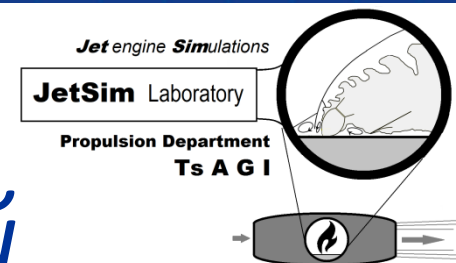


VIII Российская конференция  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ  
В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ



20—25 сентября 2021 г., ГЕЛЕНДЖИК



# Сравнение аппроксимаций конвективных членов в методах семейства *DES*

С. Бахнэ, С.В. Михайлов, А.И. Трошин

ФГУП ЦАГИ

МФТИ

Работа выполнена при поддержке Гранта Министерства образования и  
науки РФ (Договор No. 14.G39.31.0001)

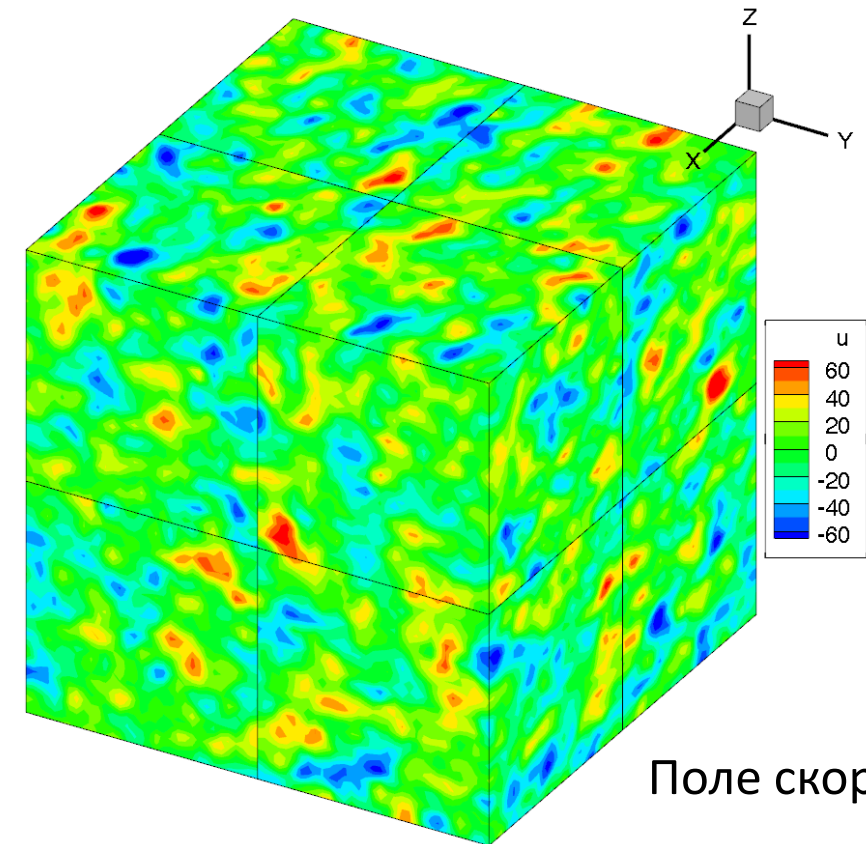
## План доклада

- Постановка задачи
- Численный метод
- Анализ результатов расчётов
- Выводы

## Постановка задачи

Актуальные проблемы методов семейства DES: Тестовая задача: Распад однородной изотропной турбулентности

- центральные разности неустойчивы в пограничных слоях в режиме RANS
- противопоточные схемы излишне диссипативны в области LES
- оптимальные значения констант модели турбулентности зависят от численного метода



Поле скорости

Гарбарук А. Современные методы расчета турбулентных течений // Моделирование турбулентности. 2016. URL: [http://cfд.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/modern\\_methods](http://cfд.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/modern_methods)

## План доклада

- Постановка задачи
- Численный метод
- Анализ результатов расчётов
- Выводы

## Численный метод

- МКО 2-го порядка точности
- Структурированная сетка
- Расчётный модуль zFlare из EWT ЦАГИ
- Диффузионные потоки вычисляются со 2-ым порядком
- Конвективные потоки: MPWENO5 + ЦР (2-го, 4-го или 6-го порядков)
- Явная схема по времени 3-го порядка
- Вихреразрешающий метод: DDES
  - 1) на базе модели SST
  - 2) на базе DRSM-модели SSG/LRR- $\omega$

