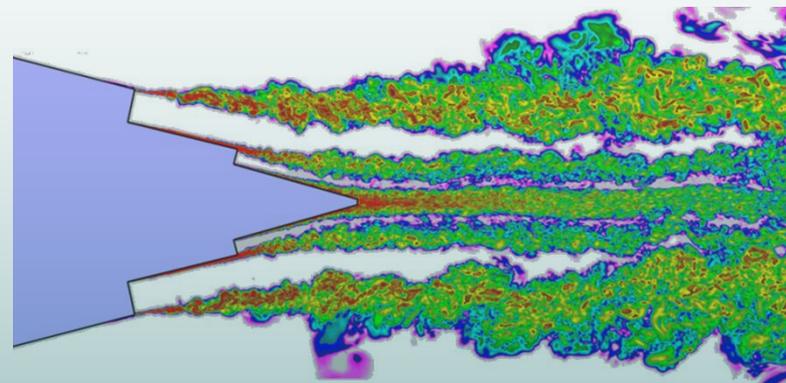
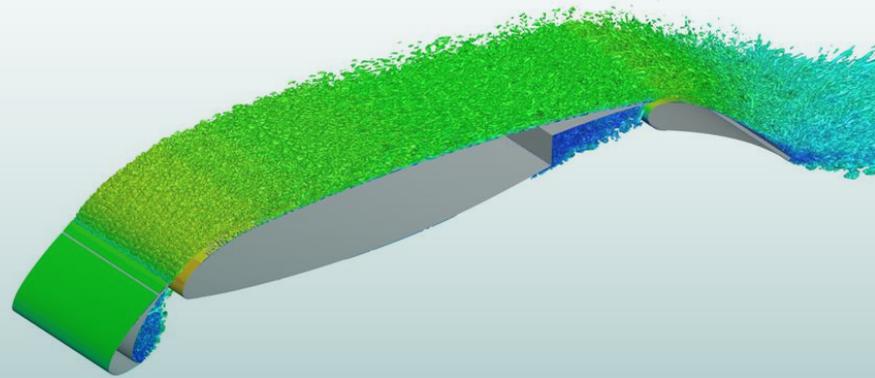
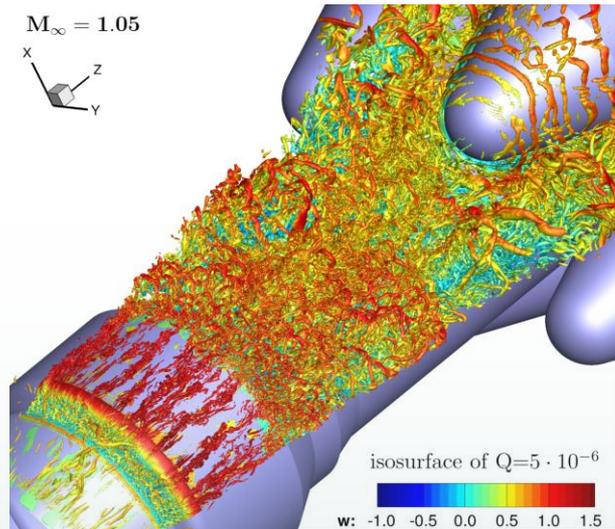


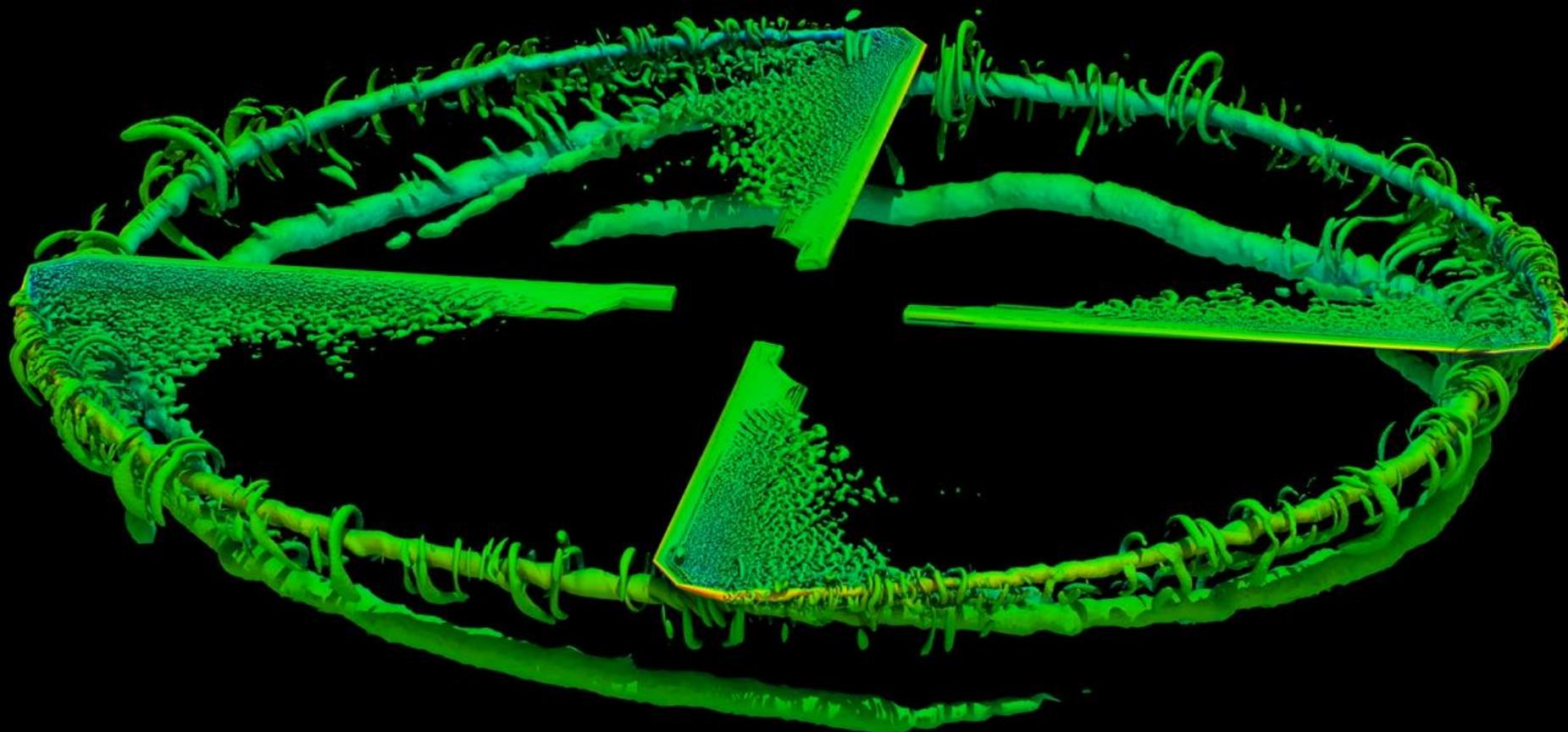
Вихреразрешающее CFD и САА моделирование в авиационных приложениях



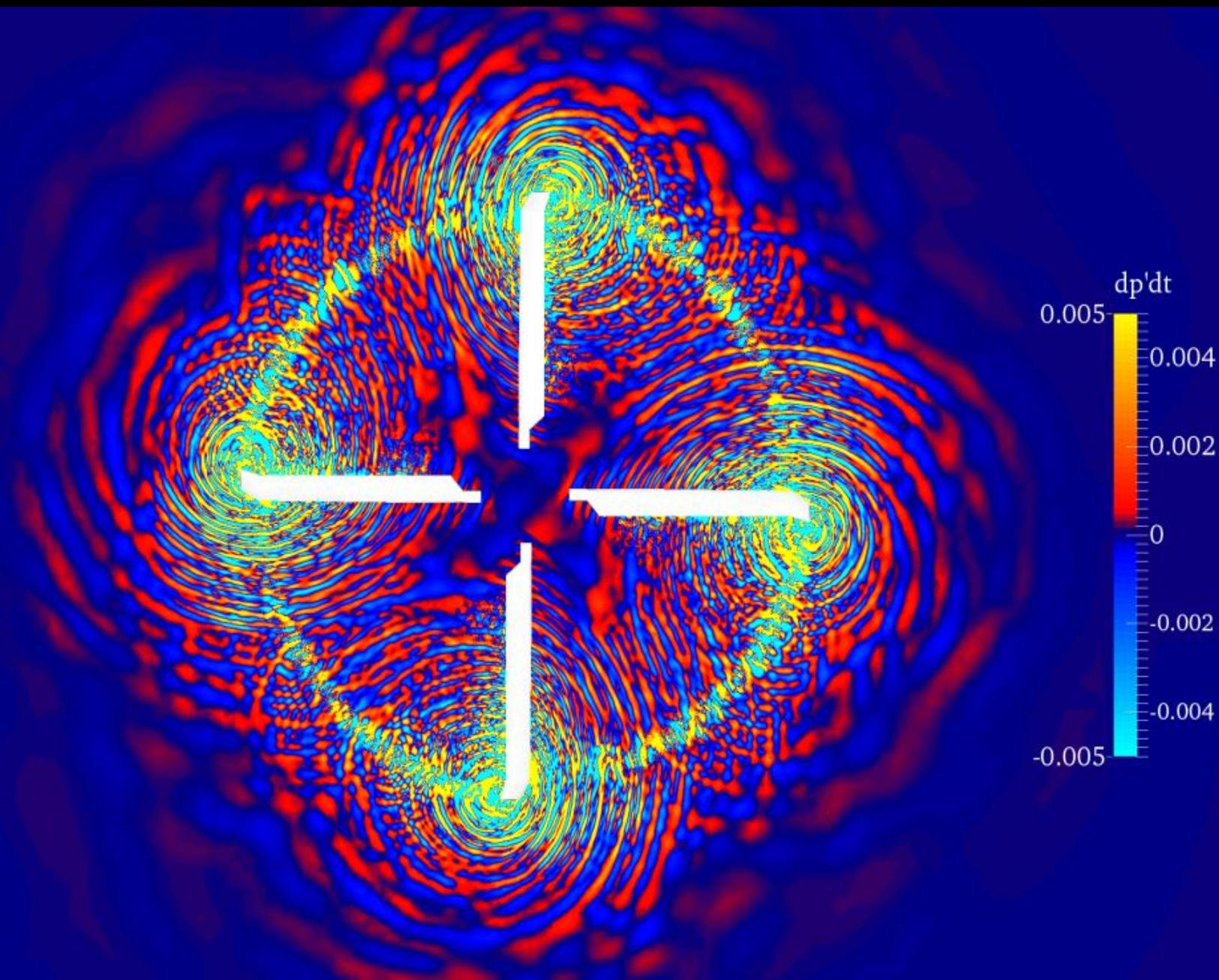
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН,
Сектор вычислительной аэродинамики и аэроакустики
<http://caa.imamod.ru>



