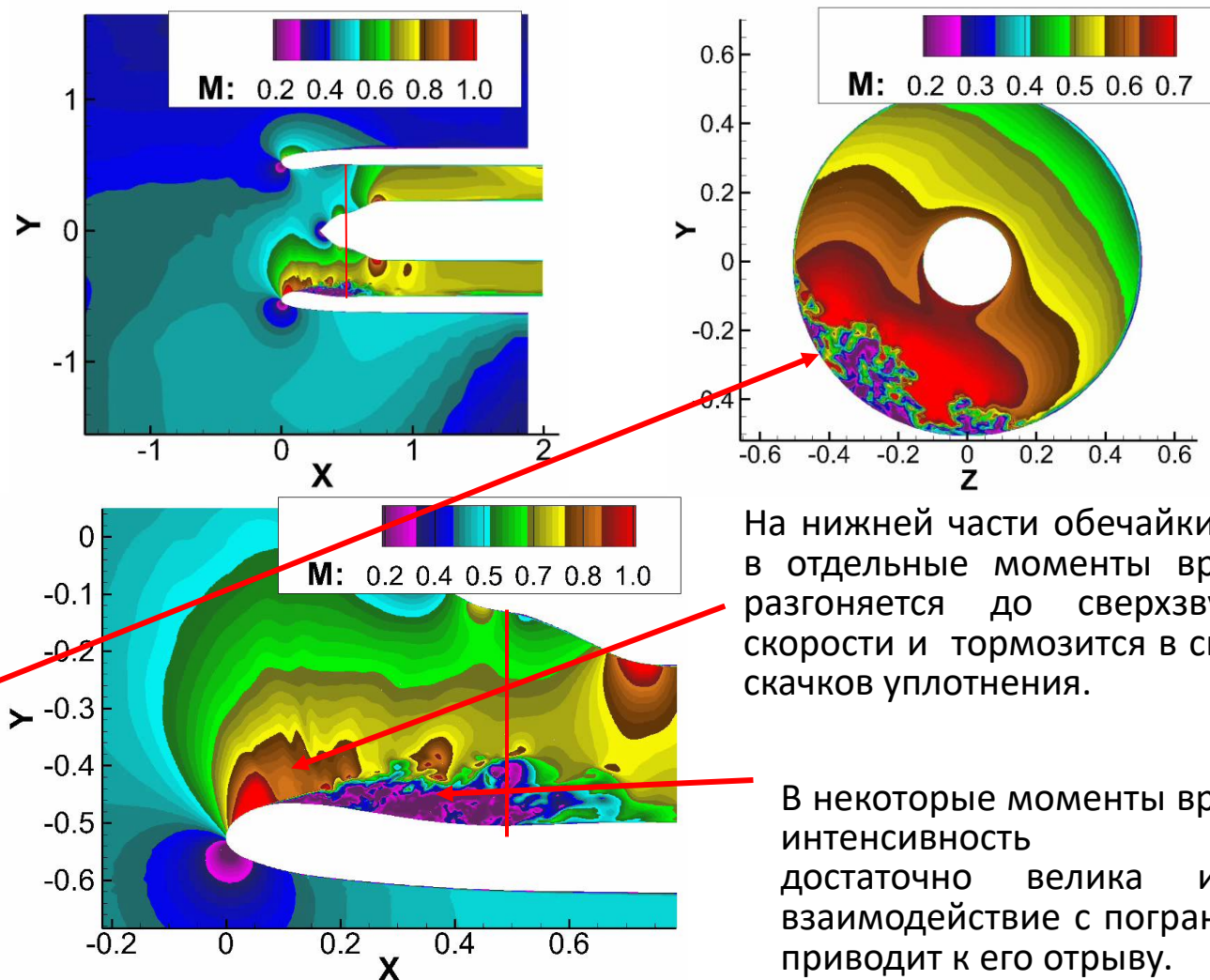
## Невозмущенный набегающий поток



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 ( $U_{Orms} = 15 \text{ м/с}$ ) могут существенно превышать вертикальную компоненту средней скорости набегающего потока (ок. 8 м/с при угле атаки  $5^\circ$ )

## Набегающий поток с КМВ



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

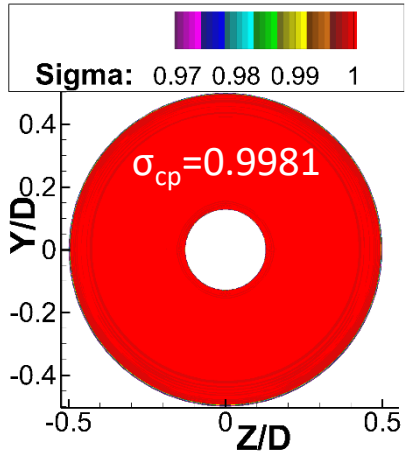
В некоторые моменты времени интенсивность скачка достаточно велика и его взаимодействие с погранслоем приводит к его отрыву.



