



ЦИАМ

Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова

Реализация и верификация различных методов генерации синтетической турбулентности на примере моделирования развитого турбулентного течения в рамках кода Jet3D

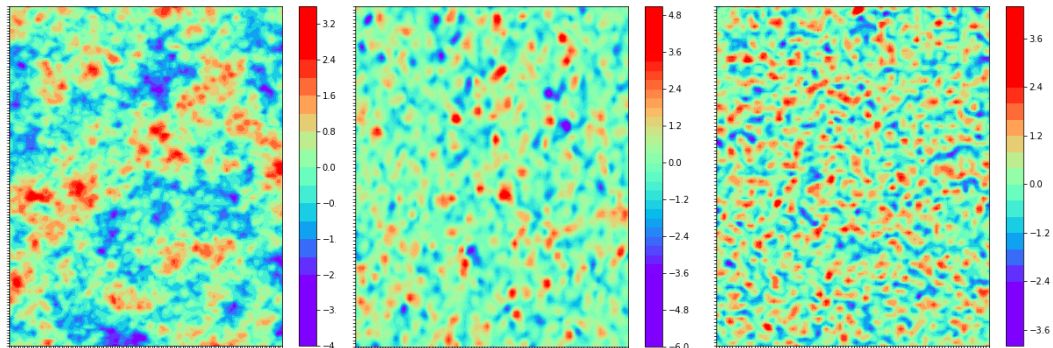
Жигалкин А.С., Любимов Д.А.

Цель работы

- В настоящее время одними из наиболее распространенных способов задания нестационарных входных граничных условий при моделирования турбулентных течений с помощью вихреразрешающих подходов является генерация синтетической турбулентности.
- В силу искусственной природы добавляемых на входе пульсаций формирование поля скоростей с физически реалистичными характеристиками турбулентности происходит на определенном расстоянии от входной границы. В зависимости от применяемого метода, это расстояние может быть различным. Чем ближе к входу происходит формирование турбулентности с заданными на входе характеристиками, тем эффективней метод.
- Таким образом, основная задача верификации метода генерации синтетической турбулентности – это проверка его способности приводить к инициализации ниже по течению физически реалистичной турбулентности со статистическими параметрами, заданными на входе.
- Введение искусственных флуктуаций скорости на входе в область LES расчета приводит к возникновению источников ложного шума.
- Оценку различных методов генерации синтетической турбулентности удобно произвести на задаче моделирование развитого турбулентного течения в плоском канале.

Используемые методы генерации синтетической турбулентности

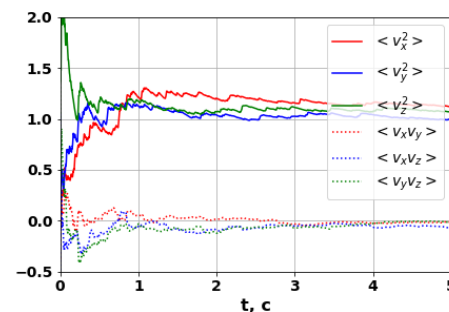
- В код Jet3D было встроено три достаточно распространенных метода генерации синтетической турбулентности: два спектральных метода [1, 2] и один на основе переноса когерентных вихревых структур [3]:
 1. *A. Smirnov, S. Shi, and I.B. Celik* Random flow generation technique for large-eddy simulations and particle-dynamics modeling // Journal of Fluids Engineering, 2001, N. 123, P. 359–371.
 2. *L. Davidson* Using isotropic synthetic fluctuations as inlet boundary conditions for unsteady simulations // Advances and Applications in Fluid Mechanics, 2007, N. 1, P. 1–35.
 3. *N. Jarrin, S. Benhamadouche, D. Laurence, and R. Prosser*, A synthetic-eddy-method for generating inflow conditions for large-eddy simulations // International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, V. 27, pp. 585–593.Далее они будут обозначаться как Smirnov, Davidson и SEM соответственно.
- Предварительно было произведено их априорное тестирование: с помощью каждого из методов сгенерировано однородное изотропное поле пульсаций и исследованы его характеристики. Ниже представлены поля скорости и графики вторых моментов.



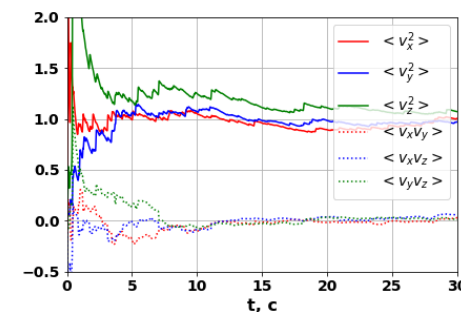
Davidson

SEM

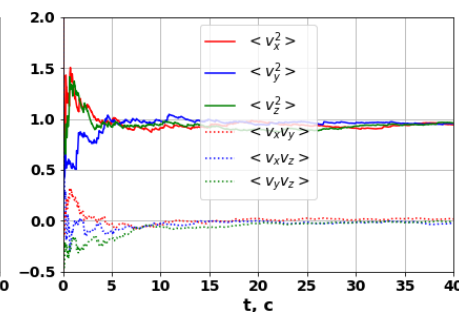
Smirnov



Davidson



SEM



Smirnov

Моделирование развитого турбулентного течения в плоском канале

- Критерием подобия для данного течения является число Рейнольдса, рассчитанное по трению, $Re_\tau = \frac{\delta \rho u_\tau}{\mu}$, где $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$, δ - половина высоты канала.
- Моделирование проводится на расчетной области в форме прямоугольного параллелепипеда. Сетка равномерная в продольном и поперечном направлениях. На верхнюю и нижнюю грани наложены условия стенки. На боковые грани – условия периодичности.
- На первом этапе осуществляется расчет с периодическим граничным условием в продольном направлении (рециклинг). Движение обеспечивается заданием в уравнение продольной компоненты импульса источникового члена, равного градиенту давления для течения в плоском канале: $\frac{dp}{dx} = -\frac{\tau}{\delta}$. Данный расчет будет «эталонным» для всех последующих расчетов с синтетической турбулентностью.
- По итогам расчета рассчитываются вертикальные распределения рейнольдсовых напряжений, которые сравниваются с результатами DNS такого течения (*Moser R. D., Kim J., Mansour N. N. Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow up to $Re_\tau = 590$*). Также рассчитываются вертикальные распределения линейных и временных масштабов турбулентности.
- На втором этапе производится расчет с заданием синтетической турбулентности на входе. Для этого расчетная область удлиняется, на входной границе задается скорости, а на выходной – статическое давление.
- Распределения рейнольдсовых напряжений и масштабов, полученные по результатам первого этапа, используются для генерации турбулентности на входе.
- Степень эффективности метода генерации синтетической турбулентности может быть оценена по степени совпадения распределений Рейнольдсовых напряжений в выходном сечении с заданными на входе, а также с помощью визуализации течения.
- Сравнительная оценка шума, продуцируемого разными методами, делается по спектрам давления и распределению среднеквадратических пульсаций давления по длине канала.