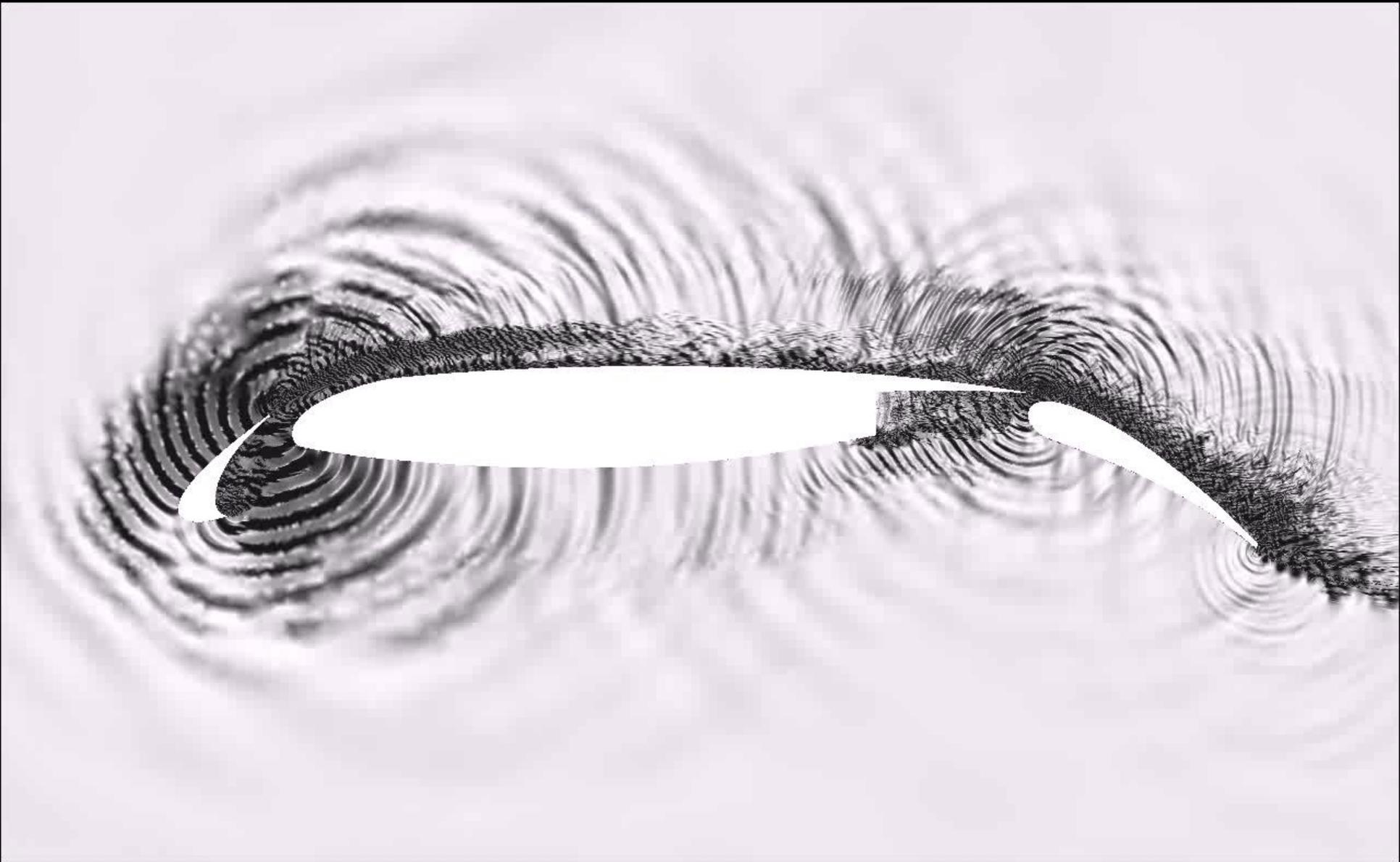
Моделирование несущего винта вертолета



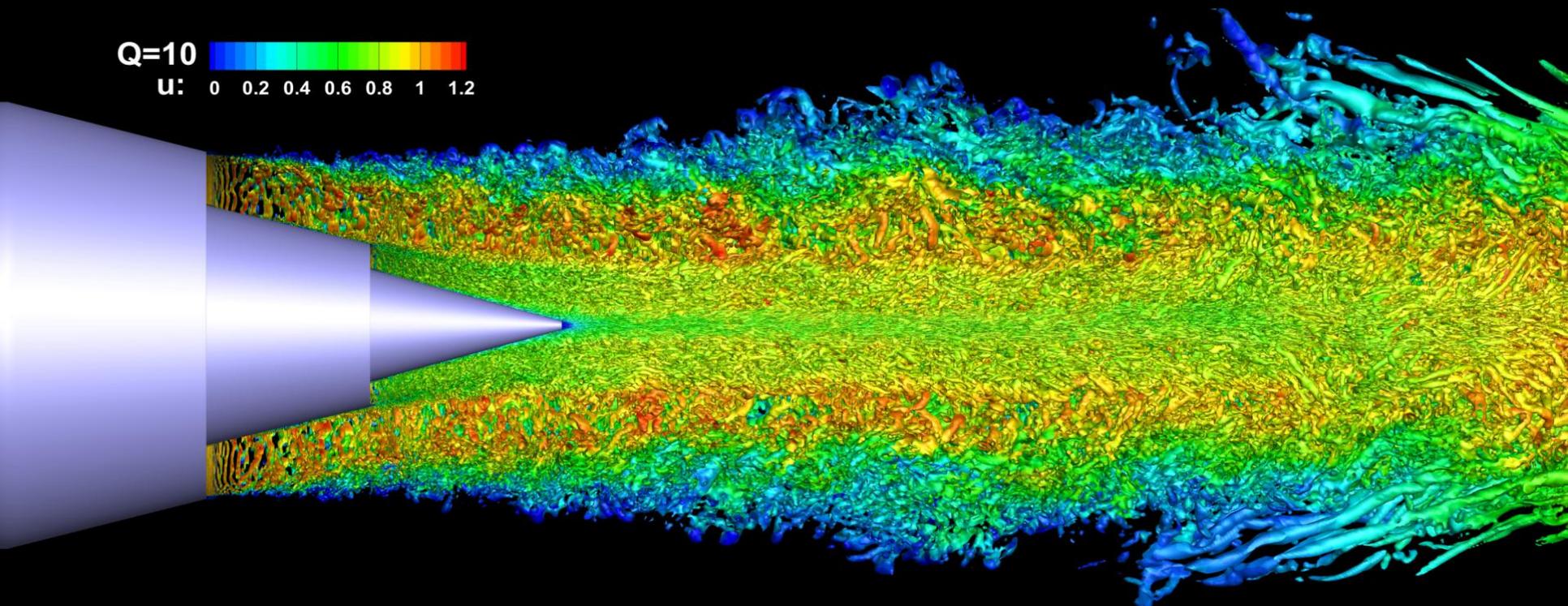
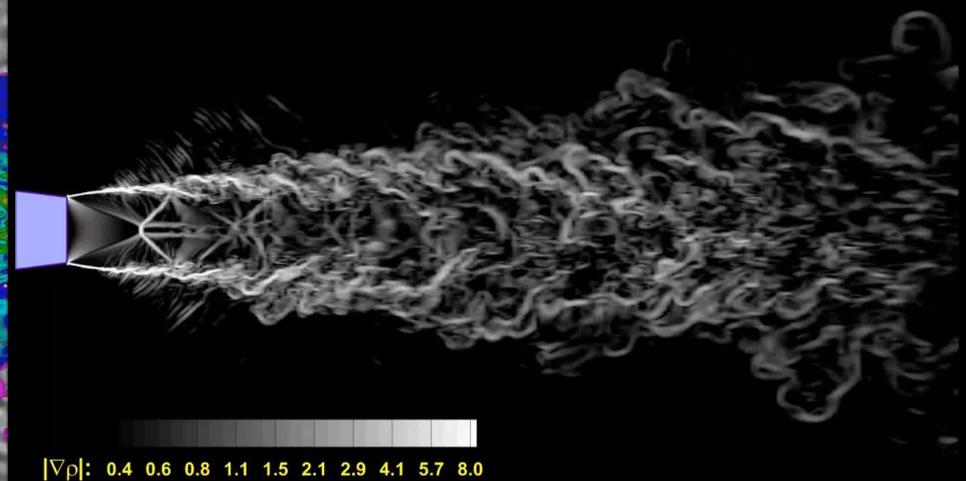
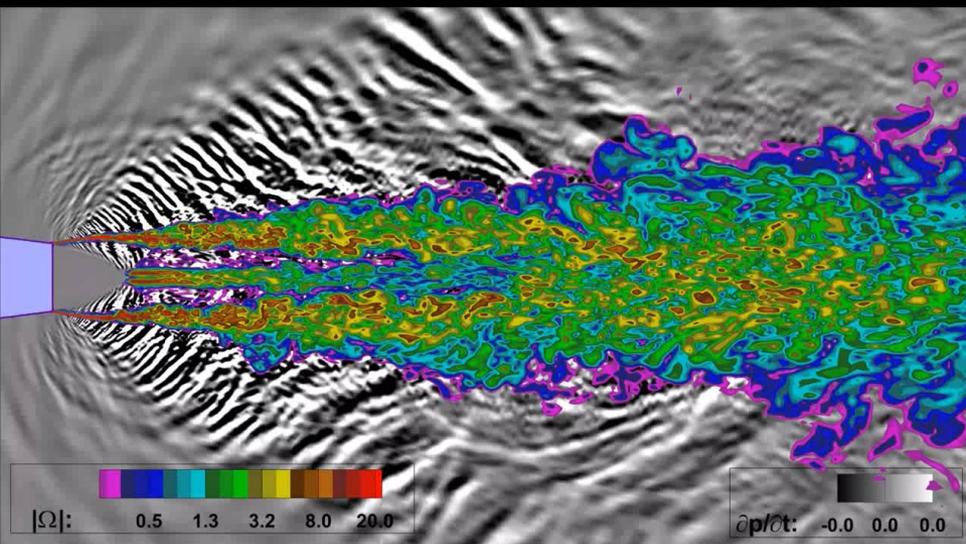
Моделирование несущего винта вертолета

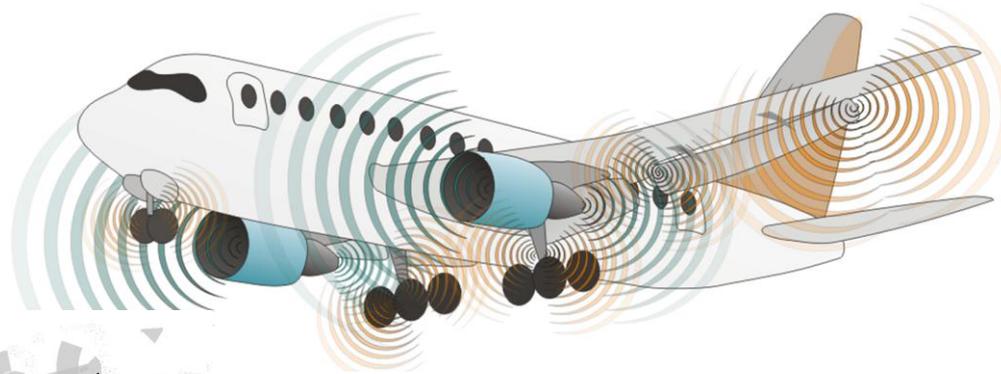


Моделирование крыла с механизацией



Моделирование реактивной струи





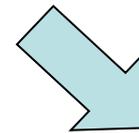
Прожигание CPU времени космического масштаба

Расчет самолета ценою с самолет

<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160009089.pdf>

<https://commonresearchmodel.larc.nasa.gov/files/2018/01/AIAA-2017-3362.pdf>

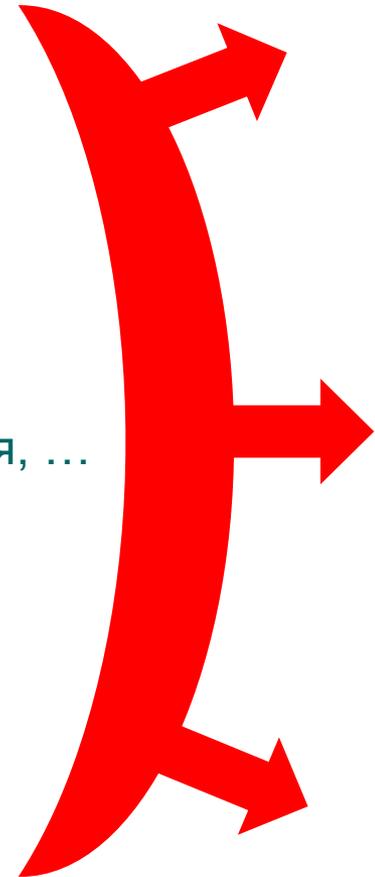
https://fs.hlr.de/projects/teraflop/26thWorkshop_talks/WSSP26-11-Kessler.pdf



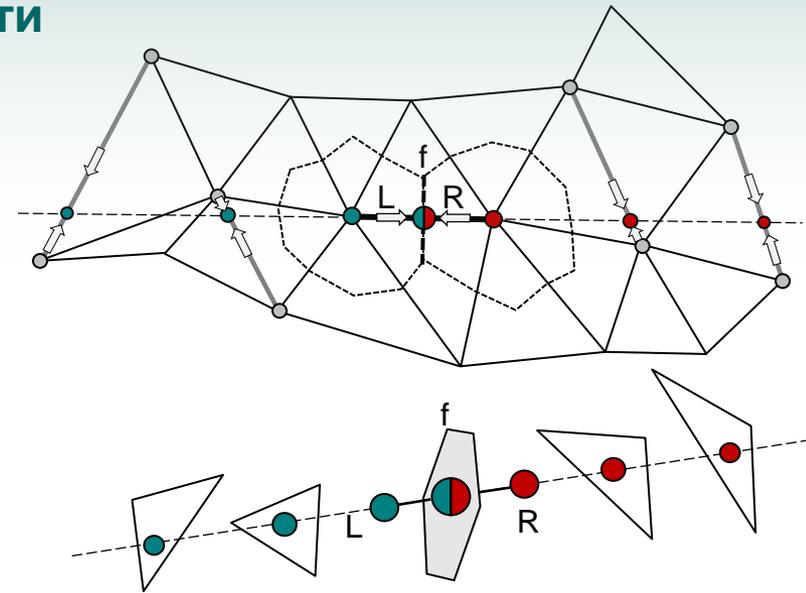
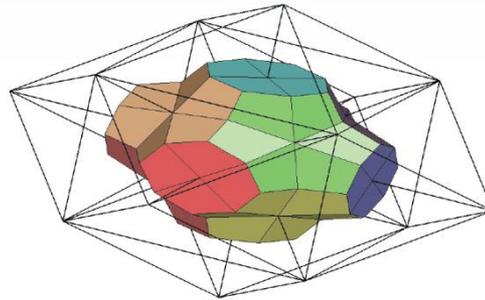
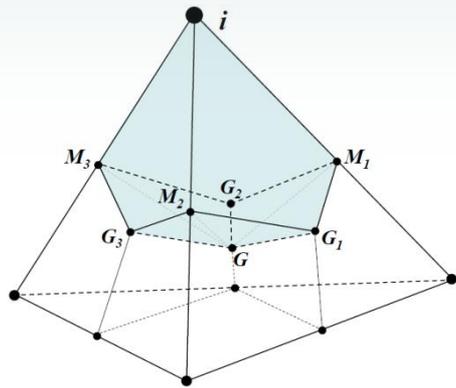
Недоразрешенное ColorFD

Генерация очень цветных,
но очень бессмысленных картинок

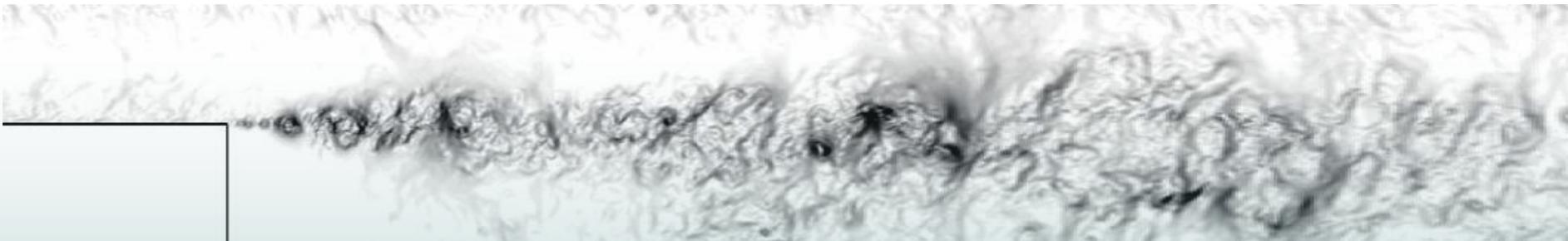
- **Экономичные и точные методы**
численные схемы, модели турбулентности, ...
- **Эффективные НРС реализации**
масштабируемые алгоритмы, гетерогенные вычисления, ...
- **Эффективные технологии проведения расчета**
адаптация сетки, ускорение ССР, постпроцесс, ...



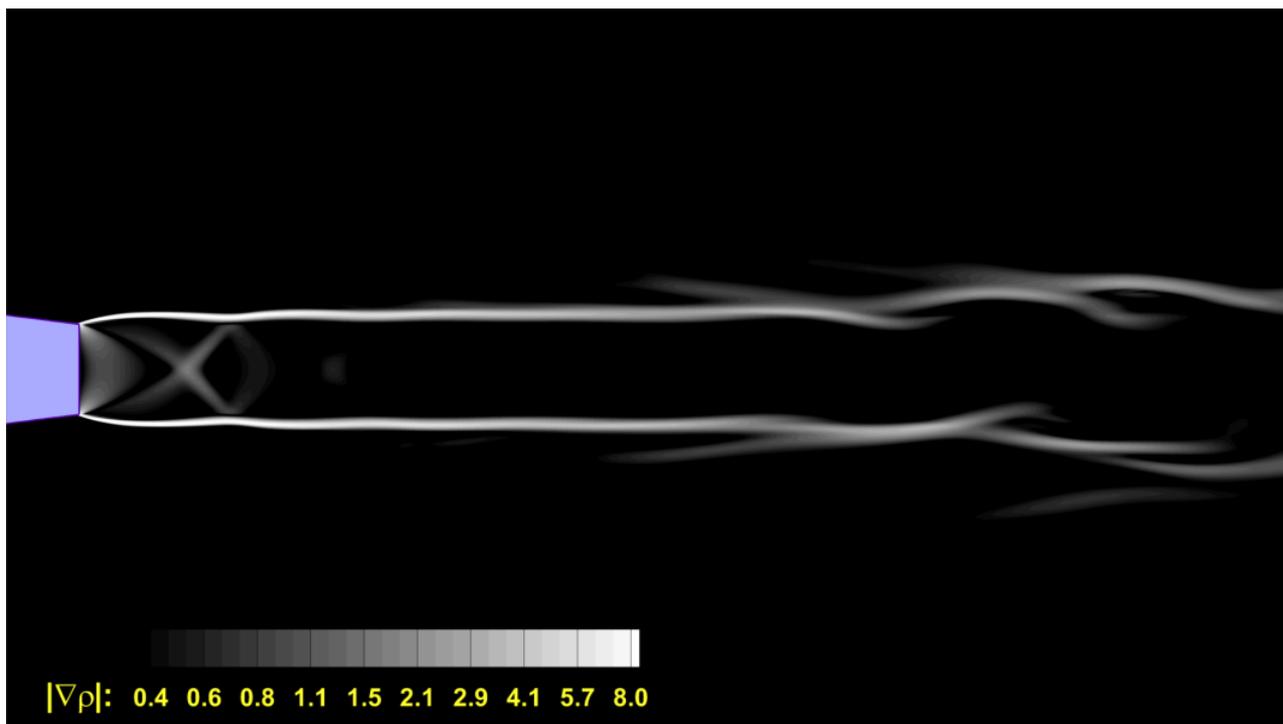
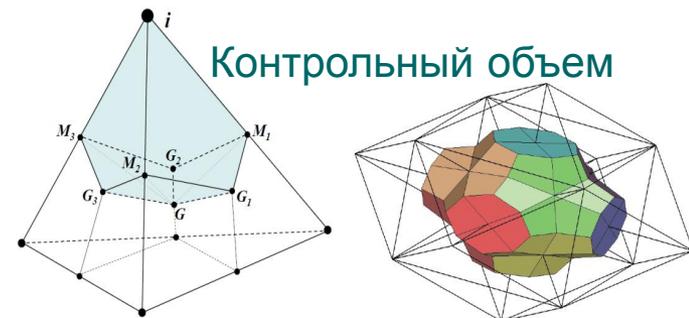
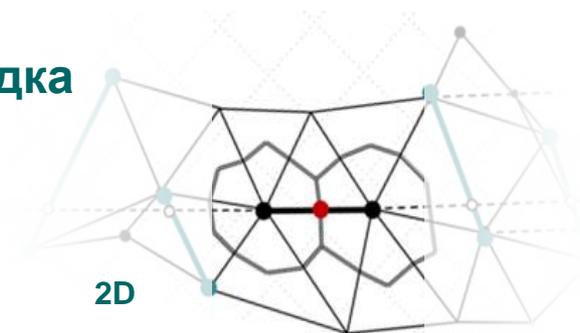
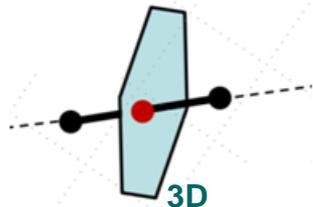
- Численные схемы повышенной точности



- Модели и подходы к моделированию турбулентности

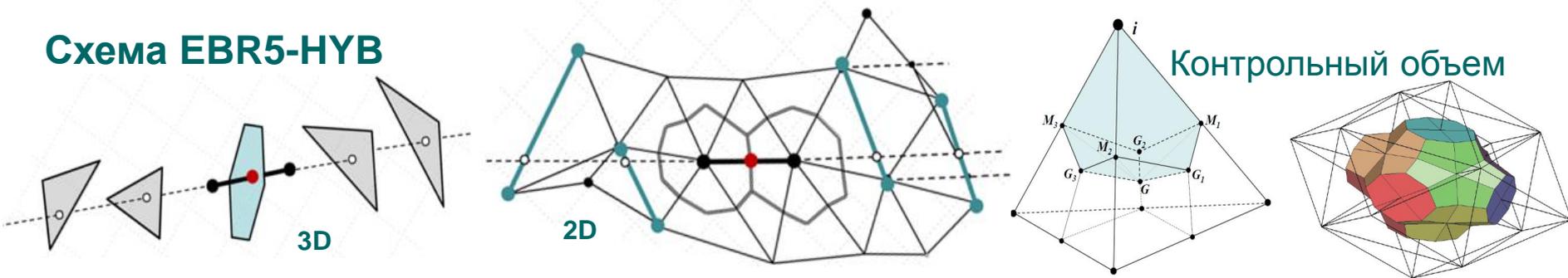


Базовая схема 1 порядка



Bakhvalov, P.A. & Kozubskaya, T.K. Comput. Math. and Math. Phys. (2017) 57: 680.
<https://www.doi.org/10.1134/S0965542517040030>

Схема EBR5-НУВ



+15% к стоимости относительно базовой схемы
До 5-го порядка точности (на ТС сетках)



Bakhvalov, P.A. & Kozubskaya, T.K. Comput. Math. and Math. Phys. (2017) 57: 680.
<https://www.doi.org/10.1134/S0965542517040030>

- **Универсальный подход**
сотни (тысячи?) статей,
рецепты на все случаи жизни и смерти
- **Любой порядок аппроксимации**
отличная точность на гладких решениях,
возможна подсеточная адаптация
- **Твёрдый математический базис**
линейная устойчивость на любой сетке, ...
- **Компактность вычислений**
хорошо ложится на новые архитектуры



Most promising framework
по мнению передовых
разработчиков схем

- **Высокая вычислительная стоимость:**
 - для неявной схемы;
 - для криволинейных элементов;
 - расчёт на структурированной сетке
по цене расчёта на неструктурированной;
- **Потеря точности на разрывах**
точность теряется, а стоимость остаётся



Не всегда
является лучшим
средством решения
конкретной задачи

- **Высокая стоимость неявной схемы**
возможно использование приближённых методов обращения матрицы
(по аналогии с R. Abgrall, <hal-01445543v2>)
- **Высокая стоимость на криволинейных сетках**
вместе со стоимостью растёт и плотность вычислений;
проблема нивелируется ростом мощностей
- **Расчёт задач с разрывами**
решение активно ищется
(см. десятки статей C.-W. Shu и M. Dumbser)



**Пациент
скорее жив**

Альтернативы DG на неструктурированных сетках:

- **Finite-Volume WENO schemes**

на тестах с разрывами работает лучше DG, но еще дороже и не так надёжно. Преимущества FV WENO пытаются инкорпорировать в DG.