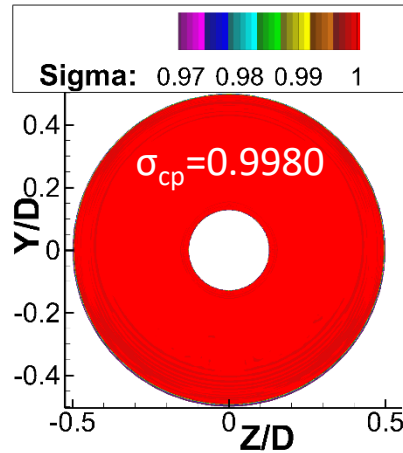
# Влияние КМВ и $\alpha$ на осредненный уровень потерь полного давления в выходном сечении ВЗ

Осредненный к-т сохранения полного давления в выходном сечении

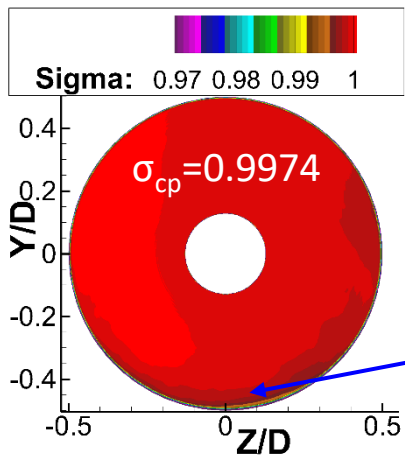
№ 1,  $\alpha=5^\circ$



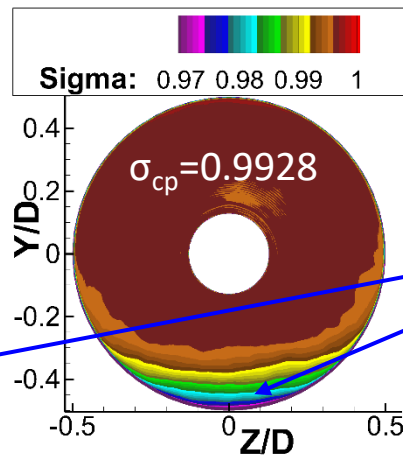
№ 3,  $\alpha=12^\circ$



№ 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  $\sigma_{cp}$  составляют не менее 0.999.
- При набегающем потоке с КМВ в поле  $\sigma_{cp}$  в выходном сечении **области возникновения отрыва** появляется участок, в котором  $\sigma_{cp}$  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  $\sigma_{cp}$  при  $\alpha=12^\circ$  составляет **0.916** против **0.945** при  $\alpha=5^\circ$ .

# Влияние КМВ и $\alpha$ на интенсивность турбулентных пульсаций параметров течения в выходном сечении ВЗ

Влияние турбулентности на средние параметры в выходном сечении ВЗ

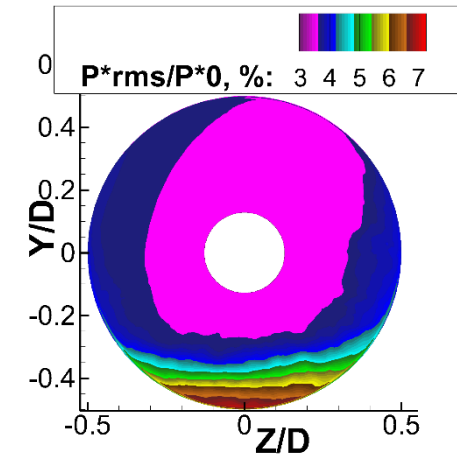
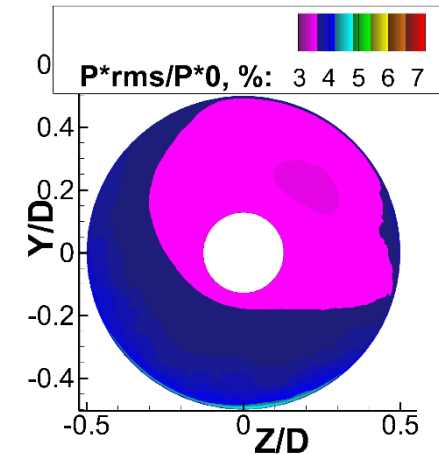
№ расчета / параметр	№ 1, $\alpha=5^\circ$	№ 2, $\alpha=5^\circ$	№ 3, $\alpha=12^\circ$	№ 4, $\alpha=12^\circ$
$U_{rms}/U_H$ , %	<0.1	6.8	0.16	9.8
$P_{rms}/P_H$ , %	<0.1	2.9	0.10	3.1
$P_{rms}^*/P_H^*$ , %	<0.1	3.6	<0.1	3.86
$\sigma$	0.9981	0.9974	0.9980	0.9928