Параметры расчетов

- Все расчеты производились для режима $Re_{\tau_{ном}} = 590$.
- Для всех расчетов величина $\delta = 0.01$ м.
- Вертикальное распределение узлов сетки задавалось таким образом, чтобы у стенки выполнялось условие $y^+ \leq 1$.
- Габариты расчетной области для расчета рециклингом: $2\pi\delta \times 2\delta \times \pi\delta$. Для расчета с синтетической турбулентностью длина расчетной области была увеличена в 5 раз с сохранением величины шагов.
- Шаг по времени по всех расчетах составлял $4 \cdot 10^{-5}$ с.
- Шаги в продольном и поперечном направлениях составляли $\Delta x^+ = 30$ и $\Delta z^+ = 30$. Число ячеек в вертикальном направлении $N_y = 70$.
- Также были произведены расчеты со уменьшенными значениями шагов: $\Delta x^+ = 20$, $\Delta z^+ = 20$ и $N_y = 90$.

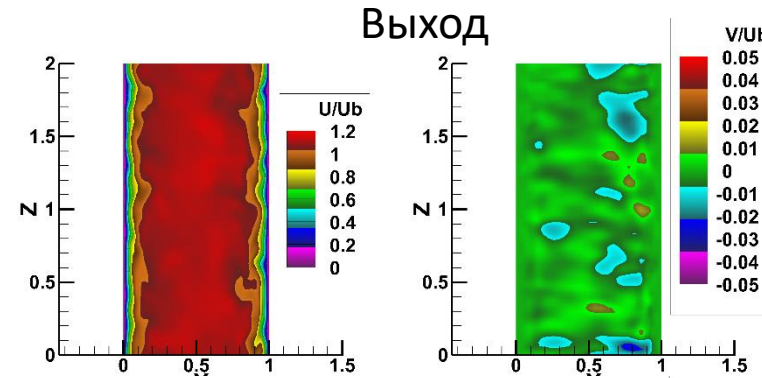
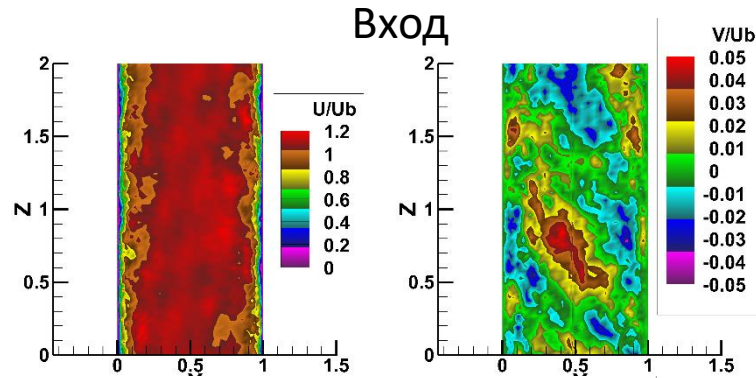
Обозначение расчета	t1, с	t2, с	t1_rel	t2_rel	$Re_{\tau_{ном}}$	Δx^+	Δz^+	N_y
Davidson-grid-30-30-70	0,04	0,640	2	32,4	590	30	30	70
Davidson-grid-20-20-90	0,04	0,516	2	26,1	590	20	20	90
SEM-grid-30-30-70	0,04	0,640	2	32,4	590	30	30	70
SEM-grid-20-20-90	0,04	0,567	2	28,7	590	20	20	90
Smirnov-grid-30-30-70	0,04	0,640	2	32,4	590	30	30	70
Recycling-grid-30-30-70	2,6	3,200	657,9	809,8	590	30	30	70

- t1, t2 – моменты начала и конца осреднения соответственно в с;
- t1_rel, t2_rel – те же величины, но выраженные в конвективных временных единицах. (Время, за которое со средней скоростью потока преодолевается длина канала).

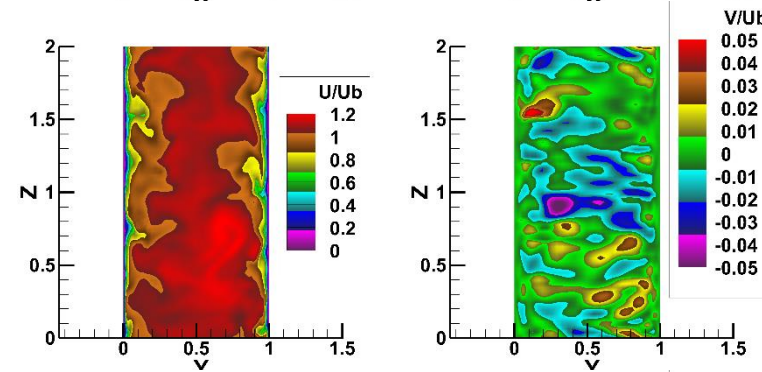
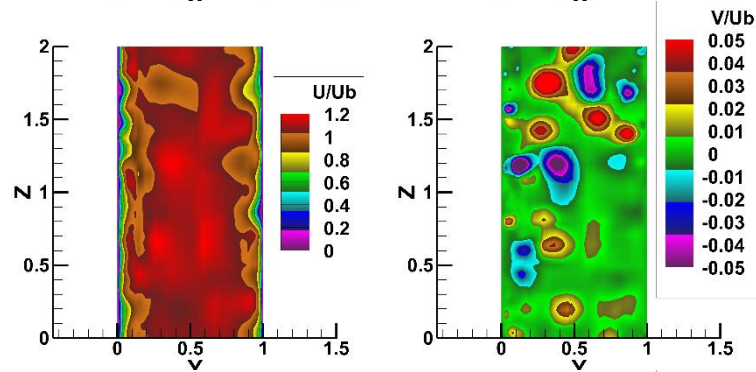
Результаты.