- **Spectral Difference schemes**

чуть-чуть дешевле DG, но основные проблемы те же + менее надёжно.

- **Рёберные схемы (EBR, FC) и Multislope MUSCL schemes**

дёшево, но чувствительно к качеству сетки.

Хороший вариант, если в области интереса сетка близка к регулярной.

- **Active Flux scheme**

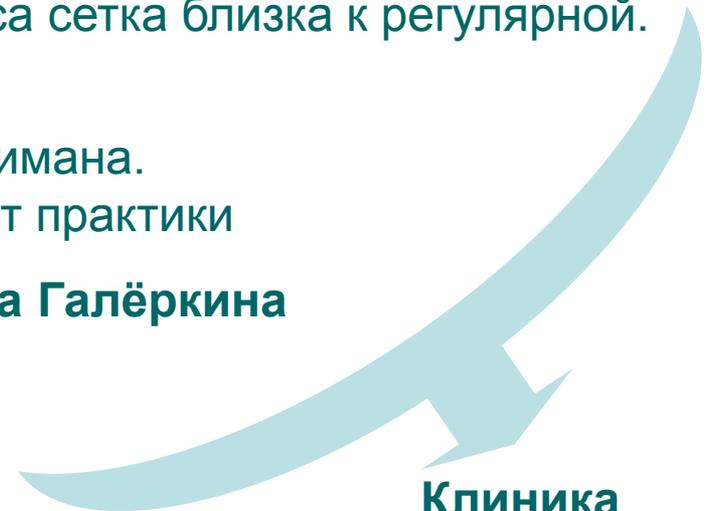
попытка избавиться от решения задачи Римана.

Разработка на начальном этапе, далека от практики

- **Схемы на основе непрерывного метода Галёркина**

метод Тейлора-Галёркина, SUPG и т. д.

Преимущества перед DG неясны.



**Клиника
численных методов
ждёт новых пациентов**

- Прямое численное моделирование DNS**
1-100M CPUh
1E20 FLOP
 СТОИМОСТЬ ##### ТОЧНОСТЬ #####
- Моделирование крупных вихрей LES**
100K-10M CPUh
 СТОИМОСТЬ ##### ТОЧНОСТЬ #####
- RANS – осредненные уравнения Н-С**
100 – 10K CPUh
 СТОИМОСТЬ # ТОЧНОСТЬ ###
- RANS-LES гибридные подходы (DES)**
 СТОИМОСТЬ ### ТОЧНОСТЬ #####



Рис. 1. Энергетический спектр изотропной трехмерной турбулентности.

- **Возможности RANS существенно ограничены применительно к расчету сложных турбулентных течений**
(особенно при отрывняке, транс- и сверхзвуковых режимах, ...)

Ведутся работы по улучшению RANS для расчета пограничного слоя с неблагоприятным градиентом давления, для расчета отрывной зоны и др.

C.Grabe et al. A Strategy for RANS Turbulence Model Improvement // HiFiLeD Symposium, 2018

- **Оптимальный выбор по соотношению цена – точность среди вихреразрешающих расчетов: гибридные RANS-LES методы**

Технологически сложная вещь.

«Слепое» применение гибридных RANS-LES методов может не привести к желаемому результату: требуется понимание физических особенностей течения, используемых моделей, возможностей численных методов, сеткопостроителей,...

- **Возможности улучшения гибридных RANS-LES практически исчерпаны. Усилия направлены, в частности, на решение проблемы «серой зоны»**
Ведутся работы, например, по ускорению «численного» перехода от RANS к LES в слоях смешения за счет использования специальных подсеточных масштабов и/или альтернативных LES моделей

Go4Hybrid: Grey Area Mitigation for Hybrid RANS-LES Methods // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design 134, 2018

F.X.Trias, A.Gorobets, M.H.Silvis, R.W.C.P.Verstappen, and A.Oliva. A new subgrid characteristic length for turbulence simulations on anisotropic grids. Physics of Fluids, 29, 115109 (2017)

- **Дальнейшие улучшения связаны с повышением «технологичности» вихреразрешающих алгоритмов и кодов**

P.R.Spalart & M.K.Strelets. Attached and Detached Eddy Simulation // Progress in Hybrid RANS-LES Modelling, 2018

адаптивные численные схемы, адаптивные сетки,
зонные подходы, методы генерации синтетической турбулентности, ...

Суперкомпьютерный рейтинг по HPL

HPL
High
Performance
Linpack

Прямое решение
СЛАУ с плотной
LU разложением

$O(N^2)$ по памяти

$O(N^3)$ FLOP

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband , IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,397,824	143,500.0	200,794.9	9,783
2	Sierra - IBM Power System S922LC, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband , IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438
3	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway , NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
4	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000 , NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
5	Piz Daint - Cray XC50, Xeon E5-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect , NVIDIA Tesla P100 , Cray Inc. Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	387,872	21,230.0	27,154.3	2,384
6	Trinity - Cray XC40, Xeon E5-2698v3 16C 2.3GHz, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Aries interconnect , Cray Inc. DOE/NNSA/LANL/SNL United States	979,072	20,158.7	41,461.2	7,578
7	AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) - PRIMERGY CX2570 M4, Xeon Gold 6148 20C 2.4GHz, NVIDIA Tesla V100 SXM2, Infiniband EDR , Fujitsu	391,680	19,880.0	32,576.6	1,649

<https://www.top500.org/lists/2018/11/>

Суперкомпьютерный рейтинг по HPCG

HPCG
High
Performance
Conjugate
Gradient

Итерационное
решение
СЛАУ с
разреженной
матрицей

Компот из CG,
MG,
Гаусса-Зейделя

O(N) по памяти

O(N) FLOP

June 2018 HPCG Results

Rank	Site	Computer	Cores	HPL Rmax (Pflop/s)	TOP500 Rank	HPCG (Pflop/s)	Fraction of Peak
1	DOE/SC/ORNL USA	Summit – AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, dual-rail Mellanox EDR Infiniband, NVIDIA Volta V100 IBM	2,392,000	122.300	1	2.926	1.5%
2	DOE/NNSA/LLNL USA	Sierra – S922LC, Power9 180224C 3.1GHz, Mellanox EDR, NVIDIA Tesla V100 IBM / NVIDIA / Mellanox	835,584	71.610	3	1.796	1.5%
3	RIKEN Advanced Institute for Computational Science Japan	K computer – , SPARC64 VIIIIfx 2.0GHz, Tofu interconnect Fujitsu	705,024	10.510	16	0.603	5.3%
4	DOE/NNSA/LANL/SNL USA	Trinity – Cray XC40, Intel Xeon E5-2698 v3 300160C 2.3GHz, Aries Cray	979,072	14.137	9	0.546	1.8%
5	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	Piz Daint – Cray XC50, Intel Xeon E5-2690v3 12C 2.6GHz, Cray Aries, NVIDIA Tesla P100 16GB Cray	361,760	19.590	6	0.486	1.9%
6	National Supercomputing Center in Wuxi China	Sunway TaihuLight – Sunway MPP, SW26010 260C 1.45GHz, Sunway NRCPC	10,649,600	93.015	2	0.481	0.4%
7	Joint Center for Advanced High Performance Computing Japan	Oakforest-PACS – PRIMERGY CX600 M1, Intel Xeon Phi Processor 7250 68C 1.4GHz, Intel Omni-Path Architecture Fujitsu	557,056	13.555	12	0.385	1.5%

<http://www.hpcg-benchmark.org/>

НПСГ

Крайне низкая
интенсивность
вычислений

1-2% от пика

Излишне жестокое
обращение
с матчастью



Реальные приложения
5-10% от пика

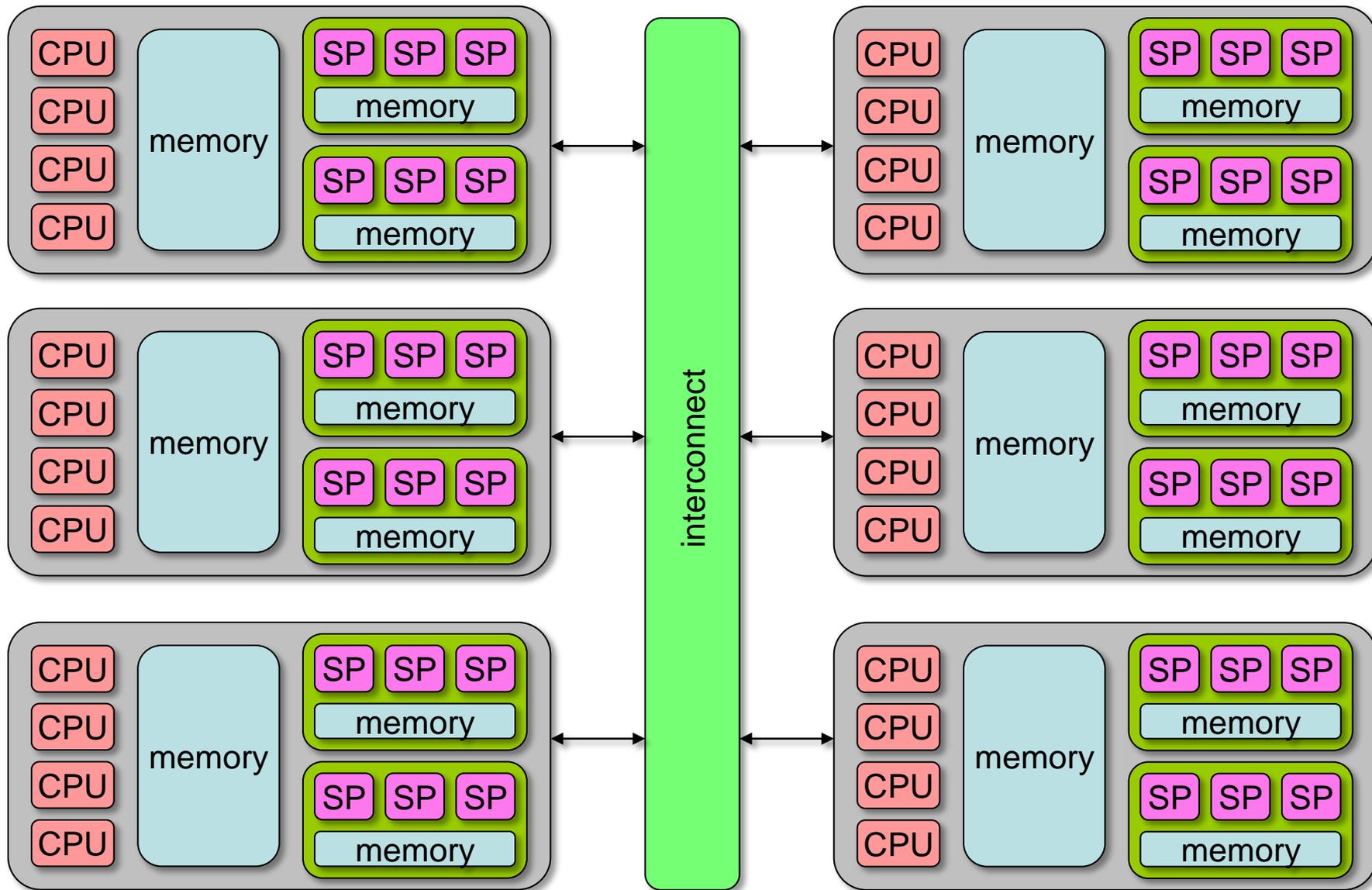


НРЛ

Высокая
интенсивность
вычислений

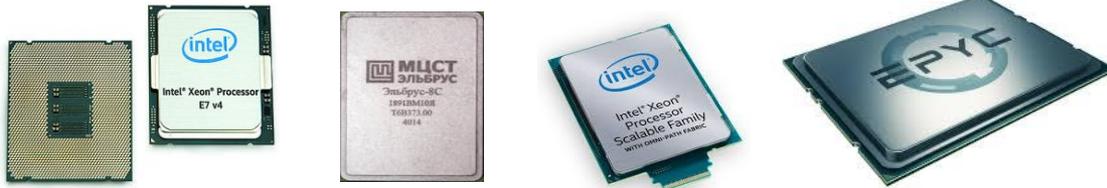
70-90% от пика

Слишком
удобный
для матчасти



Зоопарк вычислительных устройств

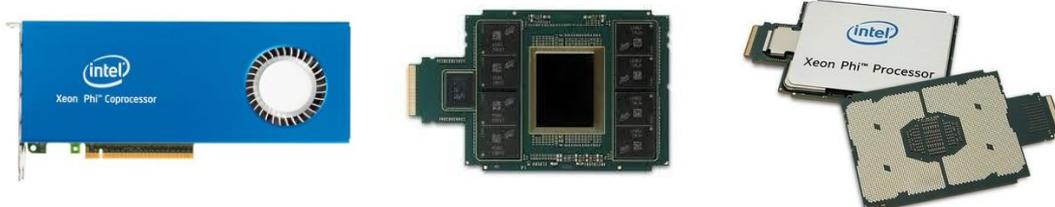
CPU: multicore, superscalar, out-of-order или WLIV, SIMD



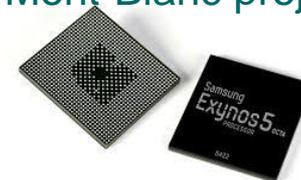
Векторные процессоры
NEC



MIC: manycore, Intel Xeon Phi



SoC CPU+GPU
см. Mont-Blanc project



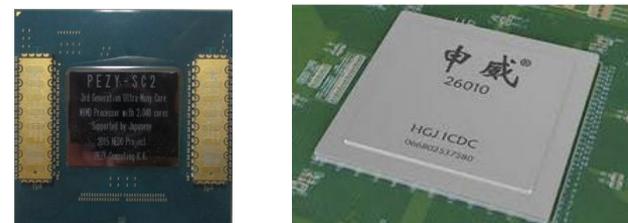
FPGA ускорители



GPU: stream processing



Ultra-manycore
PEZY-SC, SunWay



*картинки уперты с сайтов производителей и из прочих интернетов

**Массивно-параллельная обработка
элементов расчетной области**
(узлы, грани, сеточные элементы, ...)

**Заполнение данных для реконструкции
цикл по набору ячеек**



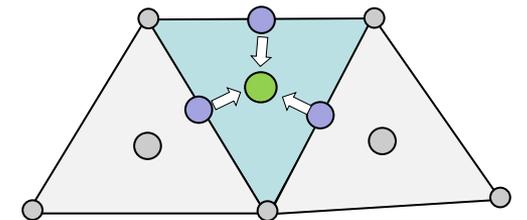
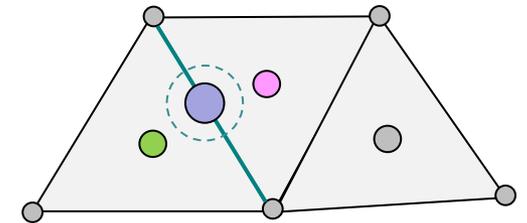
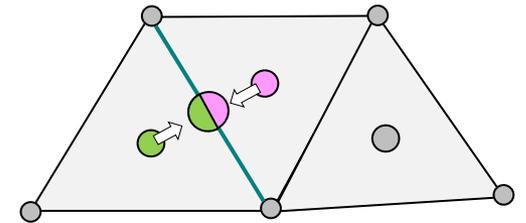
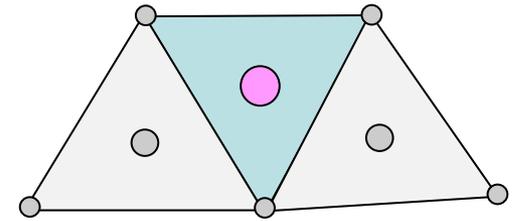
**Реконструкция по значениям в ячейках
значений на гранях**
цикл по набору граней