- $\max(P_{rms}^*/P_H^*)$  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 %.

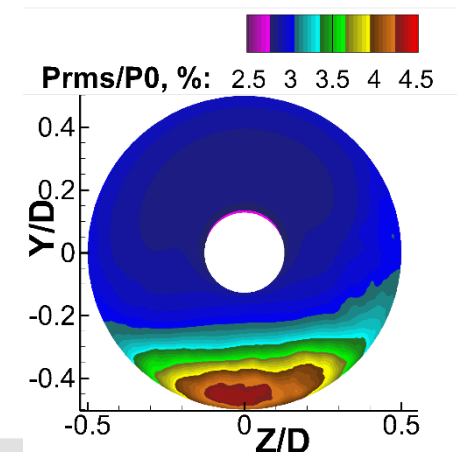
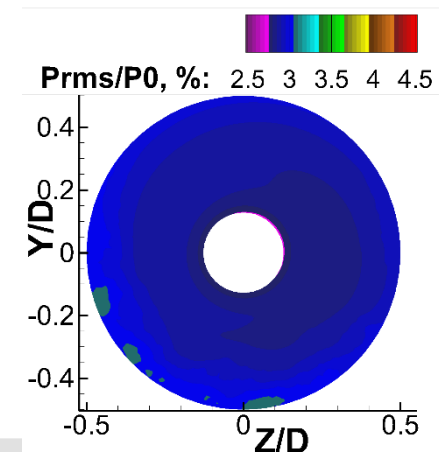
№ 2,  $\alpha=5^\circ$

№ 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  $5^\circ$  и  $12^\circ$ . 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  $\sigma_{cp}$**  при добавлении КМВ изменяется незначительно.
- Получено, что при увеличении  $\alpha$  с  $5^\circ$  до  $12^\circ$  при набегающем потоке с КМВ в выходном сечении увеличивается **толщина области возникновения** отрывной зоны с  $0.1D$  до  $0.2D$ .
- **Минимум значения  $\sigma_{cp}$**  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- $\omega$  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:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \rho \sqrt{k^3} / l_{IDDES}$$
$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \omega) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{\nabla k \cdot \nabla \omega}{\omega} + \alpha \frac{\rho}{\mu_1} P_k - \beta \rho \omega^2$$

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

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

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

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

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  $\psi$  такие же, как и в методе IDDES. Функция  $f_{dt}$  определена следующим образом:

$$f_{dt} = \text{th}((C_{dt1} r_{dt})^{C_{dt2}})$$

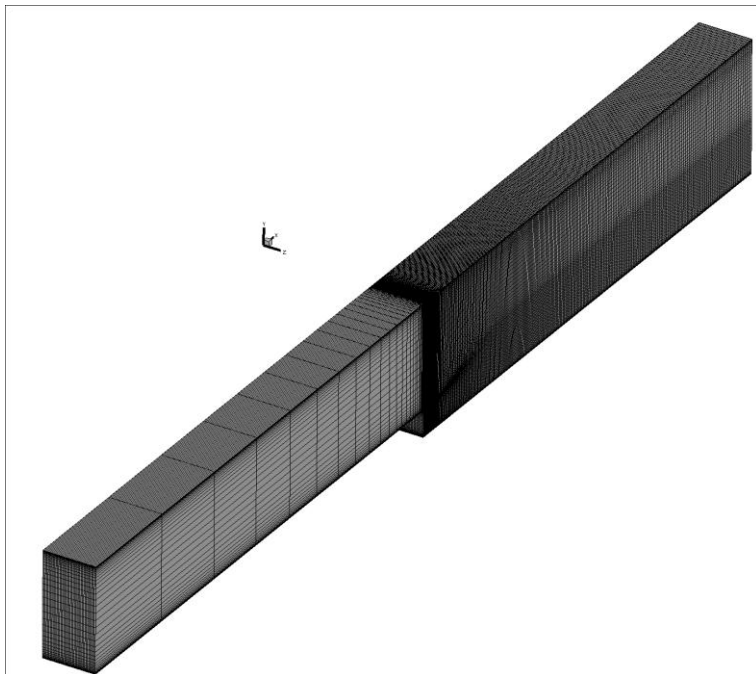
Значения  $C_{dt1}$  и  $C_{dt2}$  выбирались на основе тестовых расчетов. Другие функции, входящие в выражения для  $f_d$  и  $f_{dt}$ , совпадают с аналогичными в методе IDDES.