Сравнение полей скорости в поперечном сечении

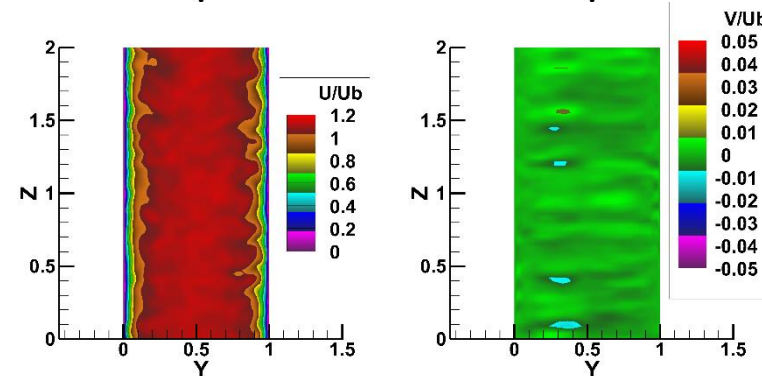
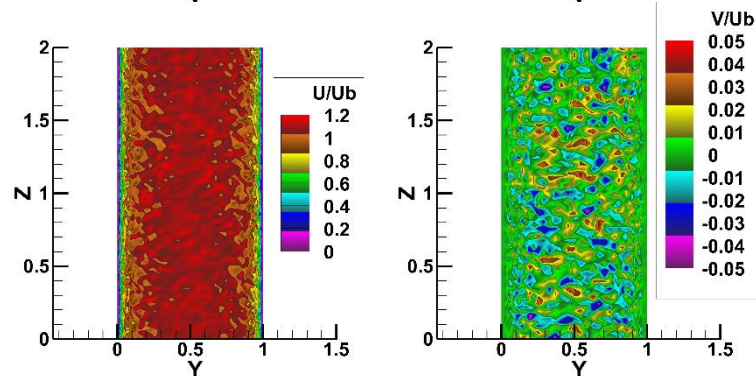
Davidson
 $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30$



SEM
 $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30$



Smirnov
 $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30$



Результаты.

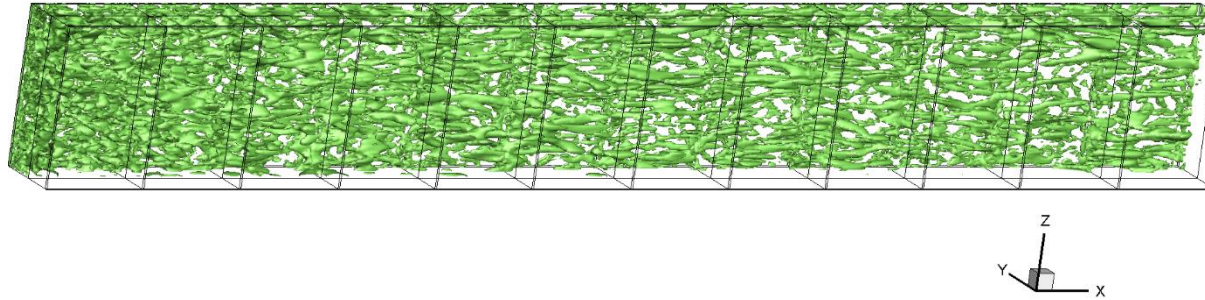
Сравнение полей скорости в поперечном сечении

- В выходном сечении поле скорости, структурно близкое к полю, полученному с помощью рециклинга, наблюдается только в результатах, полученных с использованием метода SEM. Но при этом в сравнении с рециклингом в нем можно наблюдать нехватку мелкомасштабных вихревых структур.
- Применение метода Smirnov приводит к отсутствию крупных структур в поле скорости на входе и его чрезмерному заполнению мелкомасштабными структурами, которые по мере эволюции поля скорости ниже по течению распадаются и не приводят к инициализации турбулентности.
- Поле скорости полученное с помощью метода SEM имеет недостаток вихревых структур в сравнении с полем, полученным с помощью рециклинга. Однако наполненность поля этими структурами можно регулировать настройками метода.
- Поле, полученное методом Davidson, по характерным размерам входящих в него турбулентных структур похоже на поле, полученное методом рециклинга. Однако оно заметно отличается по форме этих структур: они имеют более размытую границу и менее правильную форму.

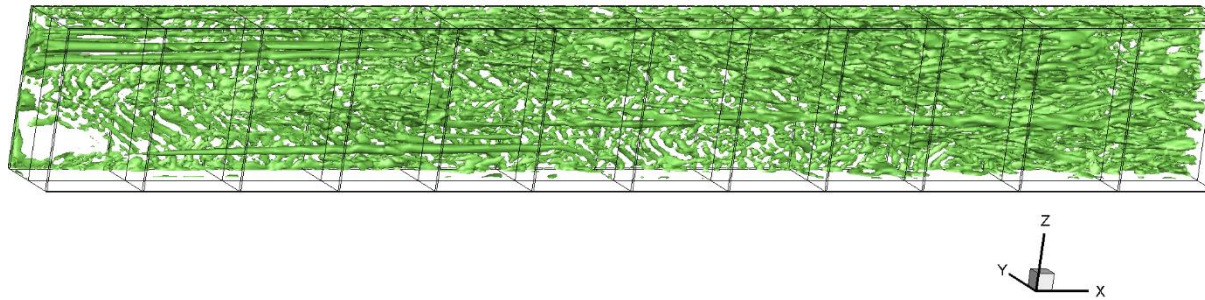
Результаты.

Сравнение изоповерхностей Q-критерия

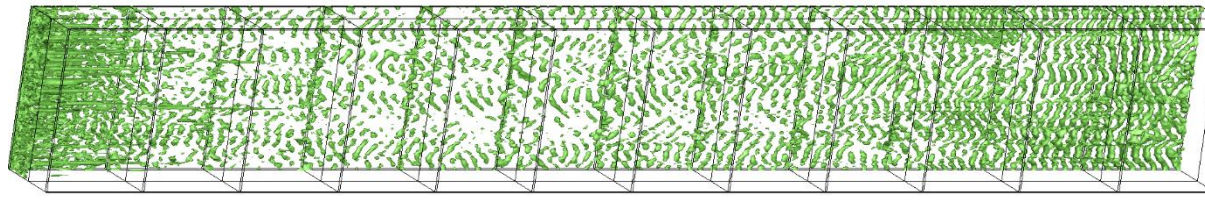
Davidson
 $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30$



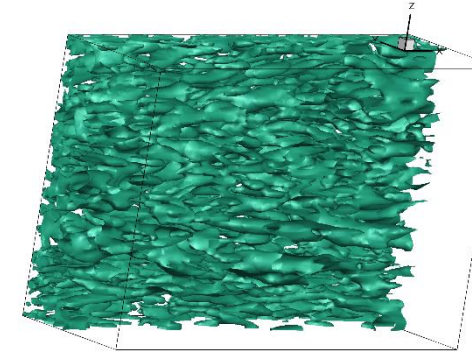
SEM
 $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30$