### Параметры задачи:

- Кубическая область с периодическими границами
- Равномерная сетка с  $32^3$ ,  $64^3$  и  $128^3$  ячейками
- Случайное начальное поле со спектром Кармана
- Начальное  $Re_t \sim 10^6$



## План доклада

- Постановка задачи
- Численный метод
- Анализ результатов расчётов
- Выводы

## Анализ результатов расчётов

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U} k) = \nabla[(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \rho \frac{\sqrt{k^3}}{l_{DDES}} \quad l_{DDES} = l_{RANS} - f_d \max(0, l_{RANS} - l_{LES}) \quad l_{LES} = C_{DES} h_{\max} \quad C_{DES} = C_{DES1} \cdot F_1 + C_{DES2} \cdot (1 - F_1)$$

Ключевым параметром подсеточной модели в данной задаче является константа  $C_{des2}$ , которая в [1] равна 0.61

Значение  $C_{des2}$  варьировалось от 0 до 1 с шагом 0.1

Функция ошибки  $\varepsilon = n - (-5/3)$ , где  $n$  – показатель степени приближающей функции

Критерий выбора:  $|\varepsilon| \leq 0.01$

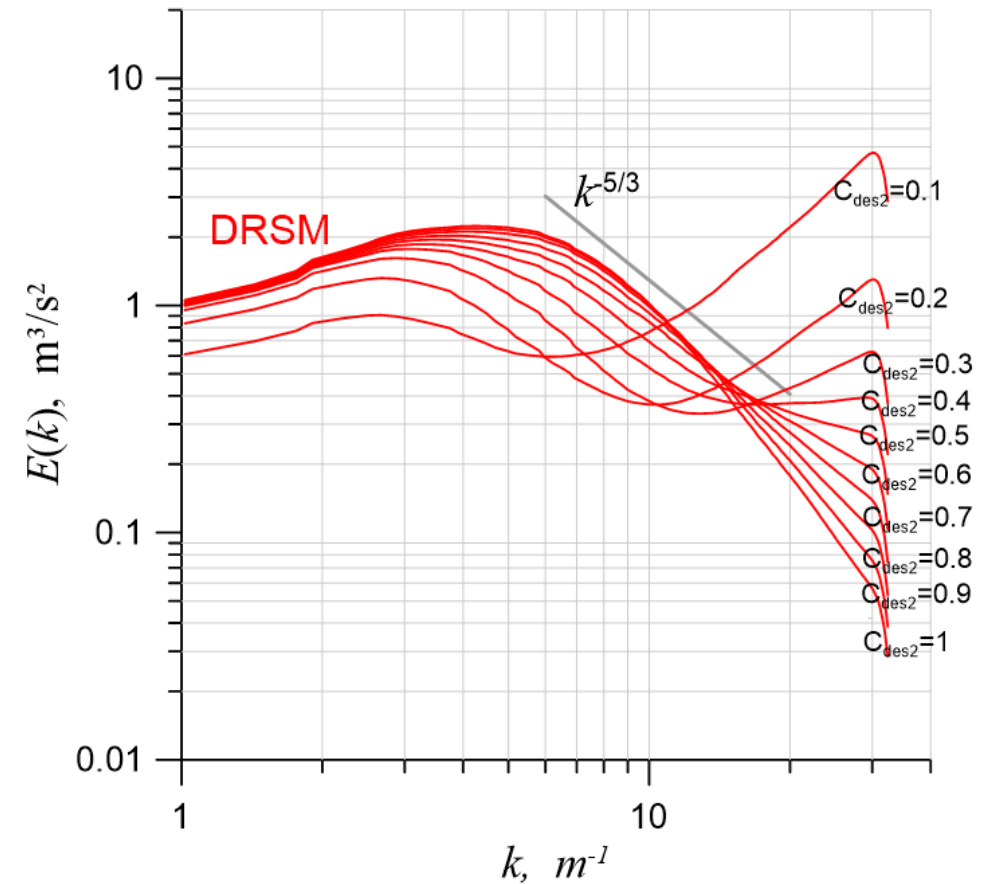
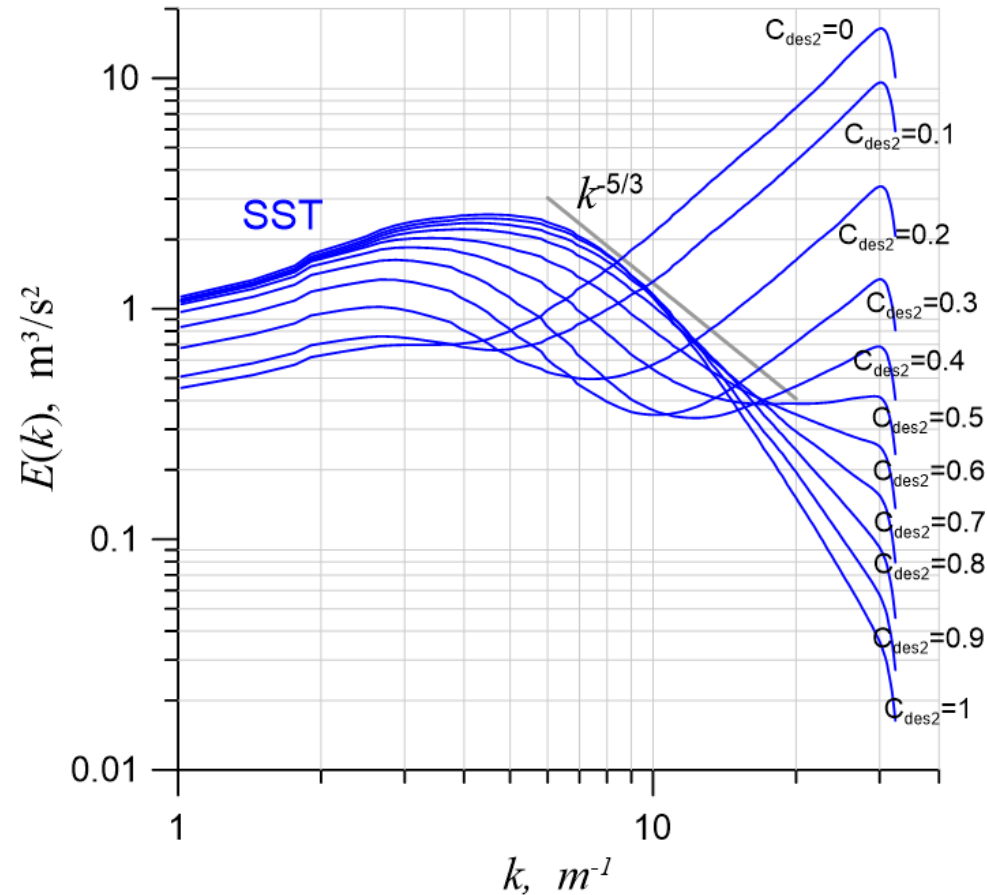
Если ни один из спектров не удовлетворяет – по трём ближайшим строится парабола