# Особенности решения уравнений для модели турбулентности

- Уравнения для  $k$  и  $\omega$  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



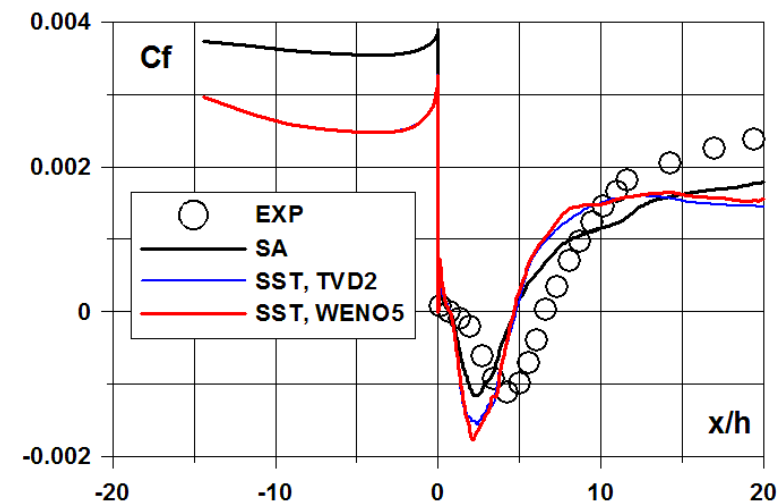
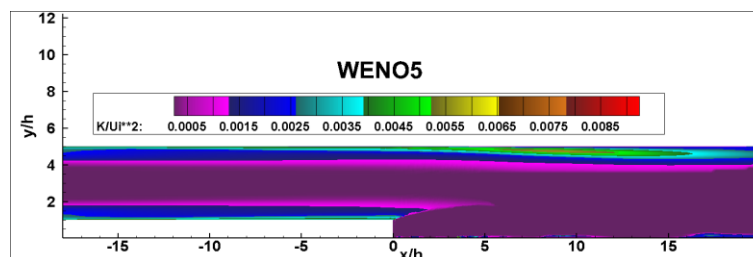
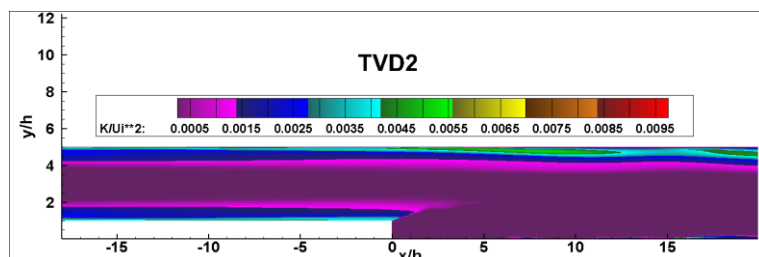
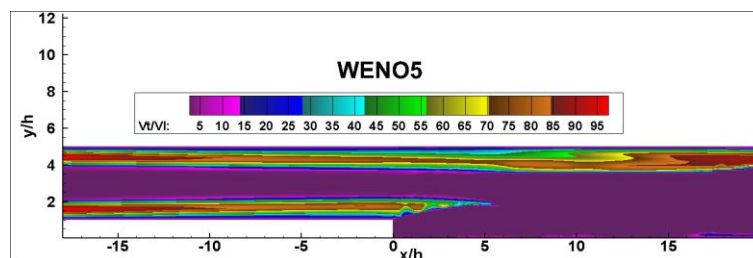