Smirnov
 $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30$



Рециклинг

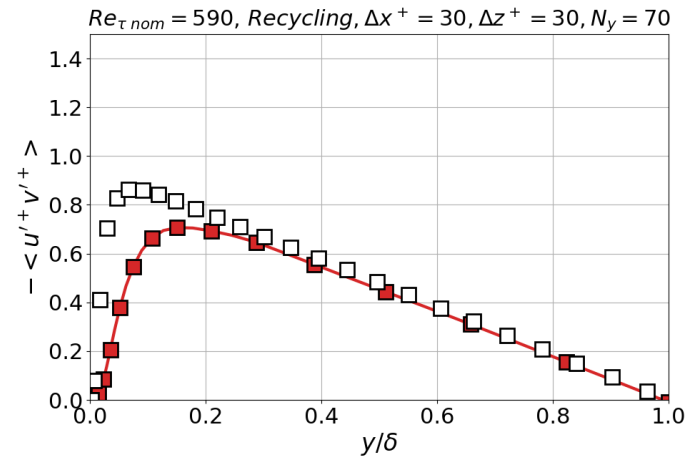
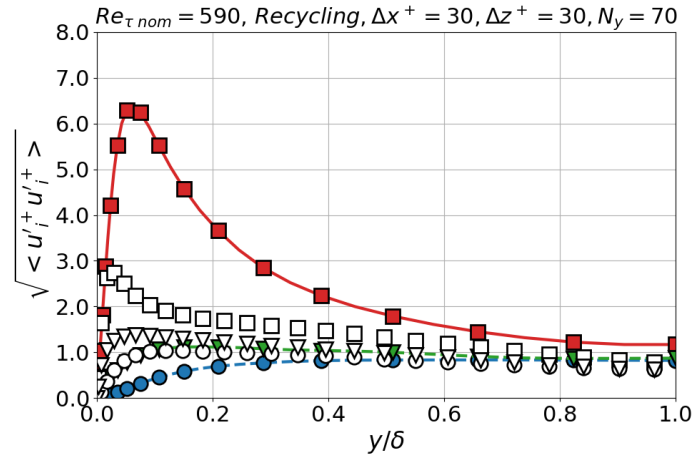


- Для турбулентного погранслоя характерно наличие вблизи стенки вытянутых в направлении потока турбулентных структур.
- Введение пульсаций с использованием метода Smirnov не приводит к возникновению ниже по течению таких структур.
- При использовании метода Davidson они возникают, но сравнительно редки, а к выходу их количество уменьшается.
- Использование SEM приводит к развитию турбулентности по длине канала. Вблизи выхода вихревые структуры очень похожи на те, которые можно наблюдать в расчета с помощью рециклинга.

Результаты.

Рециклинг. Распределение рейнольдсовых напряжений.

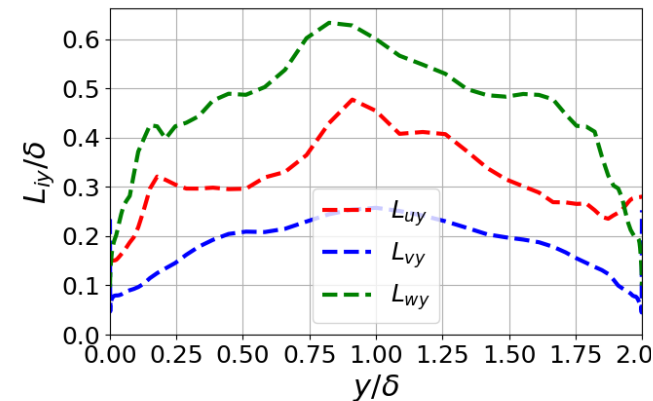
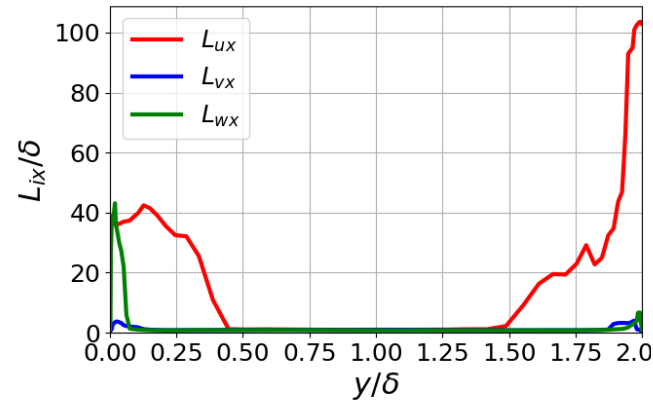
- Продольная составляющая нормальных напряжений имеет заметно завышенные значения по сравнению с результатом DNS вблизи стенки. А максимум смещен правее.
- Для двух остальных компонент нормальных напряжений можно наблюдать небольшое занижение вблизи стенки по сравнению с DNS.
- Касательные напряжения вблизи стенки имеют немного заниженные значения, а на остальном участке довольно точно совпадают с результатами DNS.



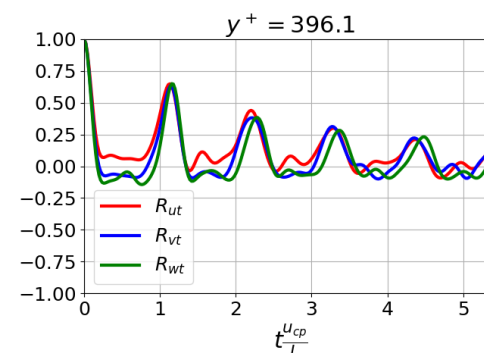
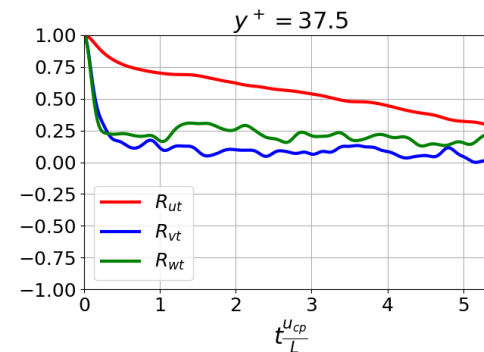
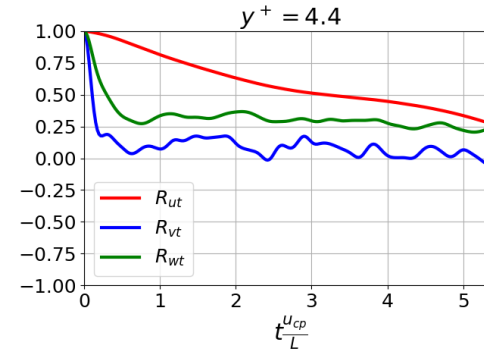
Результаты.

Рециклинг. Распределения линейных масштабов.