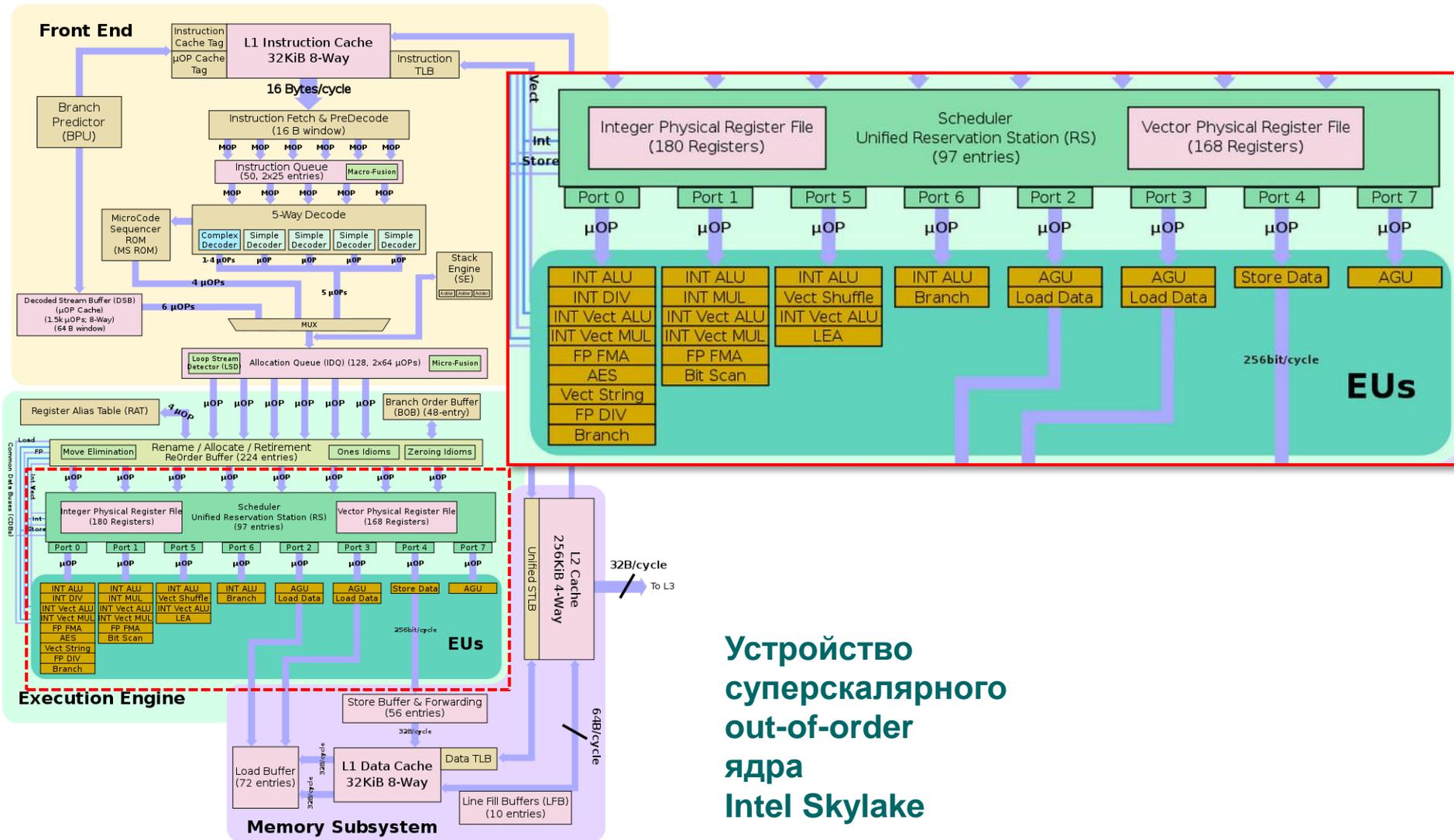
Расчет потока через грань
решение задачи Римана о распаде разрыва
цикл по набору граней



**Переход на новый временной слой:
суммирование потоков через грани в ячейки**
цикл по набору ячеек



Суперскалярность и out-of-order



Устройство суперскалярного out-of-order ядра Intel Skylake

[https://en.wikichip.org/wiki/intel/microarchitectures/skylake_\(client\)](https://en.wikichip.org/wiki/intel/microarchitectures/skylake_(client))

Организация вычислений на GPU

Volta



<https://www.ixbt.com/video4/nvidia-volta.shtml>

Kepler

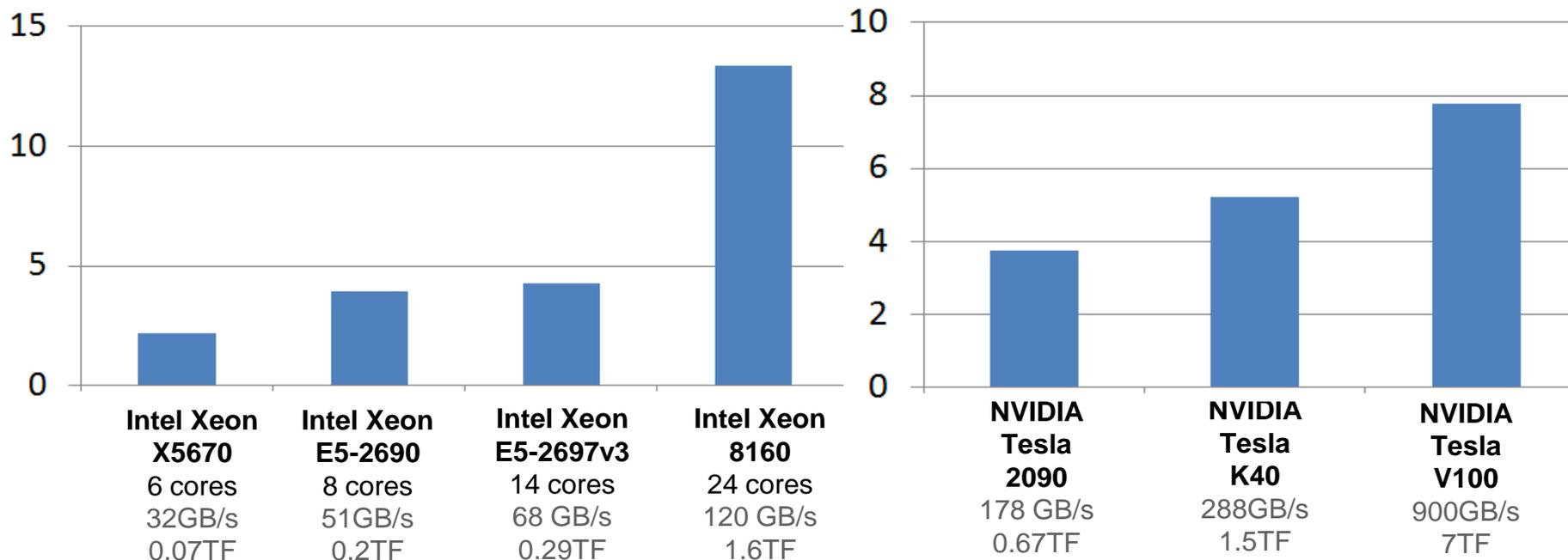


Pascal



<https://devblogs.nvidia.com/inside-pascal/>

Разрыв между производительностью и пропускной способностью



Отношение пиковой производительности
и пропускной способности памяти

А как увеличить bandwidth?

- расширить шину
- повысить частоту

- Intel Xeon Platinum – разъем FCLGA3647
- DDR4 DIMM – 288 контактов

Вывод – слишком много ножек

3D микросборка – многослойные микросхемы памяти

HBM, HMC, MCDRAM, ...

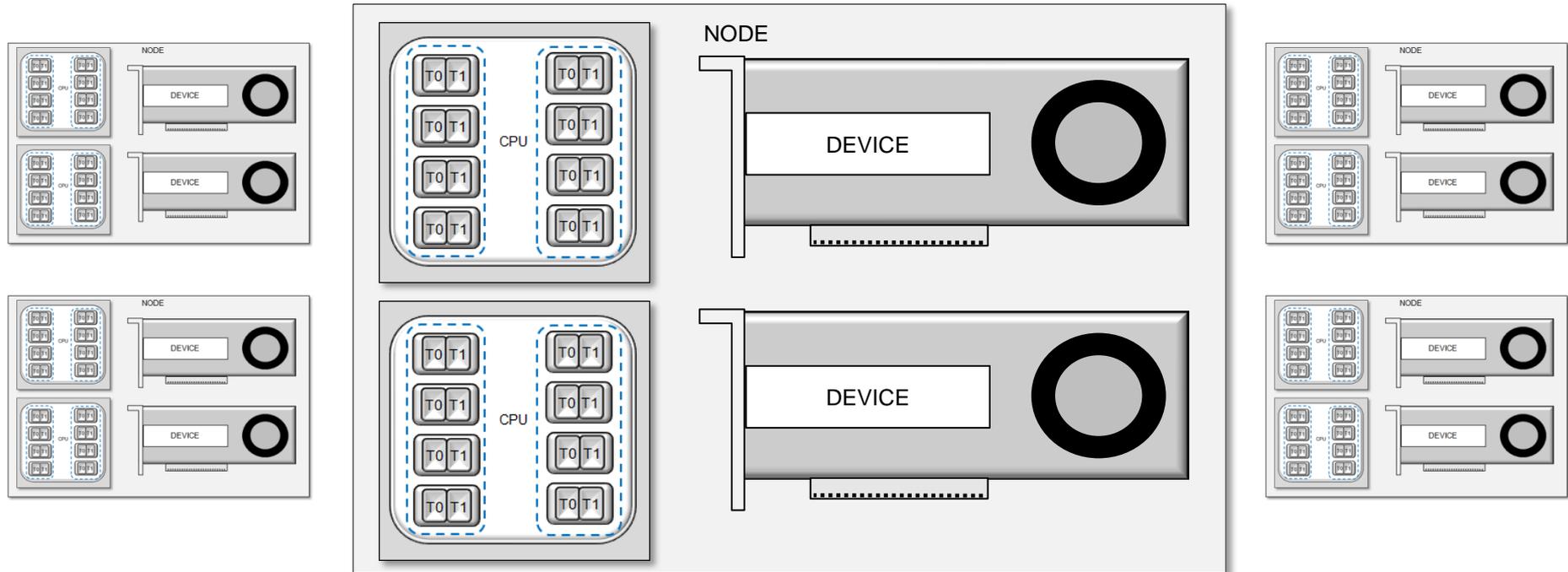
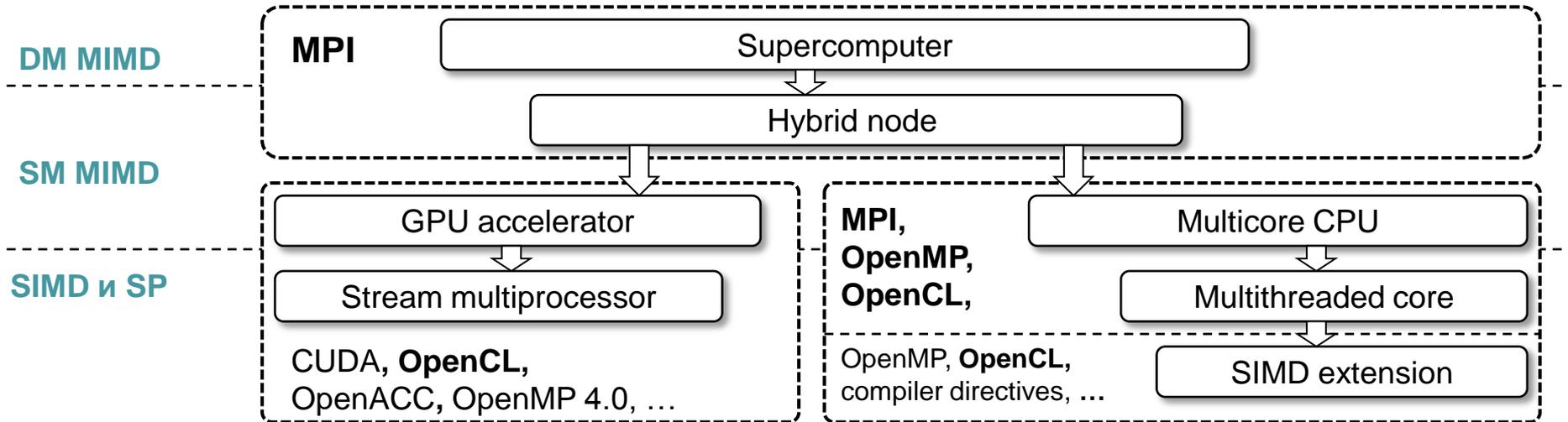
Латентность не уменьшается, тайминги только растут
снижает влияние латентности CPU с SMT, GPU oversubscription

Intel Xeon Phi: DRAM + MCDRAM

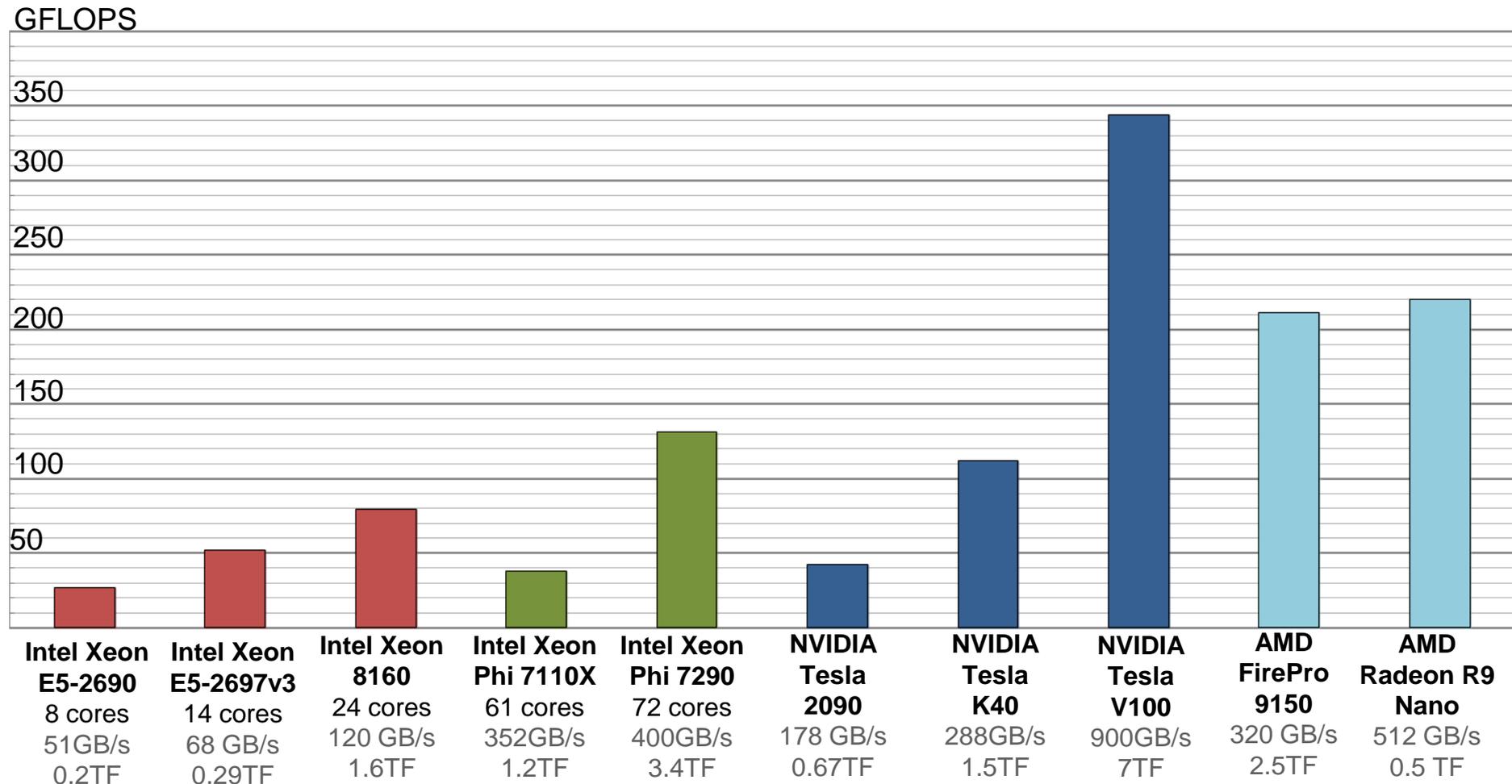
Многоканальные контроллеры на два типа памяти