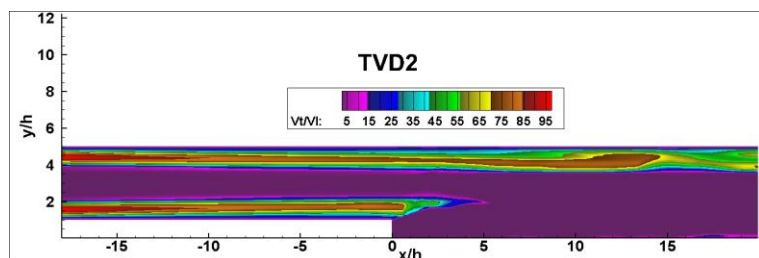
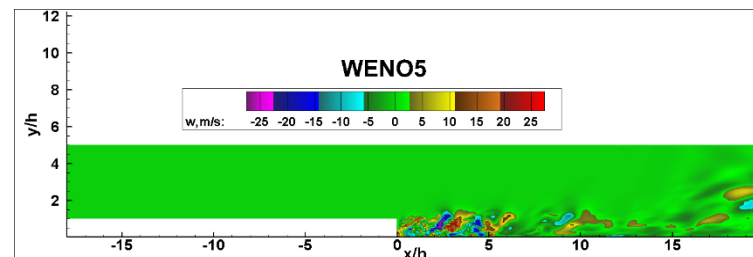
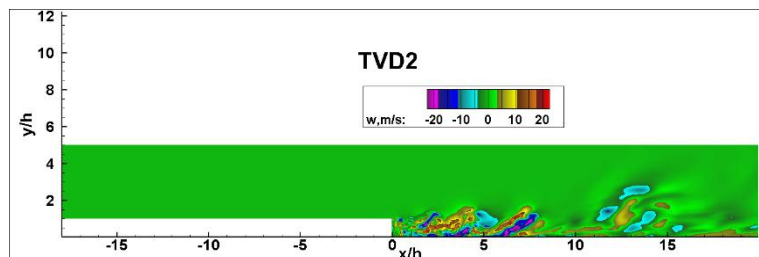
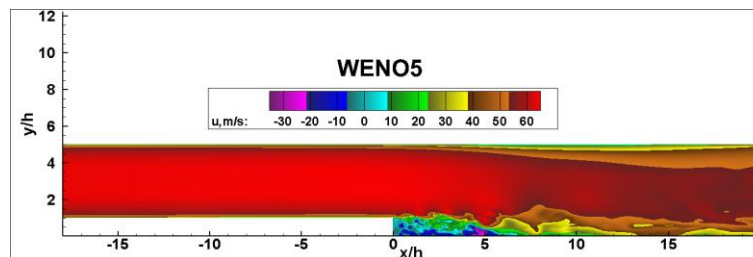
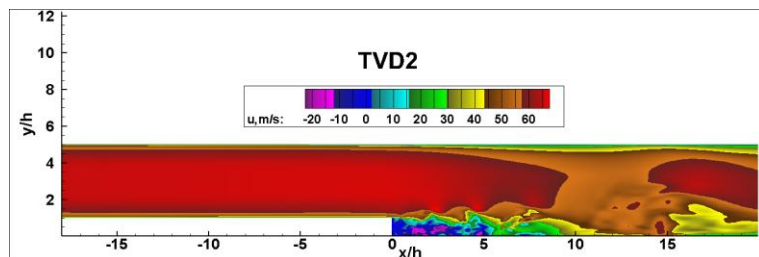
**Сетка:**  $25 \times 40 \times 40 + 280 \times 80 \times 40$  ячеек