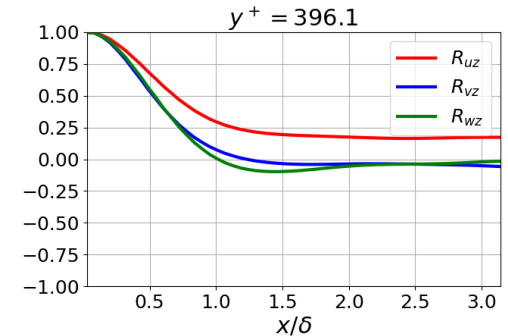
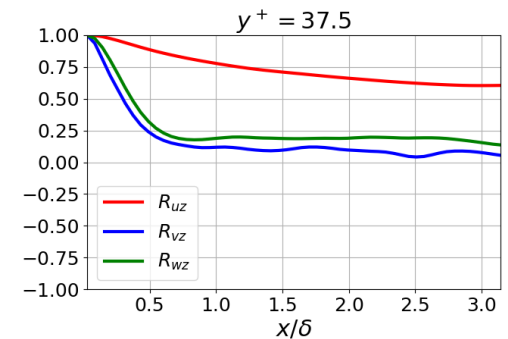
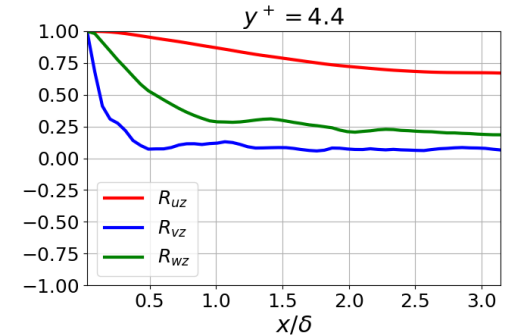
- Временной масштаб и линейные масштабы в поперечном направлении рассчитывались через корреляционную функцию: масштаб принимался равным расстоянию, на котором корреляционный к-т убывает до заданного значения (использовалось значение 0.2).
- Линейный масштаб в продольном направлении рассчитывался исходя из гипотезы Тейлора.
- Продольный линейный масштаб в возрастает по направлению к стенке. Это объясняется наличием у стенки вытянутых в продольном направлении турбулентных структур, претерпевающих распад по мере увеличения расстояния от стенки.
- Поперечный линейный масштаб растет в направлении от стенки.
- Изменения линейный масштабов наглядно иллюстрируются графиками корреляционных функций на различных расстояниях от стенки.



Автокорреляции



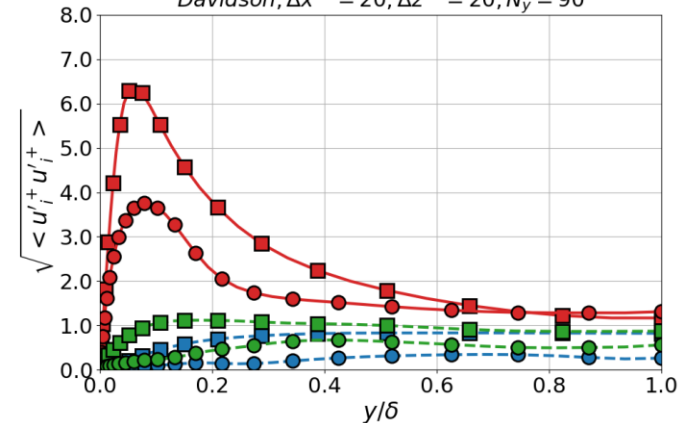
Пространственные корреляции в продольном направлении



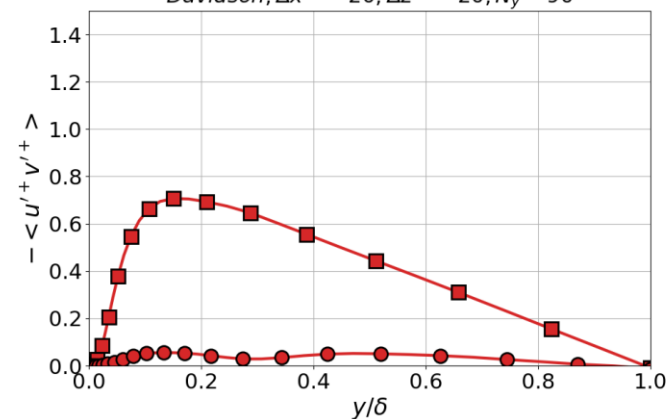
Результаты.

Распределений реynoльдсовых напряжений. Сравнение метода Davidson и метода рециклинга.

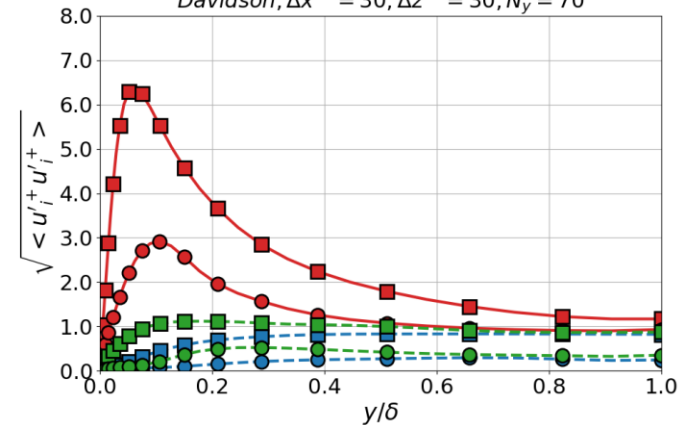
$Re_{\tau nom} = 590$, Recycling, $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30, N_y = 70$ -
Davidson, $\Delta x^+ = 20, \Delta z^+ = 20, N_y = 90$



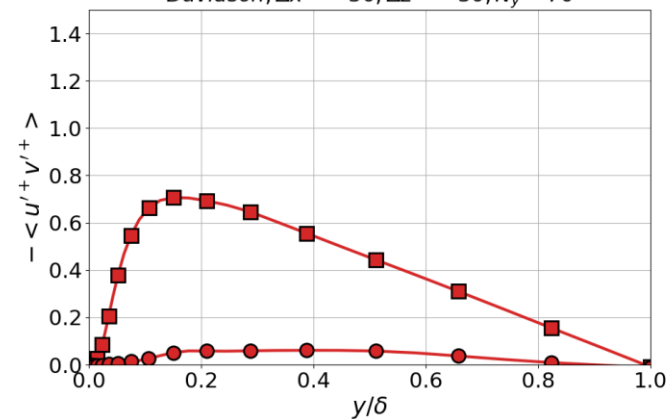
$Re_{\tau nom} = 590$, Recycling, $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30, N_y = 70$ -
Davidson, $\Delta x^+ = 20, \Delta z^+ = 20, N_y = 90$