В качестве оптимального значения выбирается точка, соответствующая -5/3 и находящаяся внутри интерполяционного отрезка

[1] - 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 Turb. Combust., 2012, v.88, №3, p.431-449.

## Выбор оптимального значения константы

Расчёты на сетке с  $64^3$  ячейками с замыкающей моделью SST (слева) и DRSM (справа)



Оптимальное значение константы в обоих случаях оказалось равным 0.69 (базовое значение 0.61)



## Влияние порядка центрально-разностной схемы

Центральная разность 2-го порядка

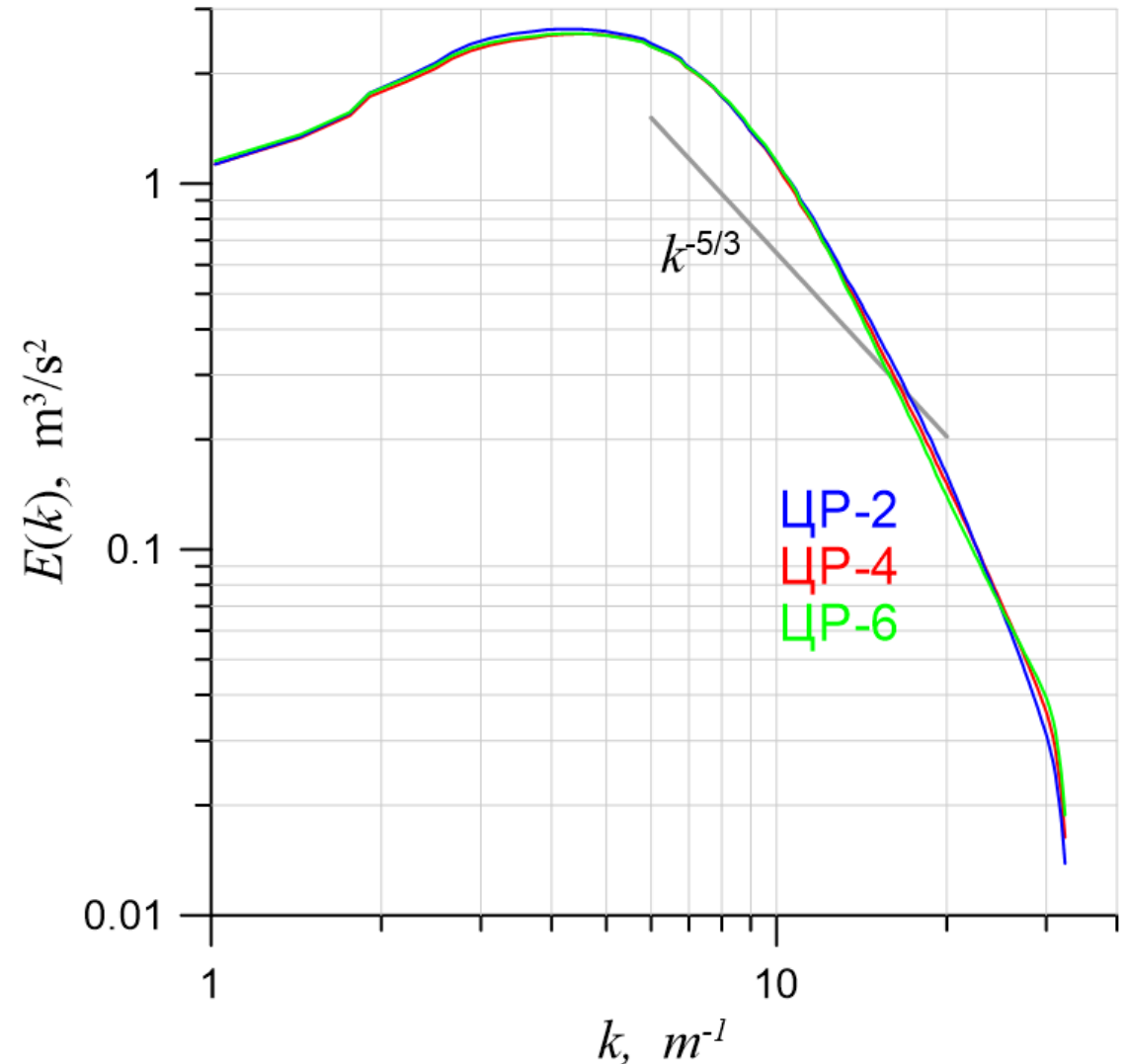
$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_j = \frac{u_{j+1}^n - u_{j-1}^n}{2h}$$

Центральная разность 4-го порядка

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_j = \frac{u_{j-2}^n - u_{j+2}^n + 8(u_{j+1}^n - u_{j-1}^n)}{12h}$$