- **DRAM x6 DDR4 ~100 GB/s**, большой объем
- **MCDRAM – 3D микросборка, ~400 GB/s**, объем 8-16 GB
- **Латентность MCDRAM выше, чем DDR4**
- **Режимы cache, flat, hybrid**
- **API memkind** для выбора типа памяти в программе
- **numactl** для выбора типа памяти при запуске
 - numactl –m 0 task.px берет память только с DRAM
 - numactl –m 1 task.px берет память только с MCDRAM

Уровни параллелизма и средства разработки

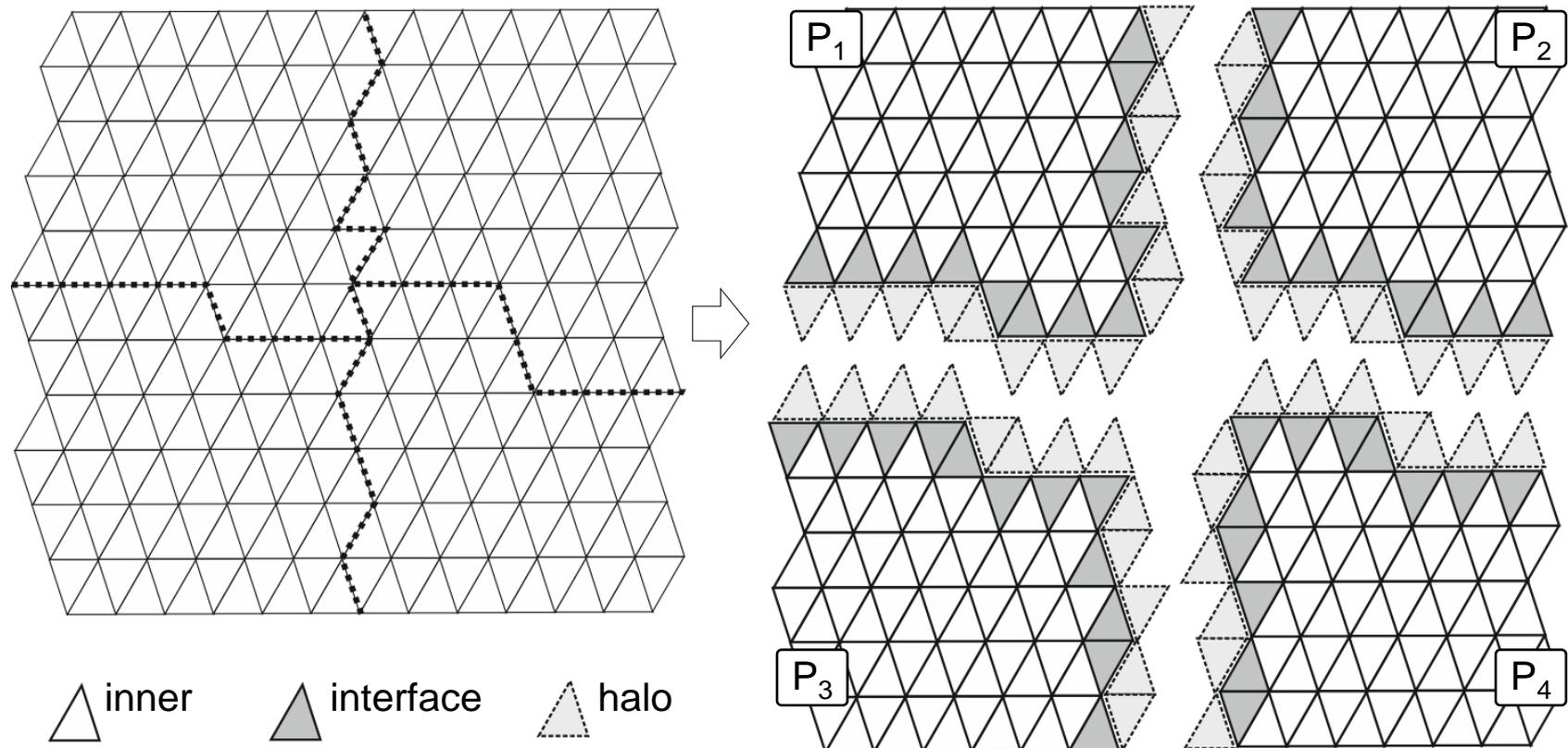


Сравнение устройств на гетерогенном CFD коде

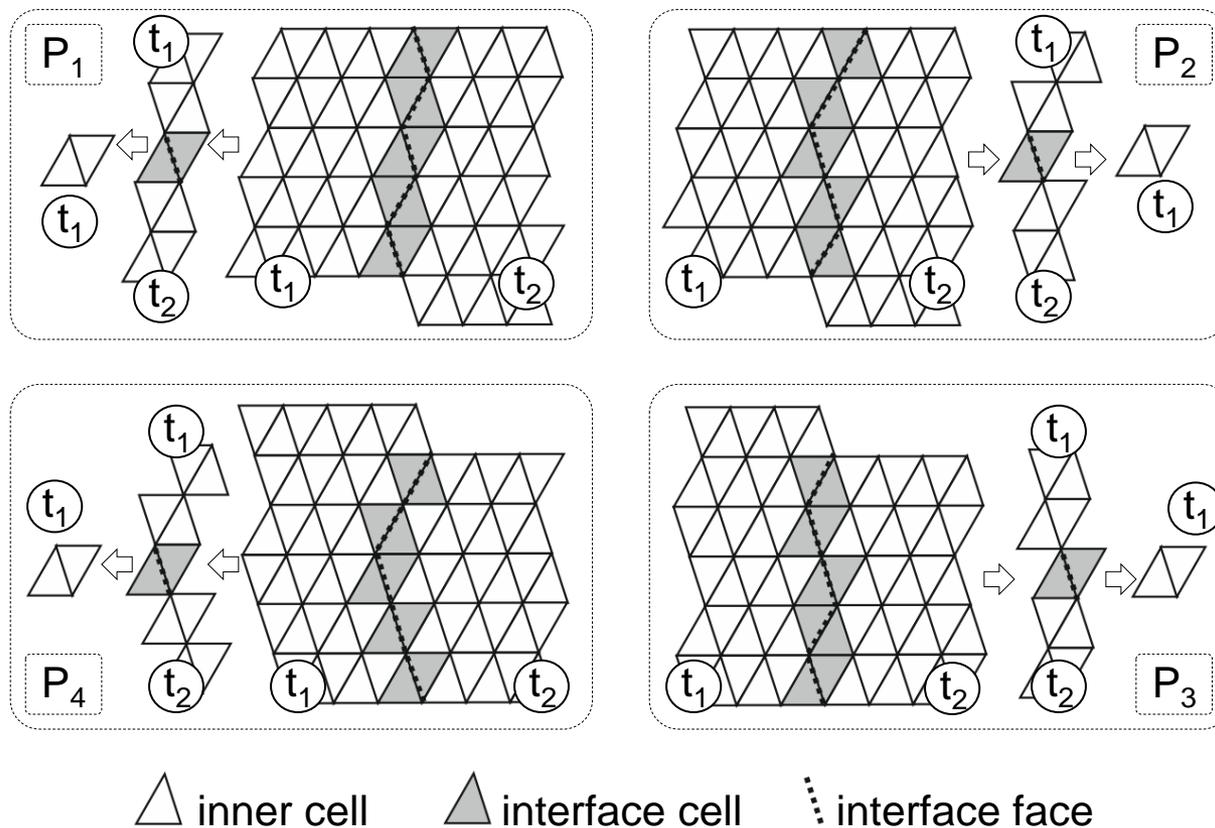


Сетка 445 тыс. ячеек. 1 шаг по времени 5 мс на AMD Nano
 AI ~2 FLOP/byte, ~2.5 KFLOP на ячейку, ~1.1KB на ячейку

Распараллеливание с распределенной памятью DM-MIMD Domain decomposition

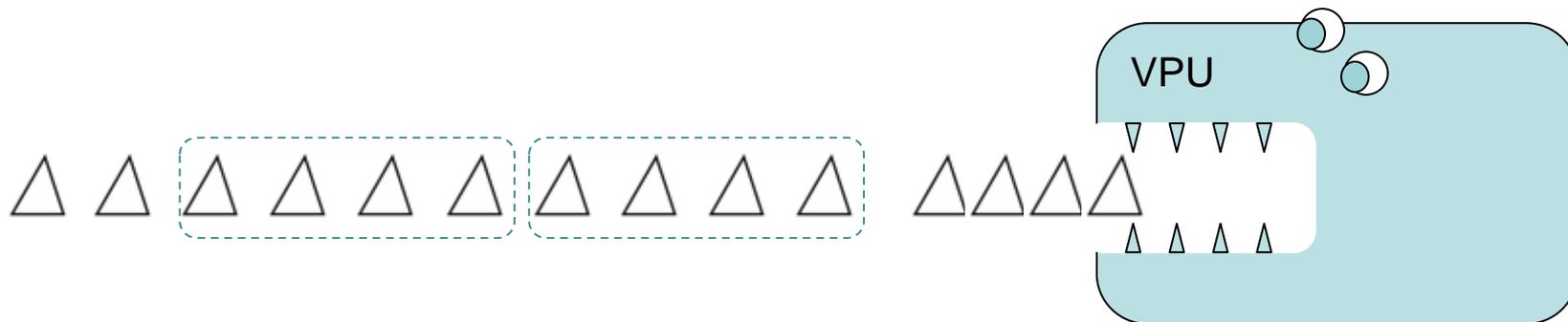


Распараллеливание с общей памятью SM-MIMD Domain decomposition

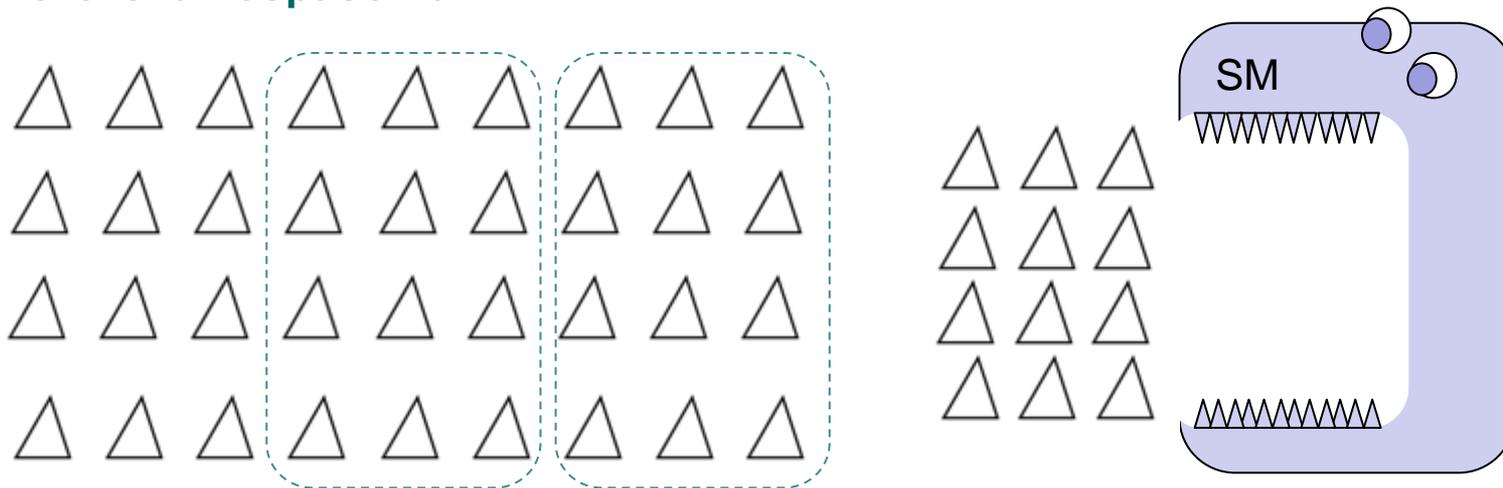


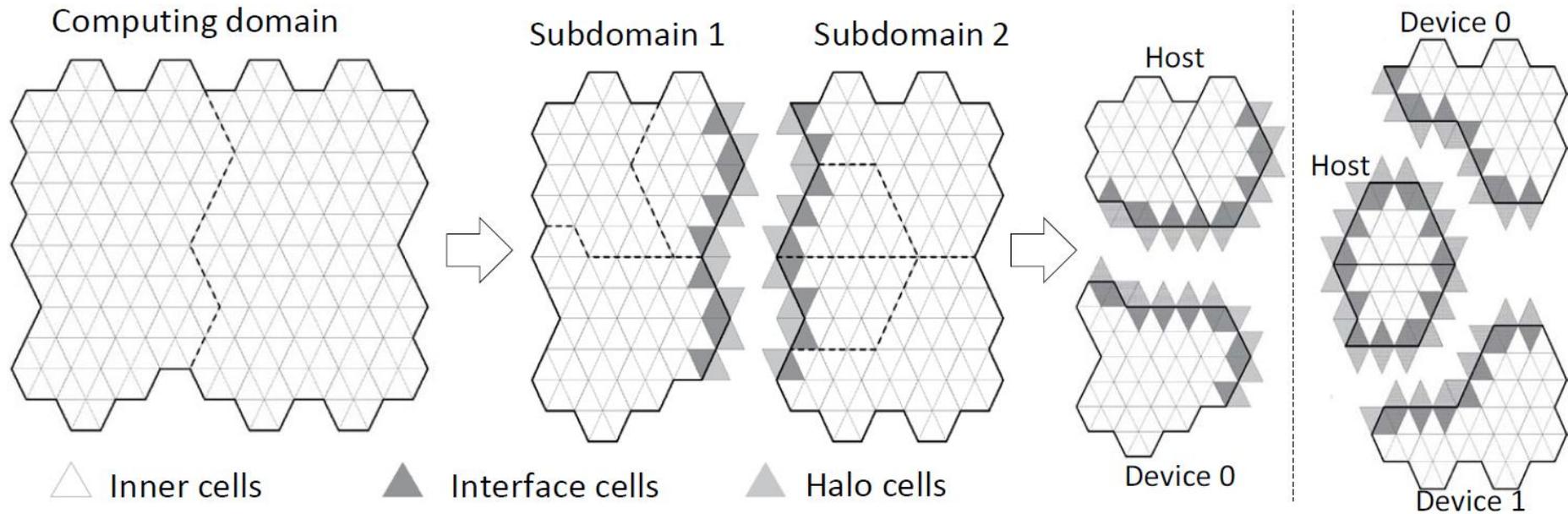
SIMD

Векторизация

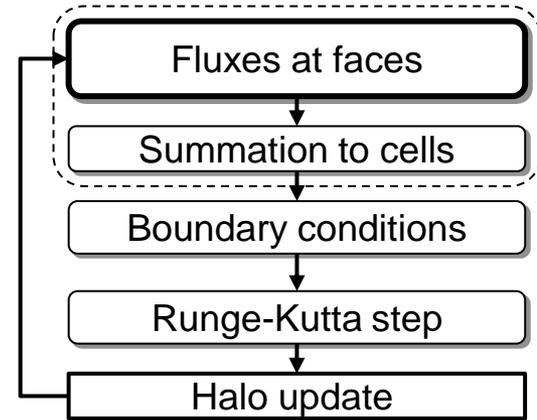
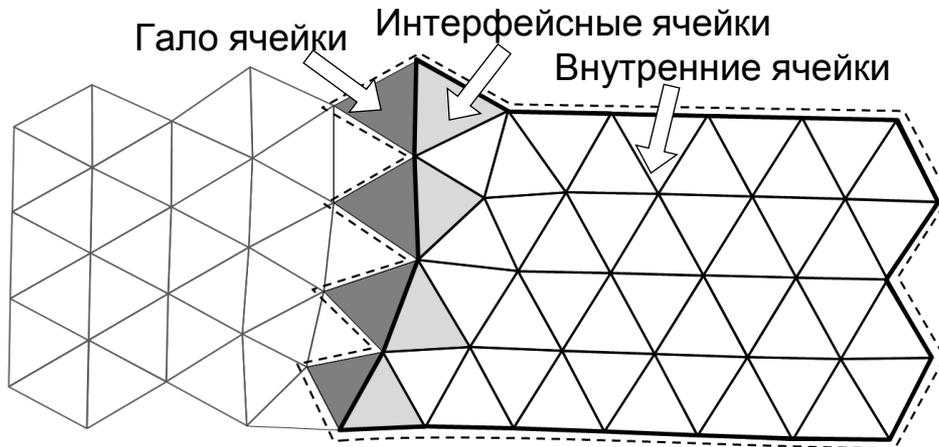