$Re_{\tau nom} = 590$, Recycling, $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30, N_y = 70$ -
Davidson, $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30, N_y = 70$



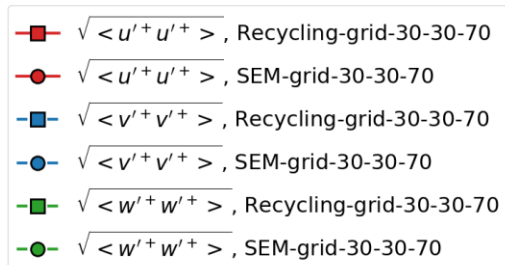
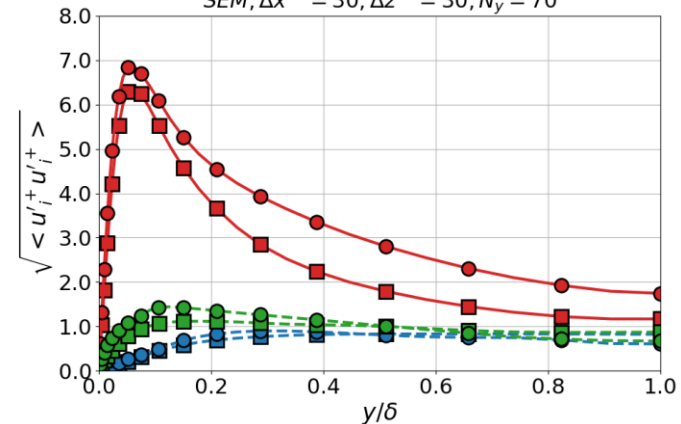
$Re_{\tau nom} = 590$, Recycling, $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30, N_y = 70$ -
Davidson, $\Delta x^+ = 30, \Delta z^+ = 30, N_y = 70$



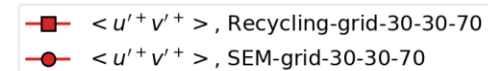
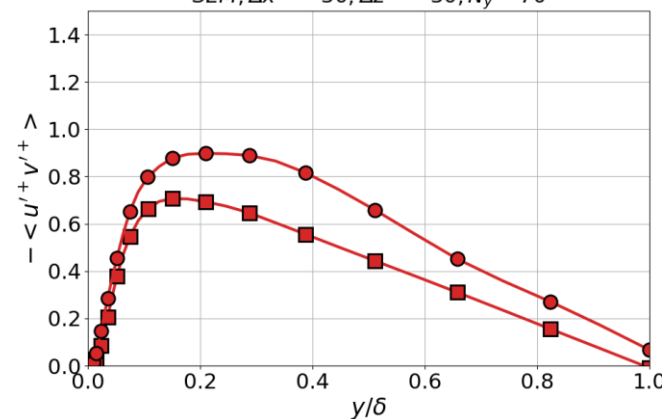
Результаты.

Распределений реynoльдсовых напряжений. Сравнение метода SEM и метода рециклинга.

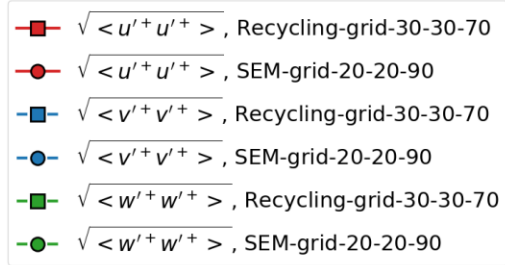
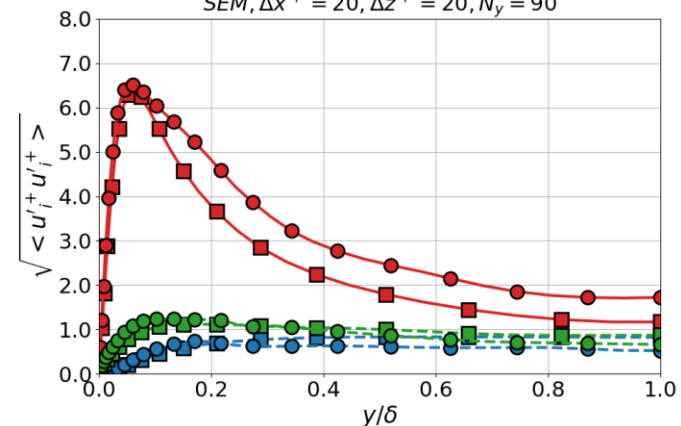
$Re_{\tau nom} = 590$, Recycling, $\Delta x^+ = 30$, $\Delta z^+ = 30$, $N_y = 70$ -
SEM, $\Delta x^+ = 30$, $\Delta z^+ = 30$, $N_y = 70$



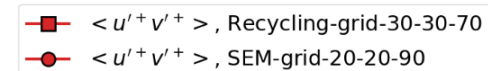
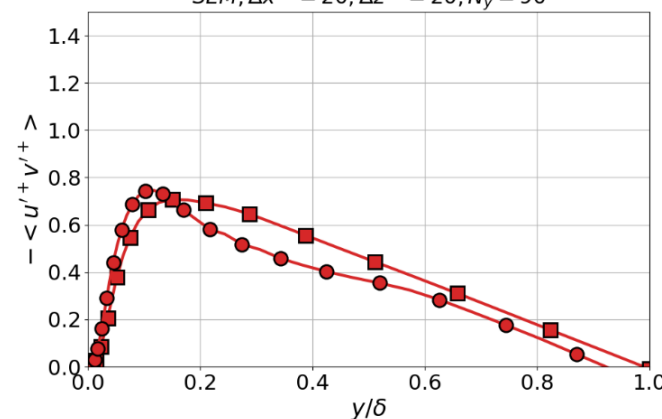
$Re_{\tau nom} = 590$, Recycling, $\Delta x^+ = 30$, $\Delta z^+ = 30$, $N_y = 70$ -
SEM, $\Delta x^+ = 30$, $\Delta z^+ = 30$, $N_y = 70$



$Re_{\tau nom} = 590$, Recycling, $\Delta x^+ = 30$, $\Delta z^+ = 30$, $N_y = 70$ -
SEM, $\Delta x^+ = 20$, $\Delta z^+ = 20$, $N_y = 90$