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

## Граничные условия

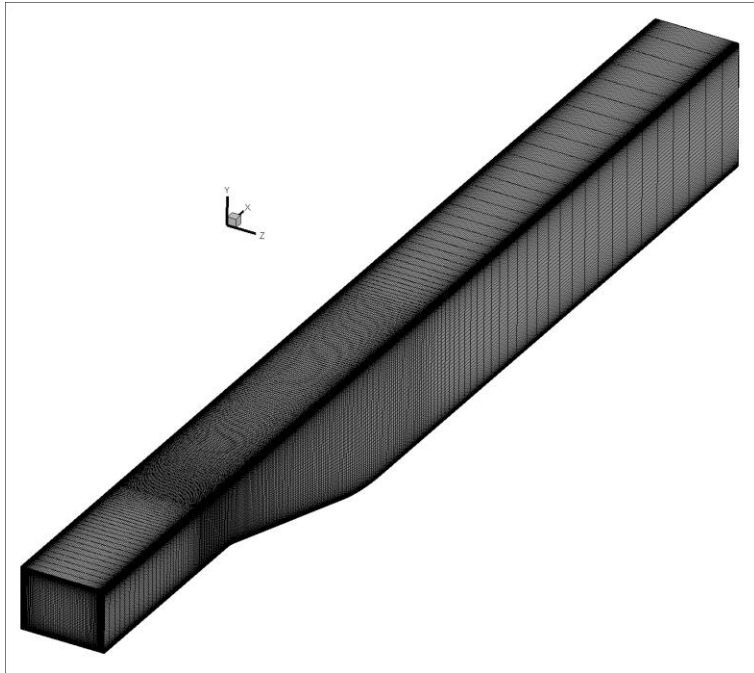
- На верхней и нижней и прилипание/функция стенки.
- На боковых стенках условие периодичности.
- На входе полные параметры и угол наклона вектора скорости.
- На выходе постоянное статическое давление.

# Обтекание обратного уступа. Влияние способа аппроксимации конвективных членов



# Асимметричный