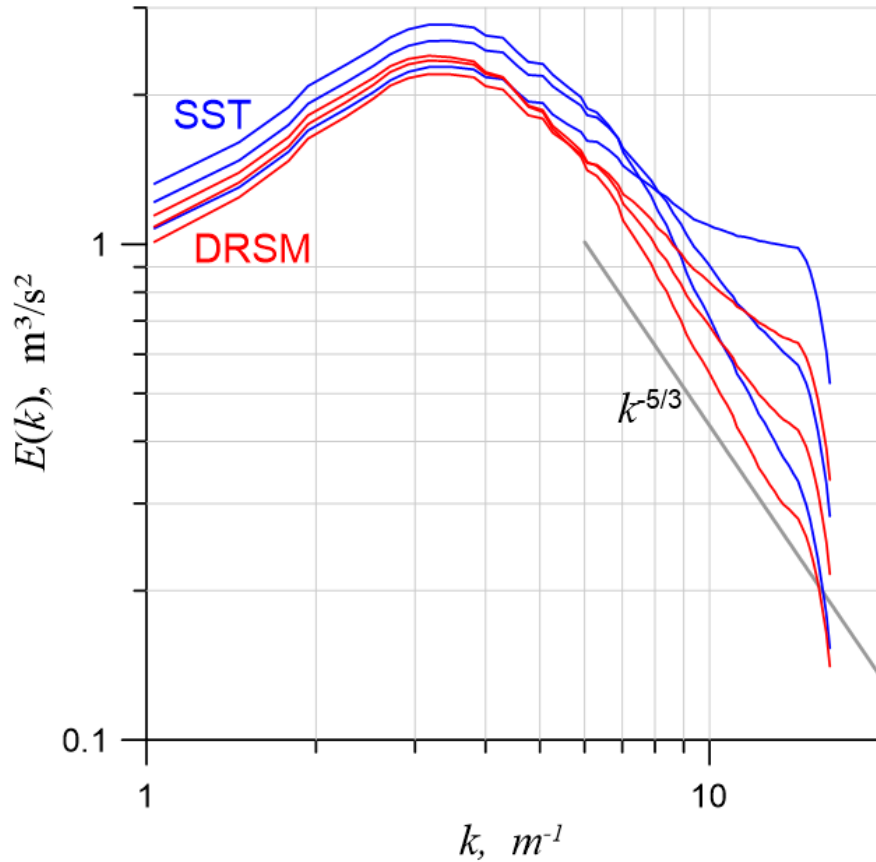
Центральная разность 6-го порядка

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_j = \frac{u_{j+3}^n - u_{j-3}^n + 9(u_{j-2}^n - u_{j+2}^n) + 45(u_{j+1}^n - u_{j-1}^n)}{60h}$$



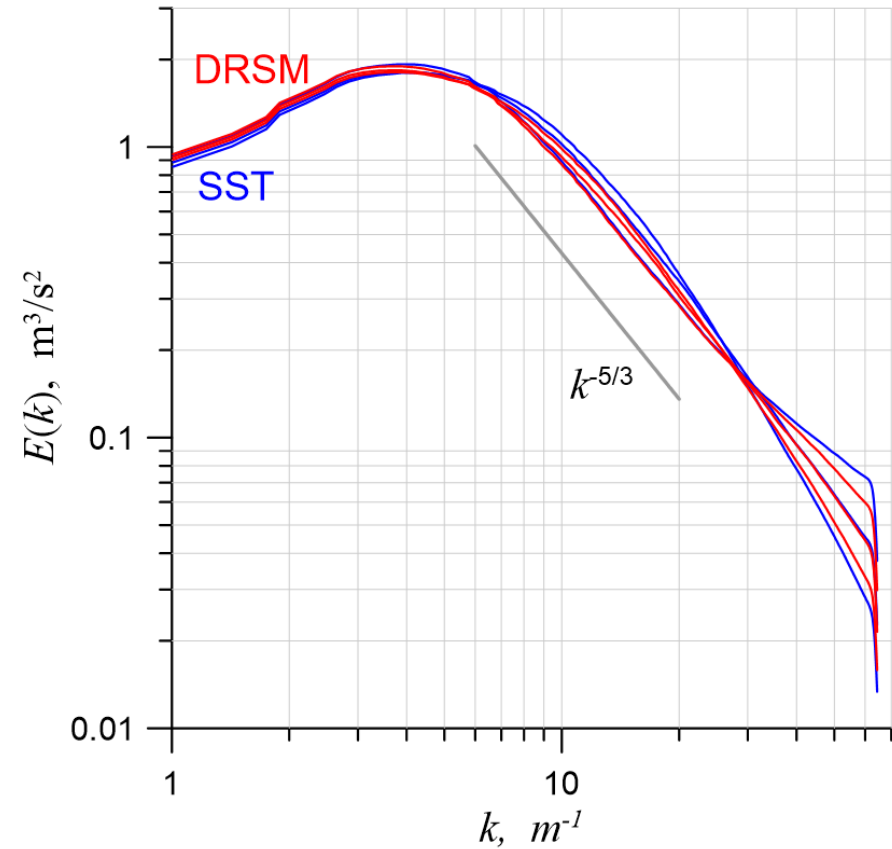
# Влияние сетки на оптимальное значение константы