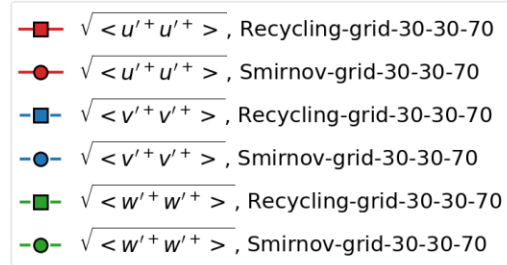
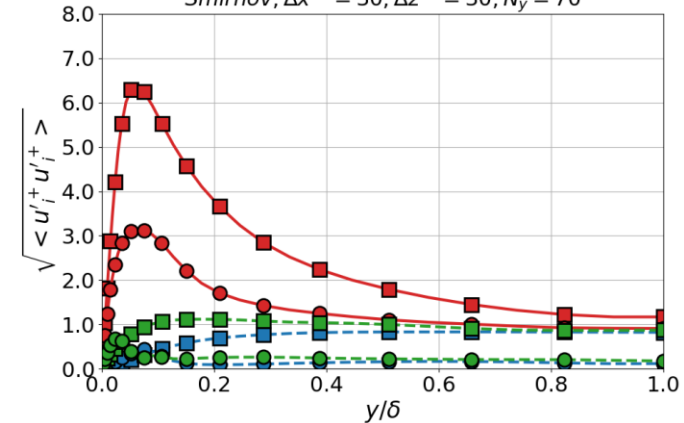
$Re_{\tau nom} = 590$, Recycling, $\Delta x^+ = 30$, $\Delta z^+ = 30$, $N_y = 70$ -
SEM, $\Delta x^+ = 20$, $\Delta z^+ = 20$, $N_y = 90$



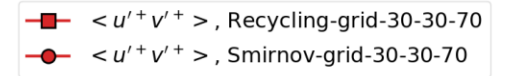
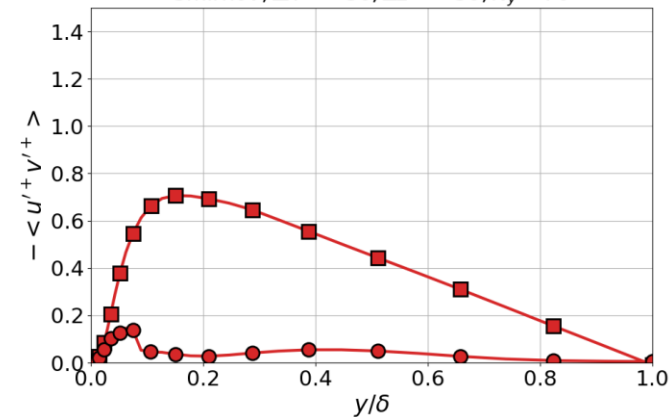
Результаты.

Распределений рейнولدсовых напряжений. Сравнение метода Smirnov и метода рециклинга.

$Re_{\tau nom} = 590$, Recycling, $\Delta x^+ = 30$, $\Delta z^+ = 30$, $N_y = 70$ -
Smirnov, $\Delta x^+ = 30$, $\Delta z^+ = 30$, $N_y = 70$



$Re_{\tau nom} = 590$, Recycling, $\Delta x^+ = 30$, $\Delta z^+ = 30$, $N_y = 70$ -
Smirnov, $\Delta x^+ = 30$, $\Delta z^+ = 30$, $N_y = 70$



- Расчеты с использованием метода SEM показывают достаточно точное совпадение с результатами расчета с помощью рециклинга, как в распределении нормальных напряжений, так и касательных. Уменьшение шага сетки несколько улучшает степень совпадения. Такое совпадение говорит о том, что применение метода SEM приводит к инициализации ниже по течению физически реалистичной турбулентности, имеющей заданные на входе характеристики.
- В расчетах с применением методов Smirnov и Davidson такой картины не наблюдается: заданная на входе искусственная турбулентность не вызывает возникновения ниже по течению физически реалистичной турбулентности. В результате значения рейнولدсовых напряжений на приведенных графиках существенно ниже, чем в расчетах с помощью рециклинга.

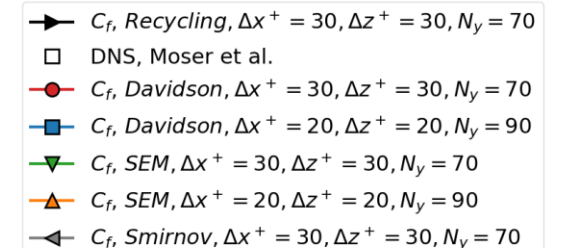
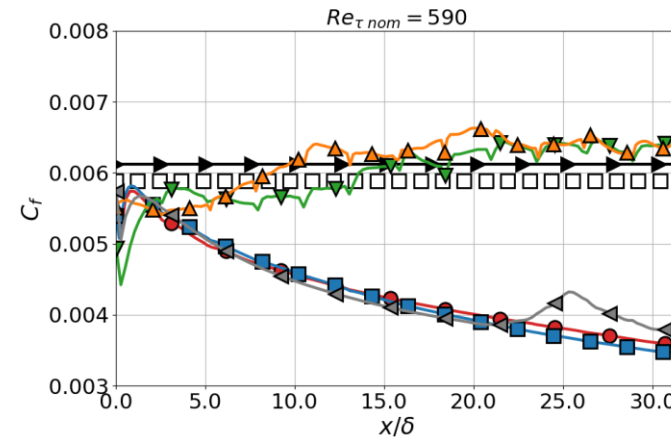
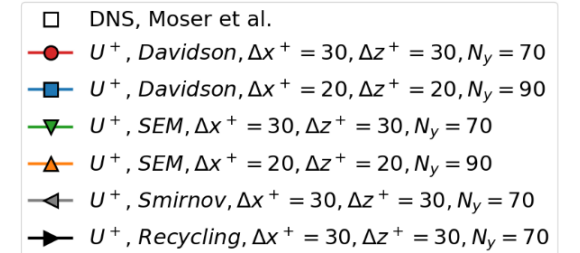
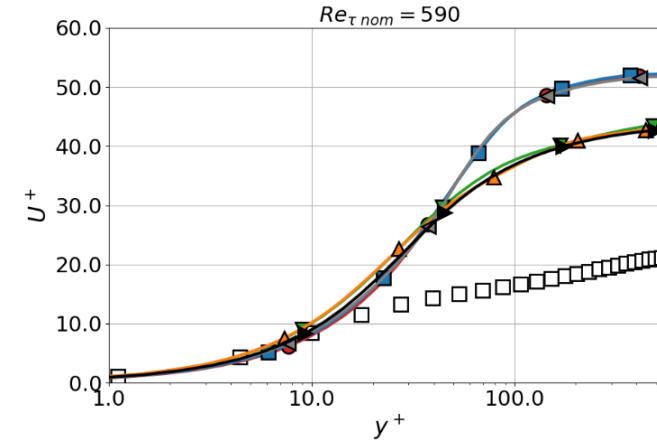
Результаты.