модельный диффузор, параметры задачи

Общий вид расчетной области



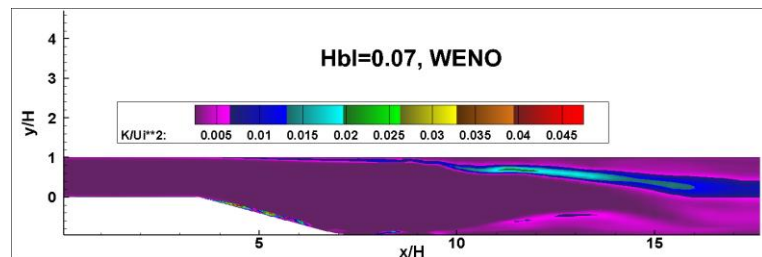
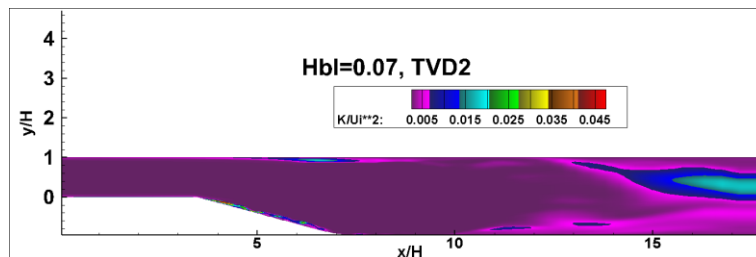
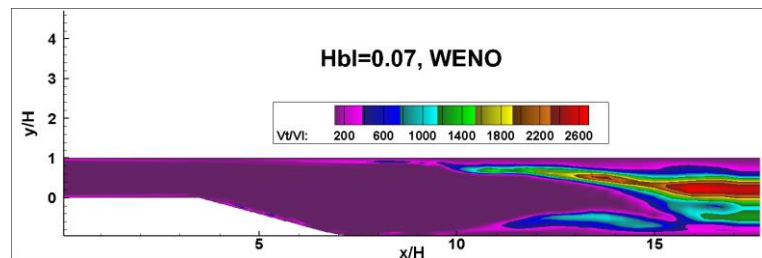
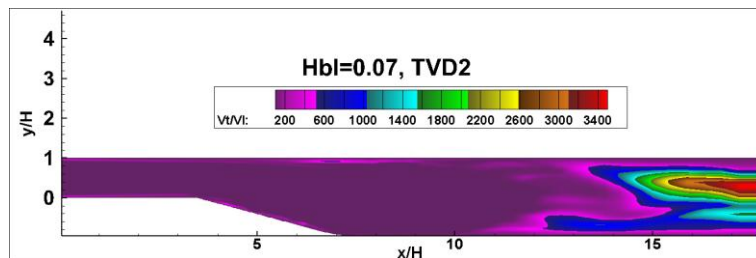
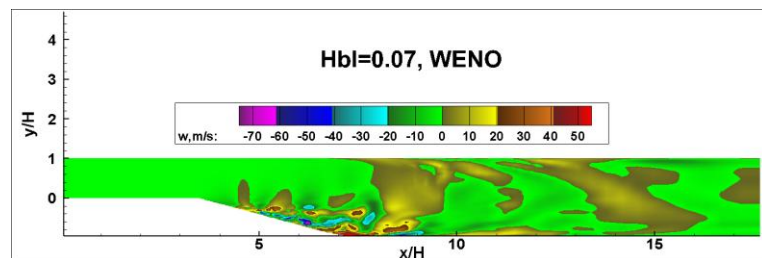
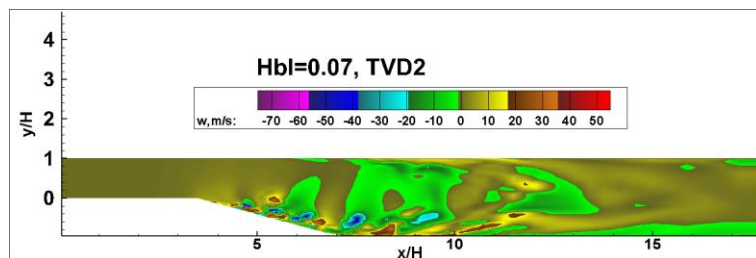
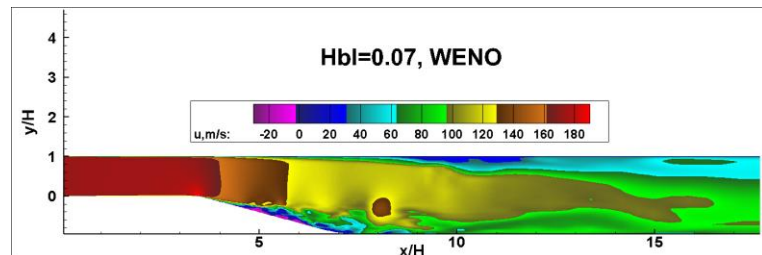
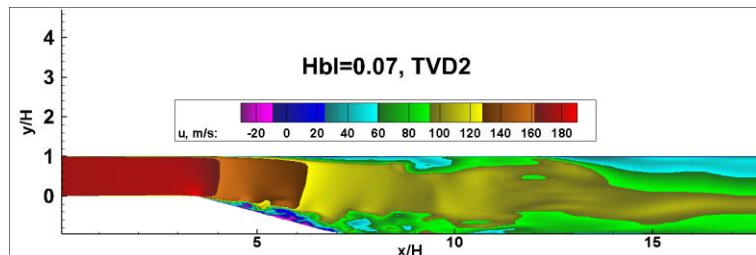
Сетка 225X80X100 ячеек