Сетка с  $32^3$  ячейками



Оптимальный  $C_{des2}=0.7$  в обоих случаях

Сетка со  $128^3$  ячейками



Оптимальный  $C_{des2}=0.68$  в случае SST и  
 $0.67$  в случае DRSM

## Определение веса противоточной схемы

Разностная схема:  $WENO5 \cdot \sigma + (1 - \sigma) \cdot \text{ЦР}$

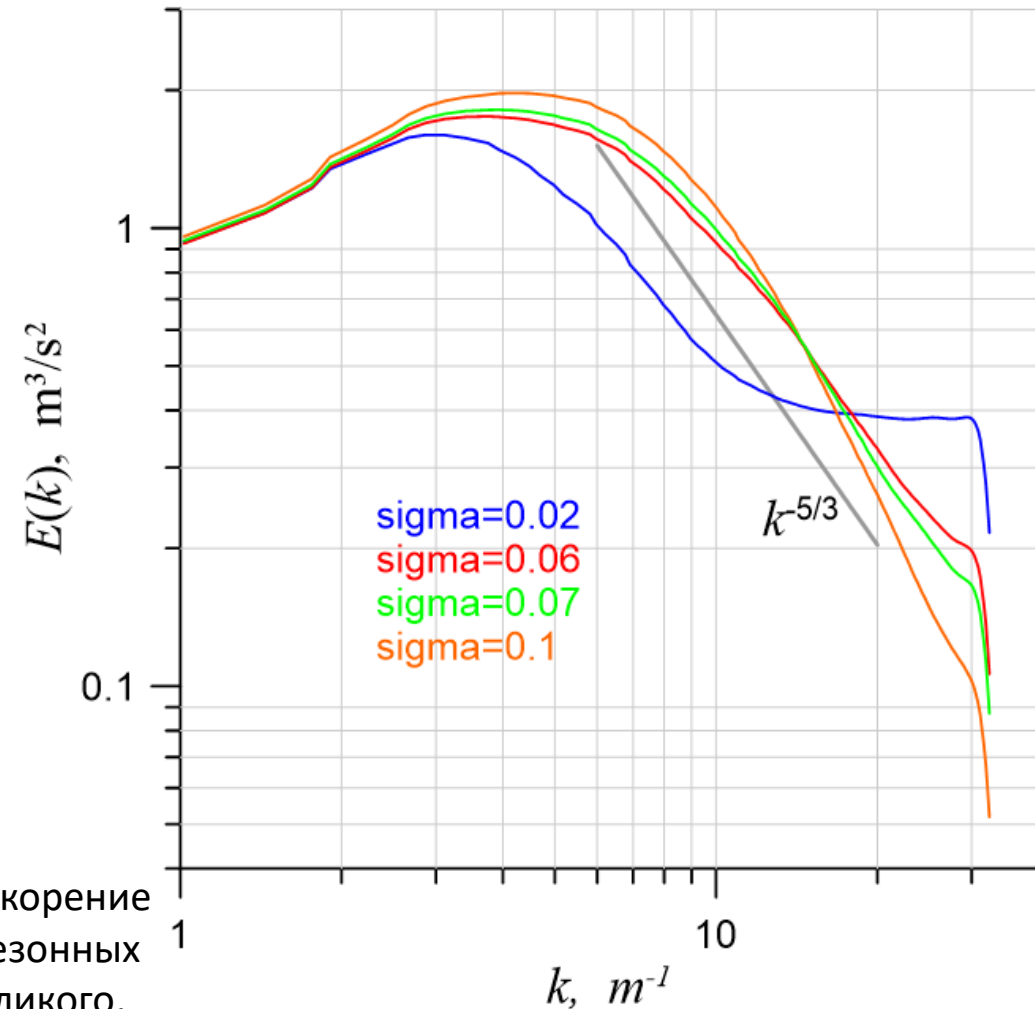
Идея: определить  $\sigma^*$ , при котором

присутствует влияние подсеточной модели

при  $\sigma > \sigma^*$  производить расчёт с помощьюILES  
подхода

увеличение  $\sigma$  соответствует уменьшению  $C_{des2}$

$C_{des2} = 0.001$  при  $\sigma = \sigma^* \approx 0.07$



Е.К. Гусева. Анализ и оценка эффективности методов, обеспечивающих ускорение перехода к численно разрешаемой турбулентности при использовании незонных гибридных подходов к расчёту турбулентных течений // СПбГПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, диссертация, 2017

## Выводы

- Во-первых, порядок ЦР незначительно влияет на форму спектра. Оптимальное значение  $C_{des2}$ , которое, как оказалось, хоть и зависит от сетки, превышает стандартное значение 0.61 (в рассмотренных случаях близко к 0.69) при использовании ЦР.
- Во-вторых, влияние замыкающей модели очень быстро уменьшается и уже при  $\sigma \approx 0.07$  становится несущественным (в данной конкретной постановке). После чего расчёт следует переводить в режим ILES.