Потоковая обработка

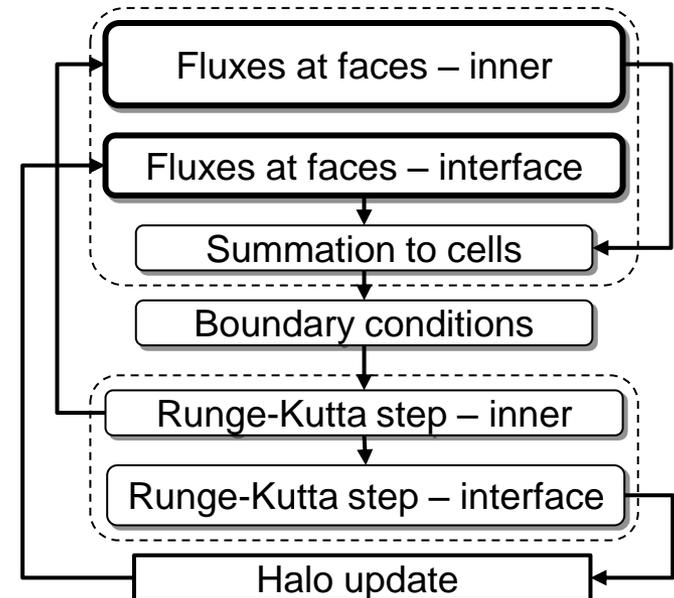
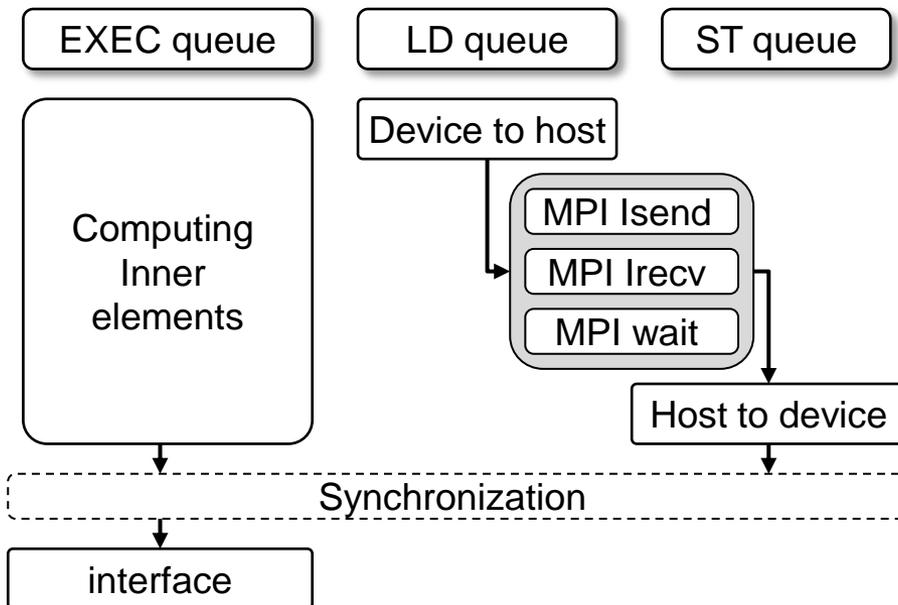




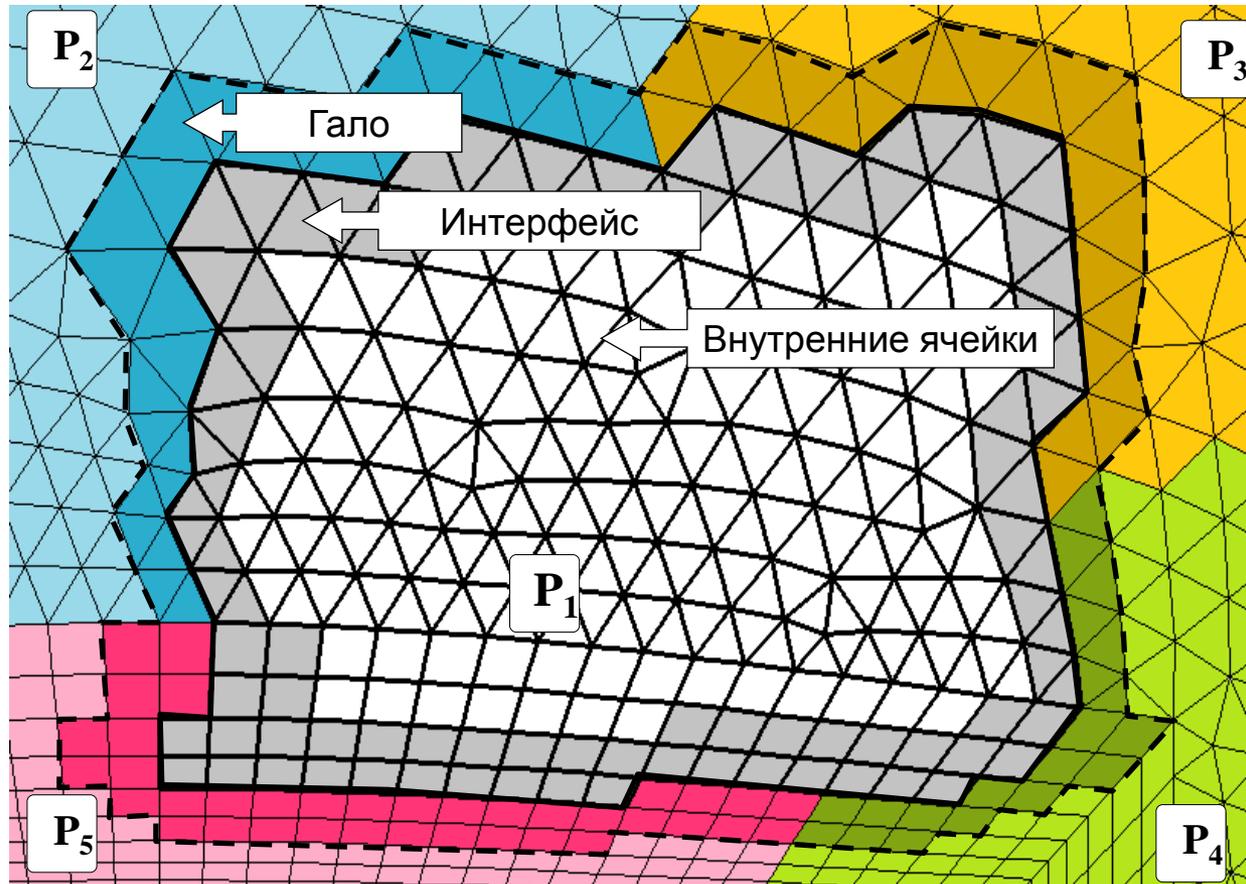
Overlap: сокрытие обменов за вычислениями

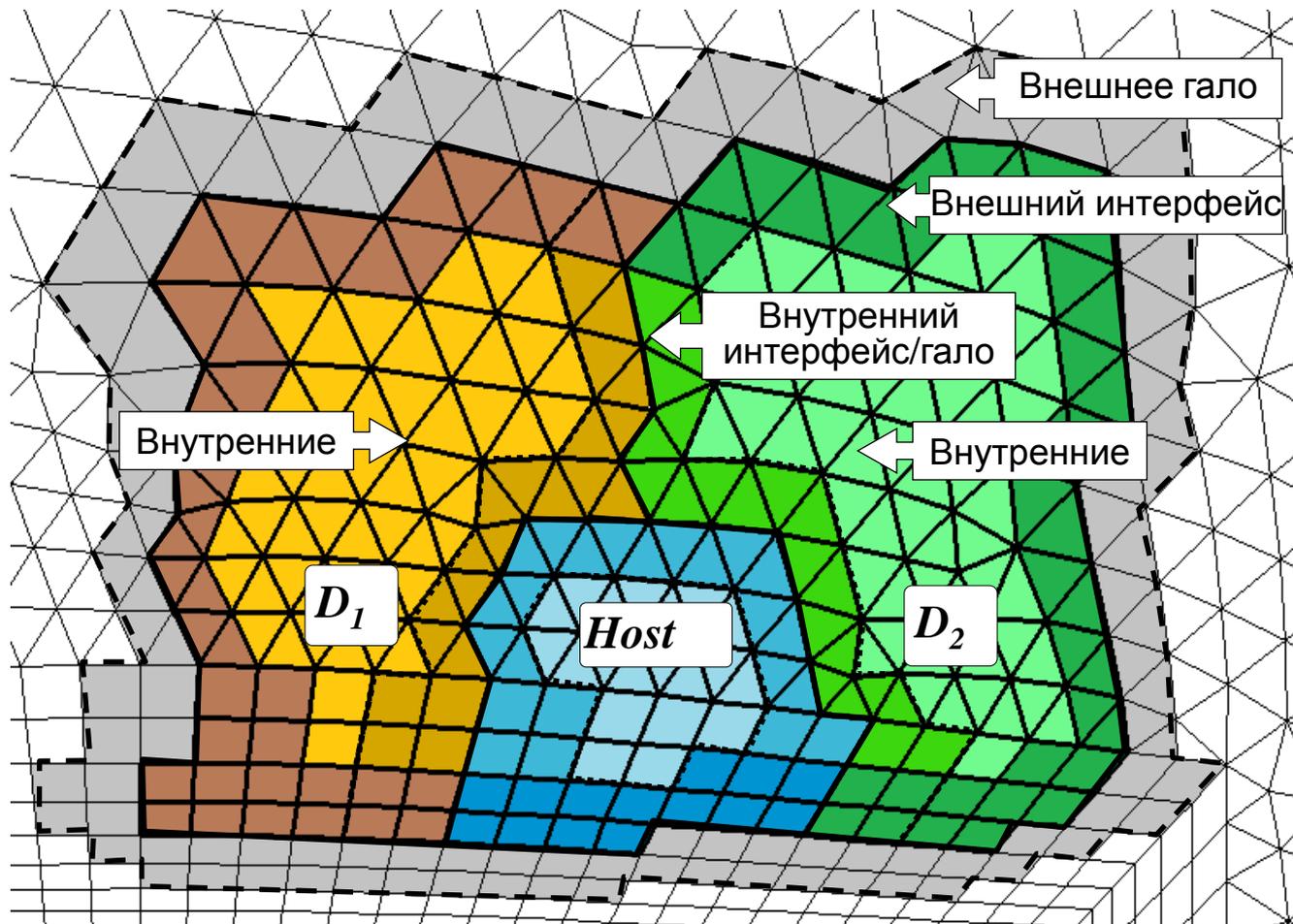


Вычисления и обмен данными



Многоуровневая декомпозиция

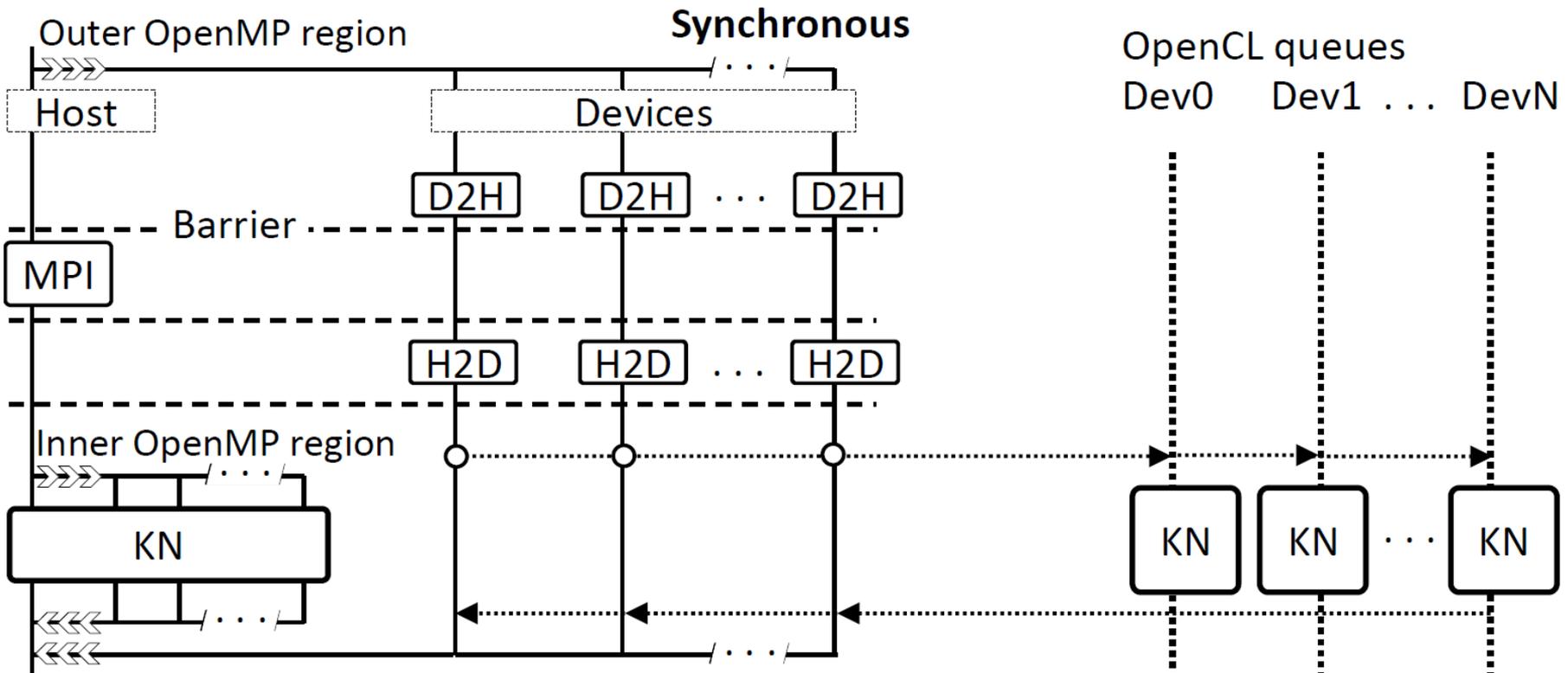




$$t_{sync} = t_{HD} + t_{MPI} + \max(N^{d_k})C_D$$

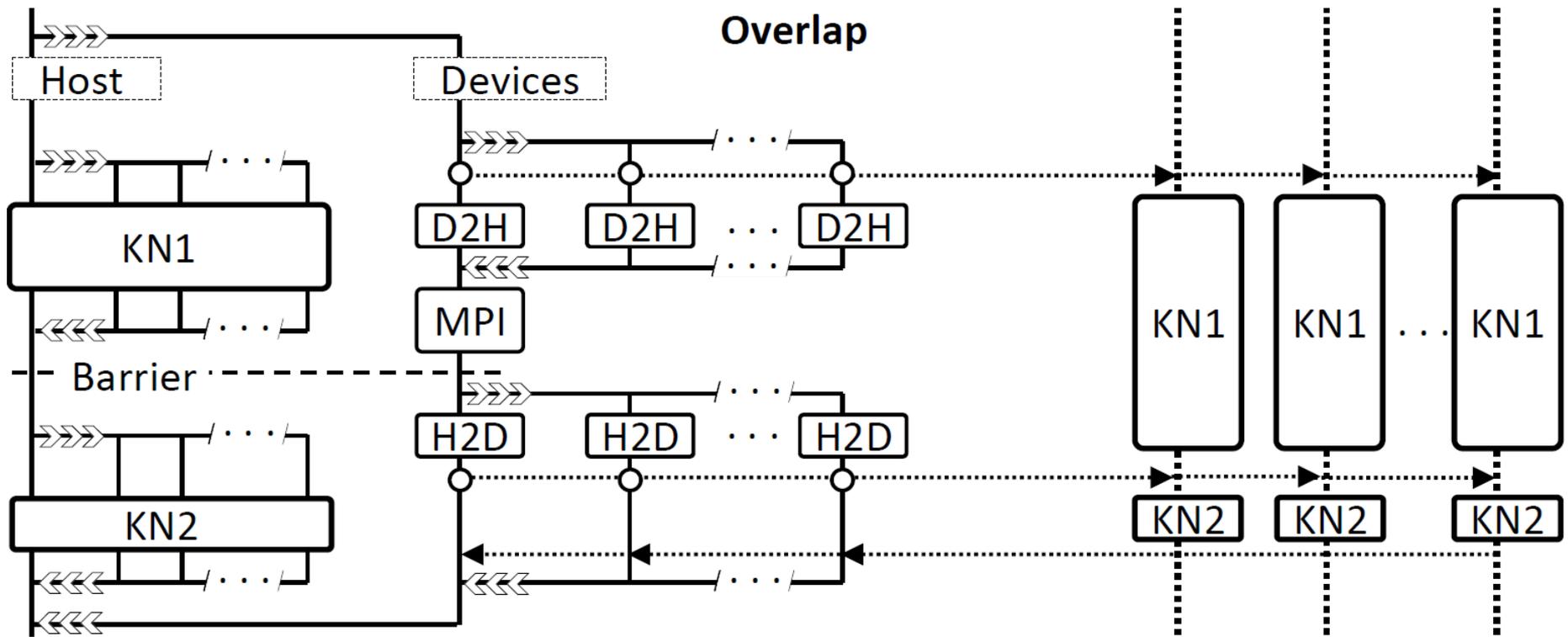
$$t_{HD} = T_{HD}(\max(N_I^{d_k}) + \max(N_H^{d_k}))$$

$$t_{MPI} = T_{MPI}(N_I + N_H)$$



Разделим вычисления на два этапа:

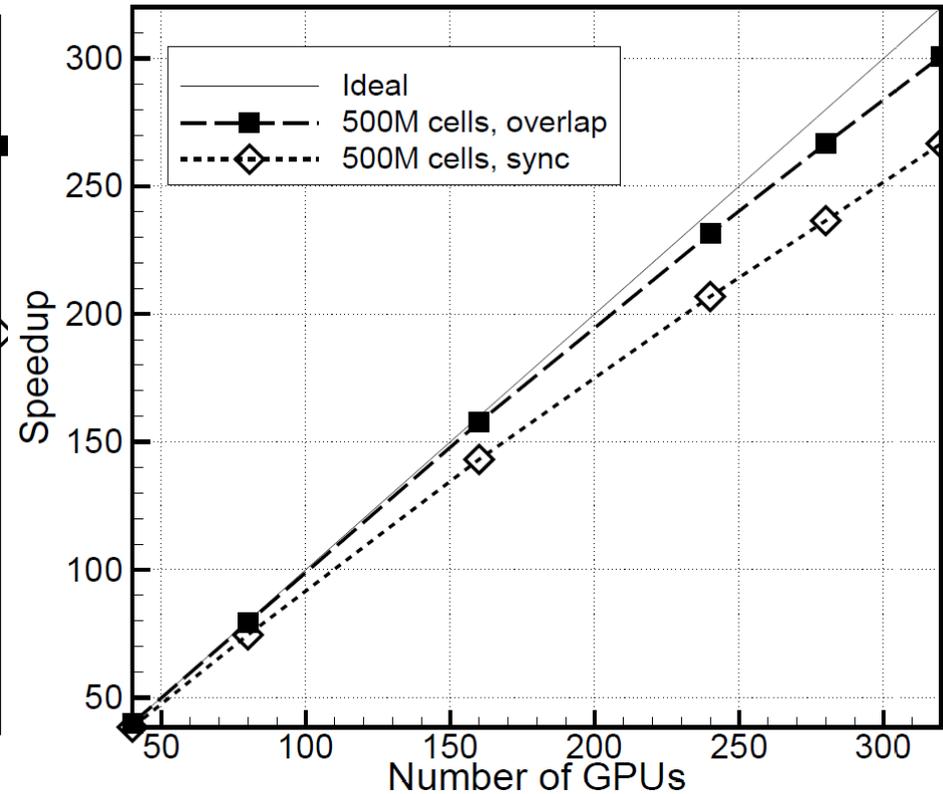
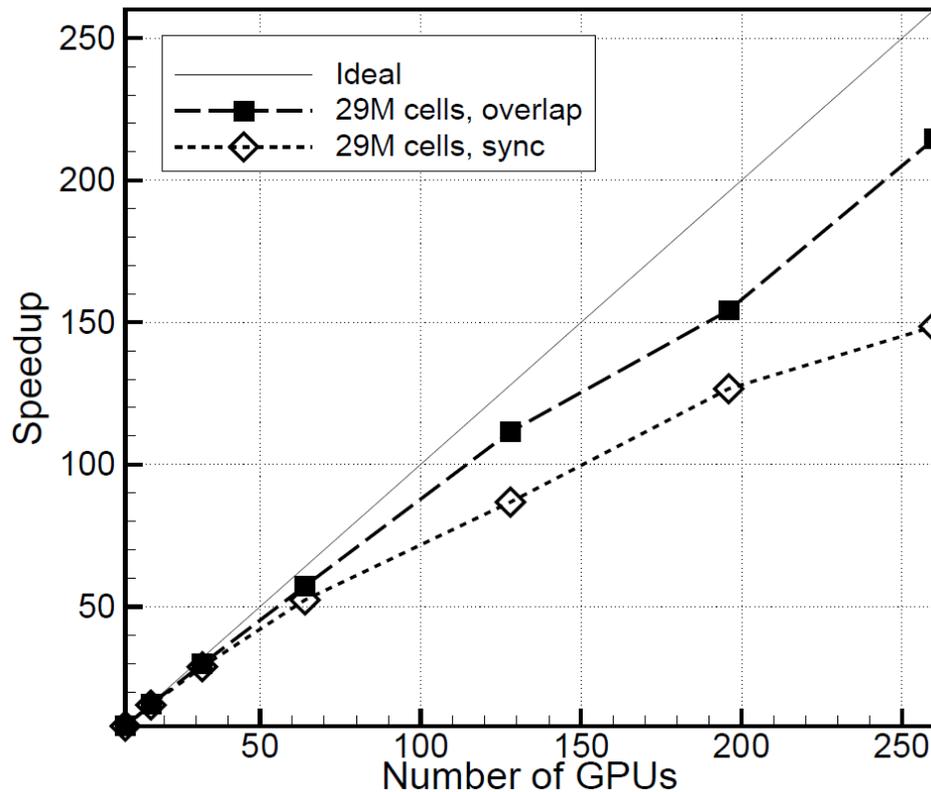
- внутренние ячейки (KN1)
- интерфейсные ячейки (KN2)



$$t_{over} = \max(t_{HD} + t_{MPI}, \max(N_L^{d_k})C_D) + \max(N_I^{d_k})C_D$$

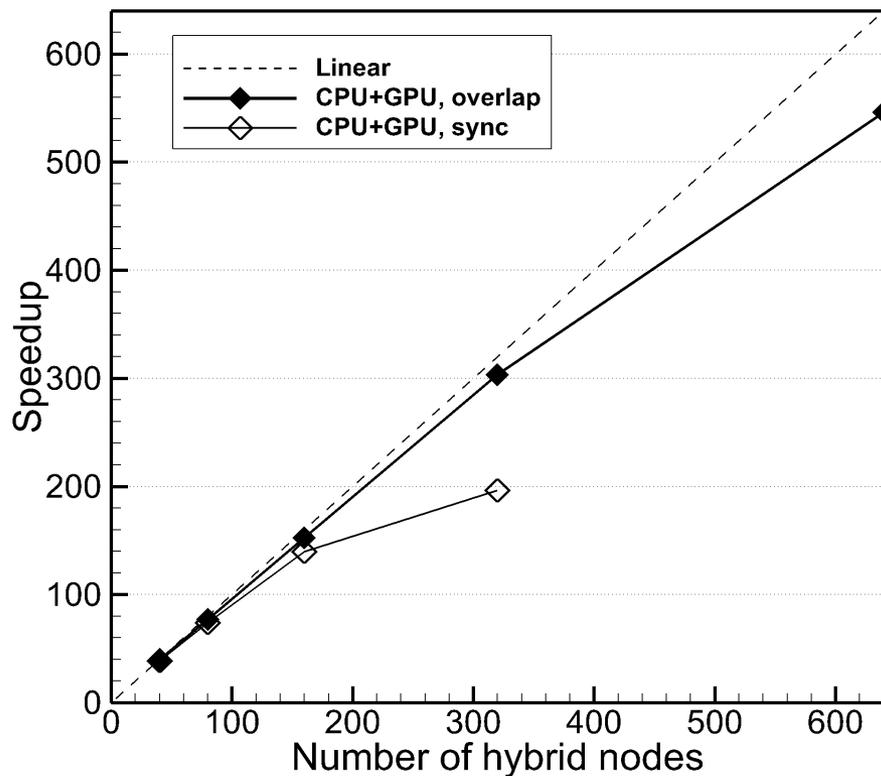
Ломоносов-2 (МГУ):
14C Xeon E5-2697v3
NVIDIA K40, IB FDR

HPC5 (Курчатовский институт):
2x 8C Xeon E5-2650v2,
2x NVIDIA K80, IB FDR

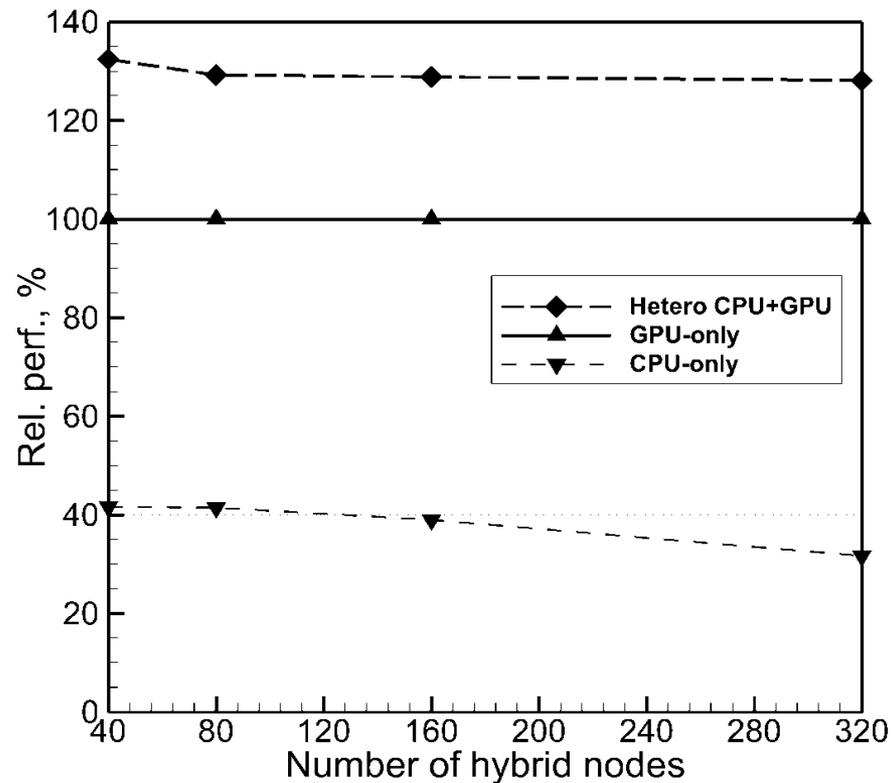


MPI+OpenMP+OpenCL

Ломоносов-2: 14с Xeon E5 v3 + K40M



Сетка 500М ячеек



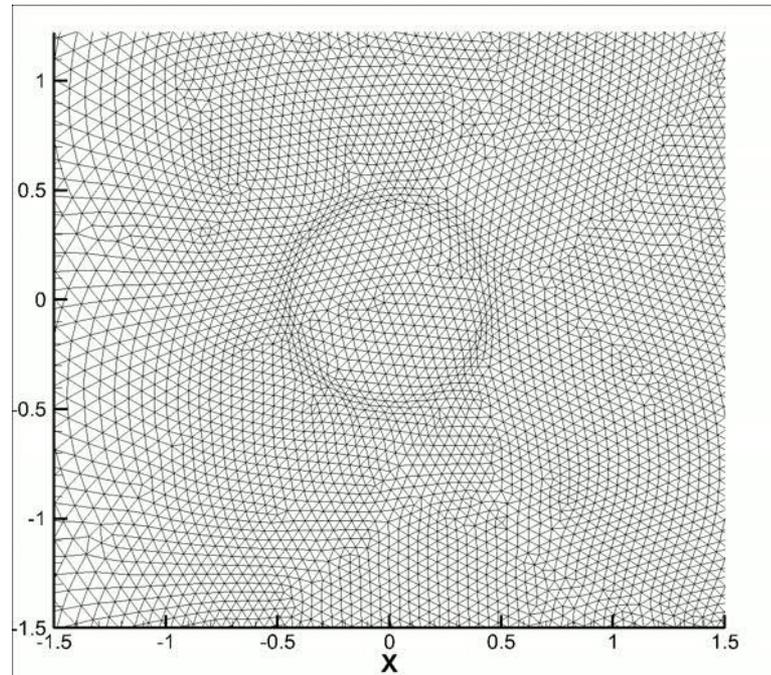
A.Gorobets, S.Soukov, P.Bogdanov. Multilevel parallelization for simulating turbulent flows on most kinds of hybrid supercomputers. Computers&Fluids. (2018) 173:171. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.03.011>

- MPI на первом уровне
- OpenMP реализация для многоядерных процессоров и ускорителей
- OpenCL реализация для потоковых ускорителей
- Двухуровневая декомпозиция с балансировкой загрузки по фактической производительности
- Overlap режим – сокрытие обменов за вычислениями

- **Оптимизация параметров методов и моделей**
- **Адаптивные сетки**
- **Экономия на неявной схеме интегрирования по времени**
приближенный якобиан по схеме 1 порядка
- **Ускорение выхода на статистически стационарный режим (ССР)**
- **Уменьшение исследуемой области**
периодические граничные условия
моделирование фрагментов сложных объектов
генератор синтетической турбулентности

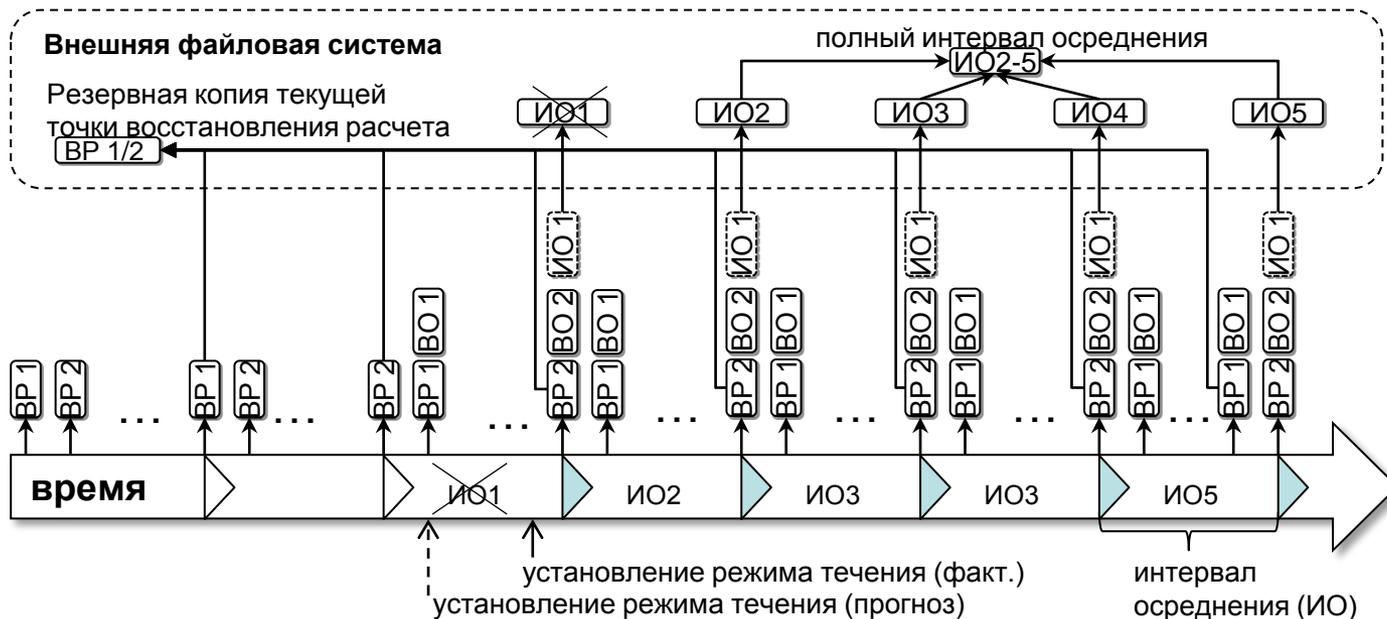
- **Выбор шага по времени**
маленький шаг – дорого, большой шаг – неточно, неустойчиво.
- **Настройки гибридной схемы CD+UW**
локальный подбор весов между центрально-разностной и противопоточной частями
- **Настройки неявной схемы**
выбор невязки ньютоновского процесса
точность решателя СЛАУ, выбор и настройка предобуславливателя
- **Динамическая конфигурация метода**
автовыбор шага, невязки солвера, веса центральной разности
автоконтроль корректности, диагностика, откаты с коррекцией без авоста
- **Смешанная точность – поля на FP64, геометрия, солвер СЛАУ на FP32**