Параметры потока:  $P_0=1000\text{КПа}$ ,  $T=300\text{К}$ ,  $P_e=93.7\text{КПа}$ ,  $Re=5.2\times 10^5$

## Граничные условия

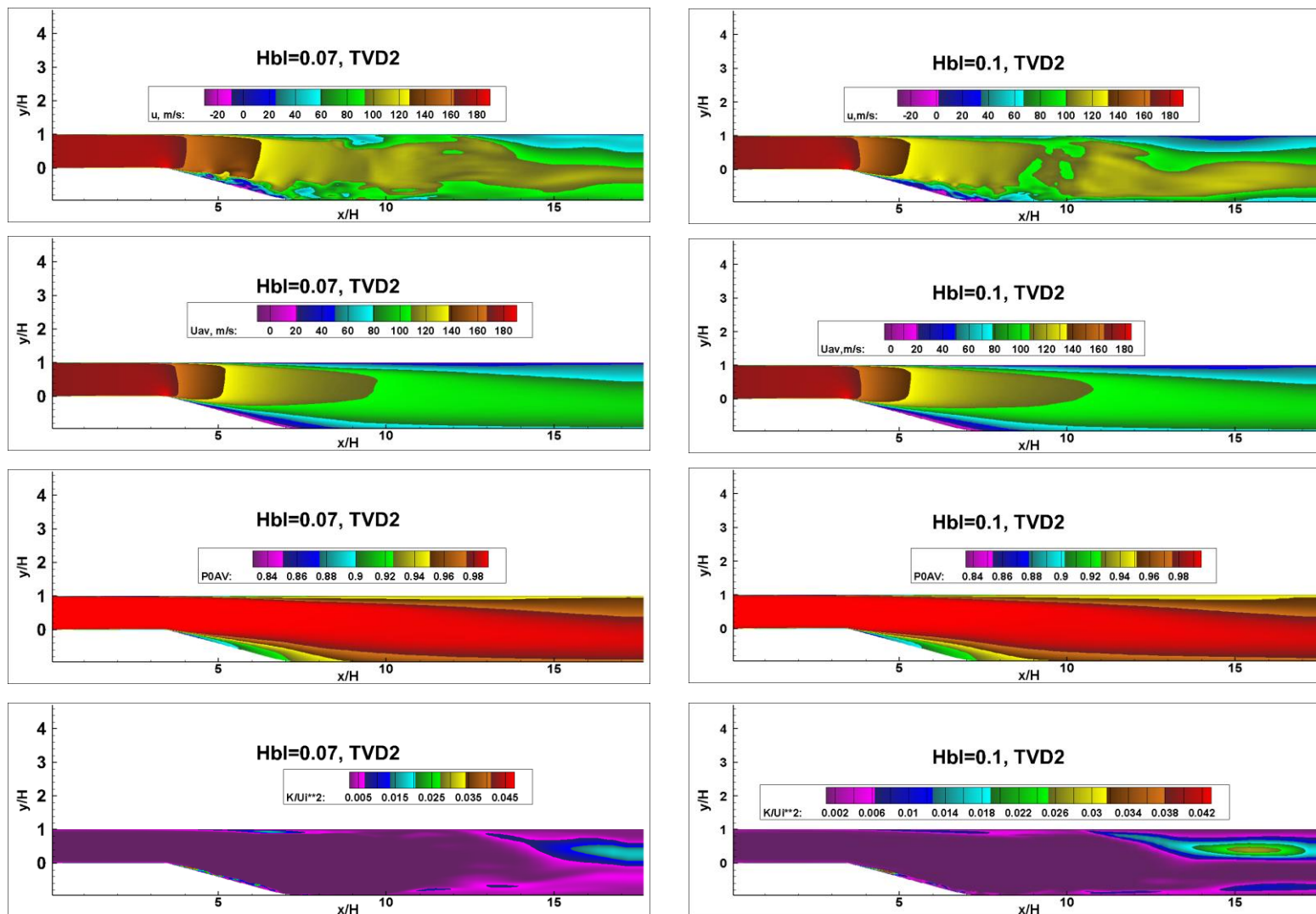
- На верхней, нижней и боковых стенках комбинированное условие прилипание/функция стенки.
- На входе полные параметры и угол наклона вектора скорости.
- На выходе постоянное статическое давление.

# Асимметричный модельный диффузор. Влияние способа аппроксимации конвективных членов параметры задачи

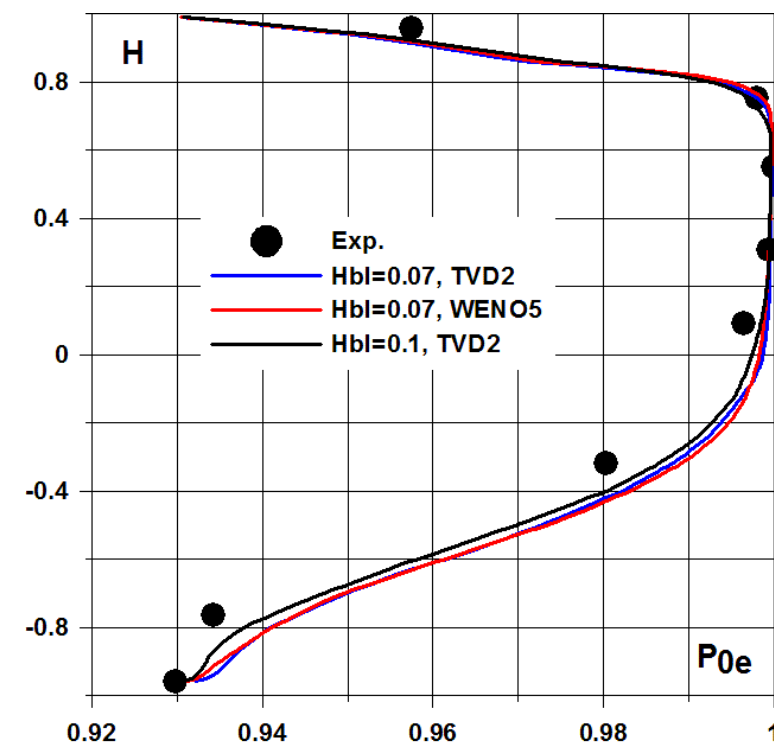




# Асимметричный модельный диффузор. Влияние толщины ПС на входе



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](http://www.ciam.ru)

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