Профиль скорости и распределение коэффициента трения.

Обозначение расчета	t1_rel	t2_rel	$Re_{\tau_{ном}}$	Re_{τ}
Davidson-grid-30-30-70	2	32,4	590	500
Davidson-grid-20-20-90	2	26,1	590	499
SEM-grid-30-30-70	2	32,4	590	587
SEM-grid-20-20-90	2	28,7	590	596
Smirnov-grid-30-30-70	2	32,4	590	502
Recycling-grid-30-30-70	657,9	809,8	590	602

Re_{τ} - фактическое значение числа Рейнольдса по трению в расчете

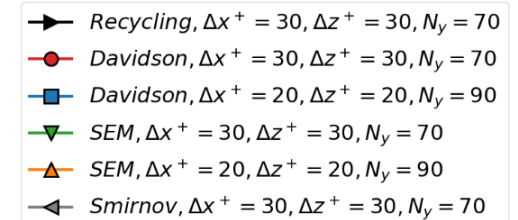
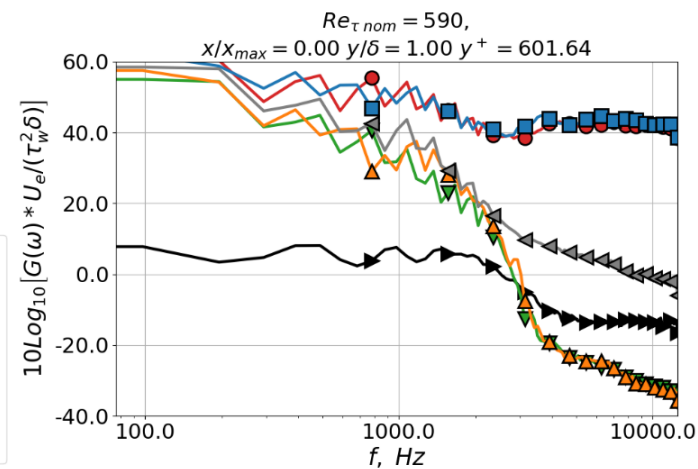
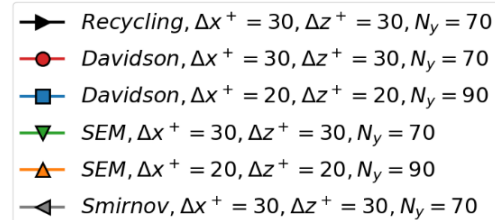
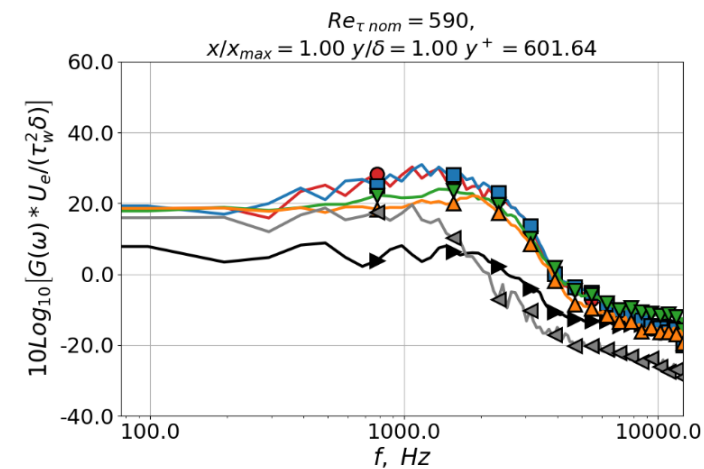
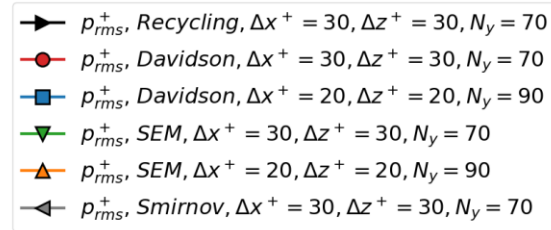
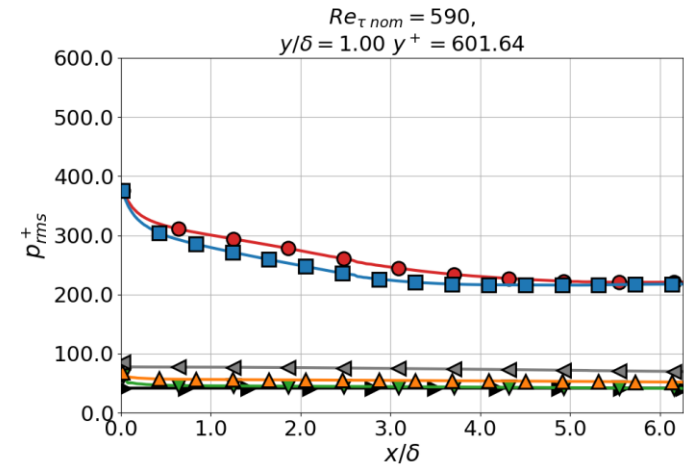
- Расчет рециклингом достаточно точно предсказывает величину трения на стенке, однако наблюдается завышение средней по времени скорости в логарифмической подобласти погранслоя.
- В расчете с использованием метода SEM наблюдается довольно точное совпадение профиля скорости с «эталоном». Величина трения на стенке на участке $10\delta \dots 15\delta$ восстанавливается до значений, близких к «эталонному» расчету.
- Применению методов Davidson и Smirnov приводит к завышению средней скорости в сравнении с расчетом рециклингом. Величина трения на стенке монотонно убывает на большей части длины канала.



Результаты.

Акустические параметры.

- Метод Davidson приводит к возникновению пульсаций давления значительно большей интенсивности, чем методы SEM и Smirnov.
- В расчетах с использованием метода Davidson высокочастотная часть спектра пульсаций давления расположена значительно выше, чем в расчетах с использованием других методов.



Выводы

- Использование метода SEM в рамках кода Jet3D для генерации синтетической турбулентности на входе дает наилучшие результаты с точки зрения инициализации ниже по течению физически реалистичной турбулентности с заданными параметрами. Размер переходной зоны, определяемый по продольному распределению трения на стенке, составил порядка $10\delta \dots 15\delta$.
- Использование методов Davidson и Smirnov не привело к инициализации турбулентности ниже по течению на длине расчетной области.
- Метод Davidson оказался наихудшим из трех рассмотренных с точки зрения продуцирования «ложного» шума.



Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова

Спасибо за внимание!

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

Тел.: +7 (499) 763 57 47
E-mail: info@ciam.ru