- **Технология построения сетки**
оптимальное распределение
пространственного разрешения
- **Динамическая адаптация без изменения топологии**
улучшение пространственного распределения
сокращение времени на установлении ССР



Ускорение установления ССР

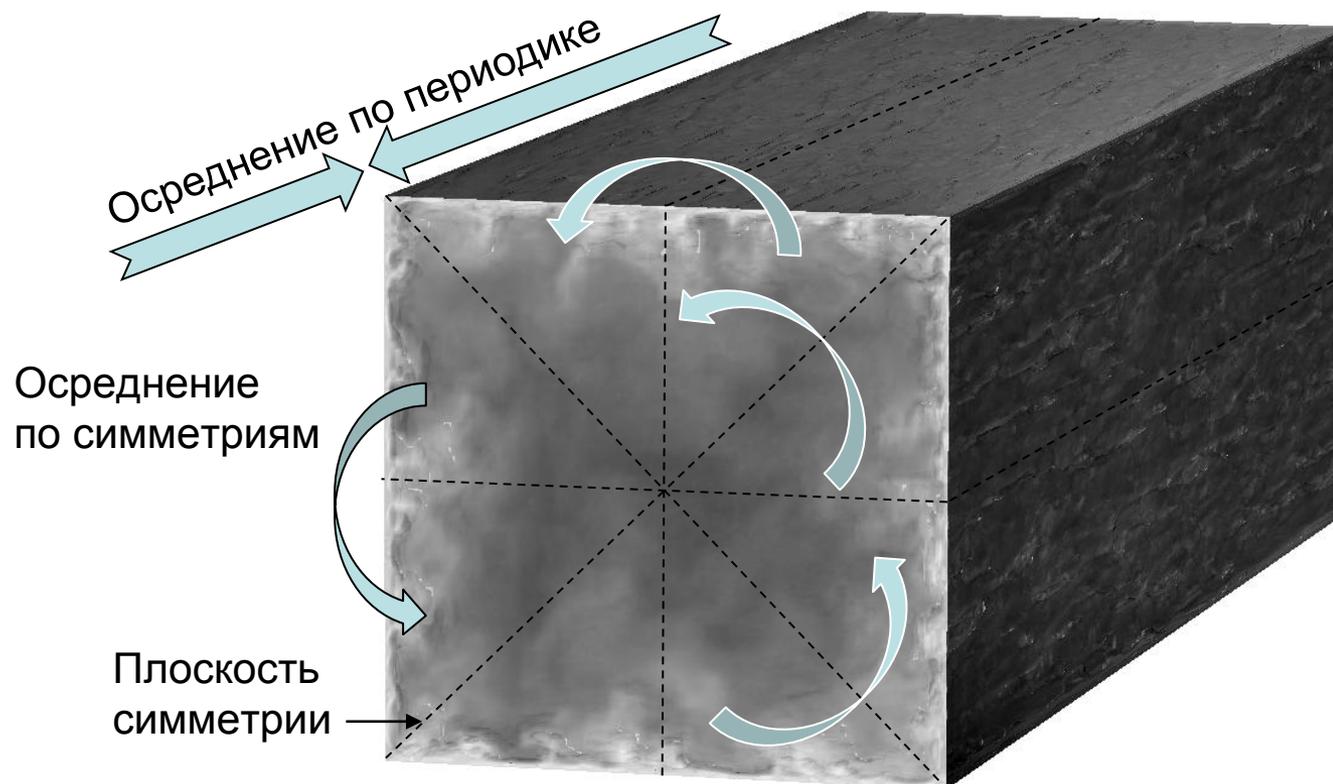
- **Использование последовательности равномерно сгущающихся сеток**
1 шаг сгущения – в 8 раз больше узлов.
протяжка RANS, расчет DES, интерполяция решения на подробную сетку
- **Подвижные границы и динамическая адаптация**
для моделирования нескольких вариантов за один расчет
- **Определение момента выхода на ССР**



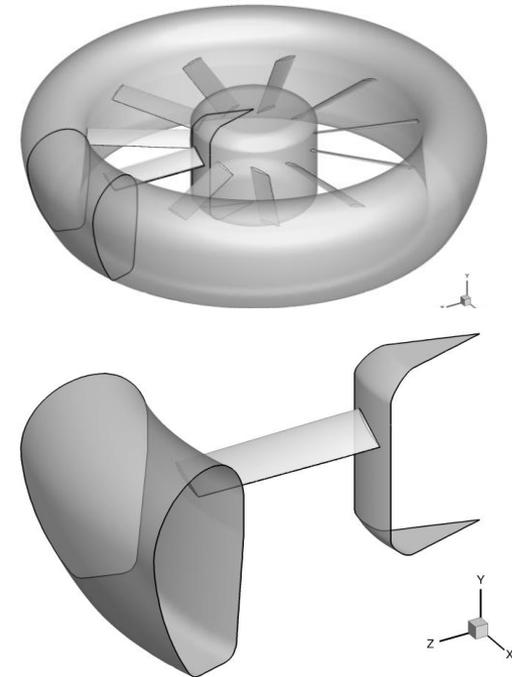
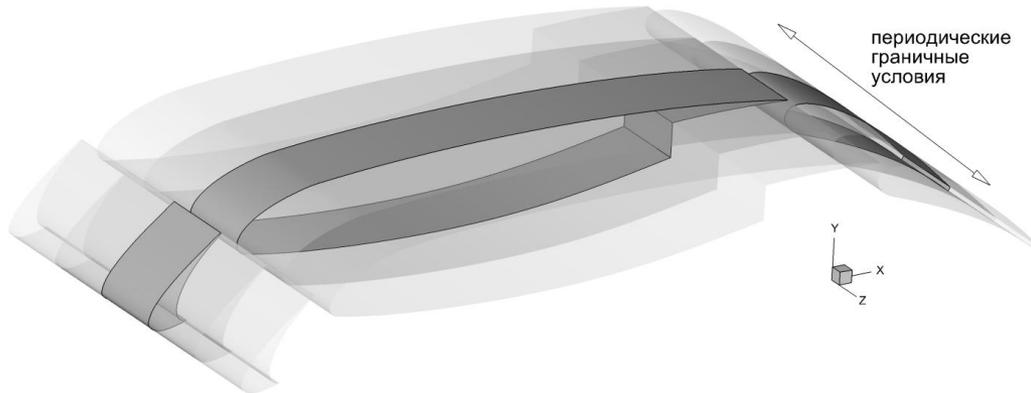
Обозначения записей:

BP - восстановление расчета, BO - восстановление осреднения, ИО - интервал осреднения

- Все пространственные симметрии должны использоваться для повышения качества статистики течения



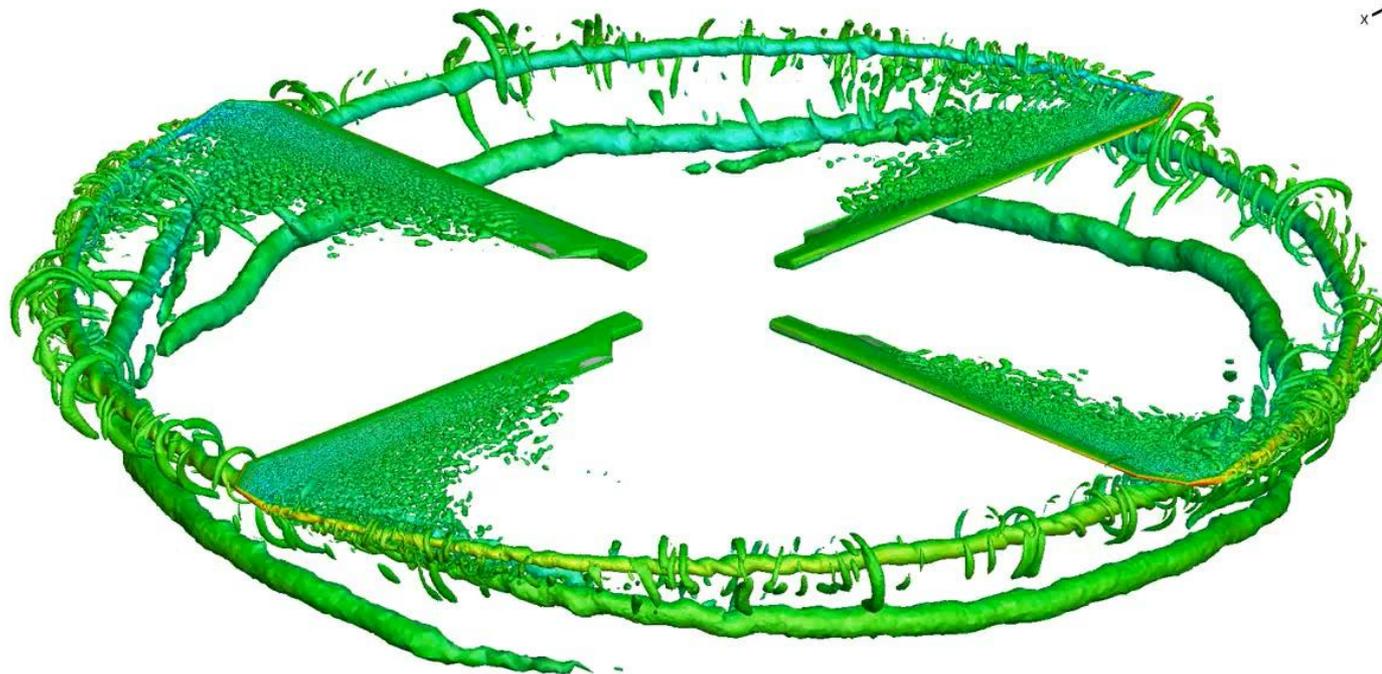
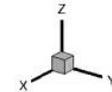
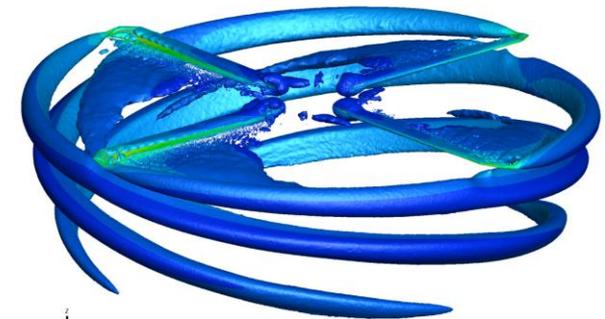
- **Периодические граничные условия**



- **Моделирование фрагментов сложного объекта**
использование синтетики для воспроизведения турбулентного контента

- **Выделение зоны высокого разрешения в составе сложного объекта**
весь объект – RANS разрешение
выбранная подобласть интереса – DES разрешение

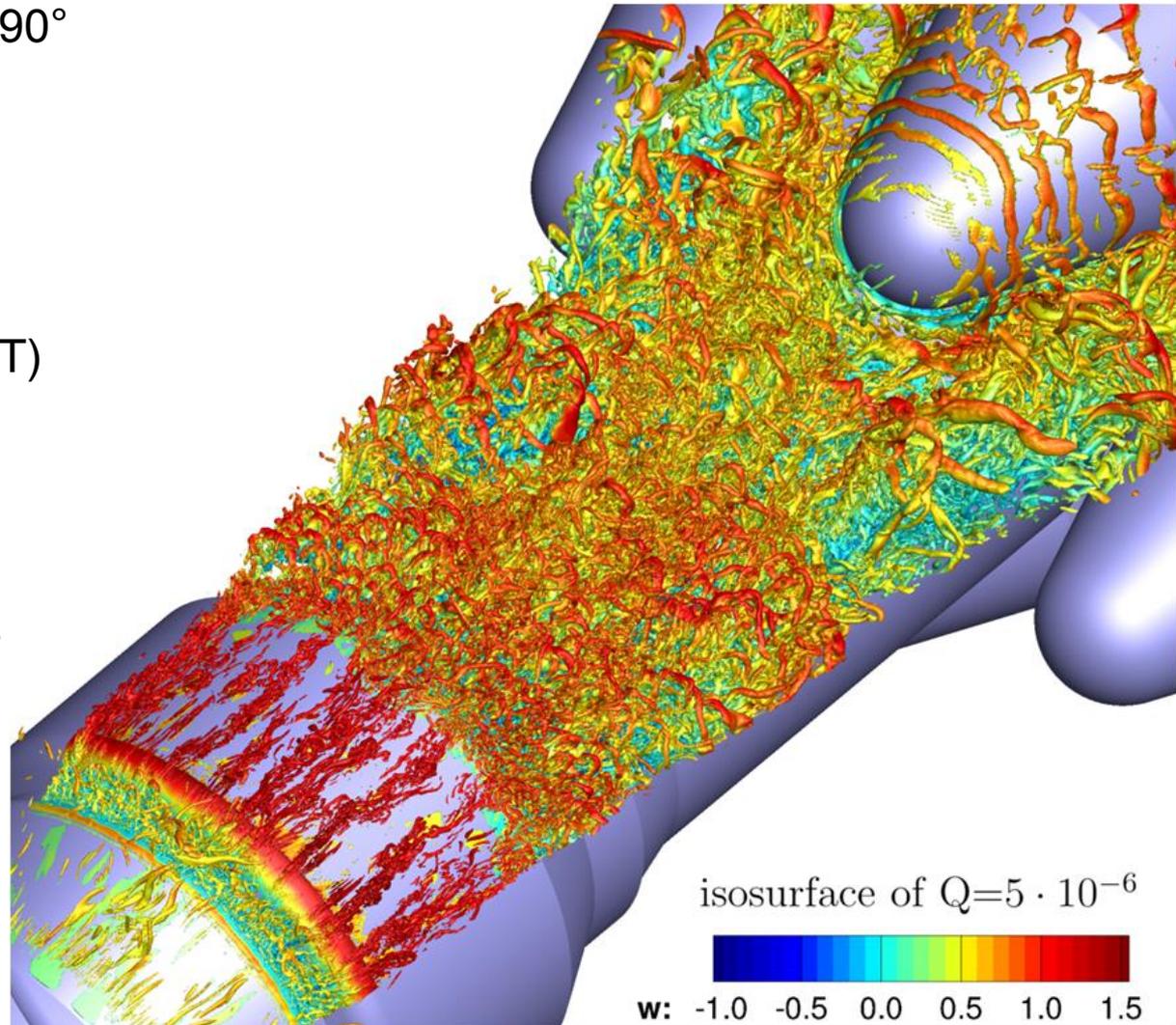
- “Протяжка” разгонного вихря в RANS режиме
- Периодика по углу на режиме висения
- Пристеночные функции в погранслое



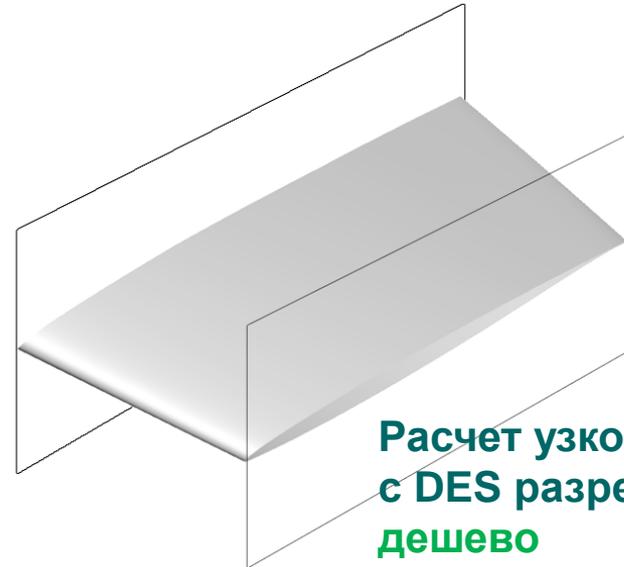
Параметры расчета

- вычислительный домен: 90°
- с учетом боковых блоков
- сетка: 63.4 млн.
- расчет: 1920 ядер CPU
(80 MPI x 12 OpenMP x HT)

- Периодика по углу
- ИВС для боковых блоков
- Синтетика на входе



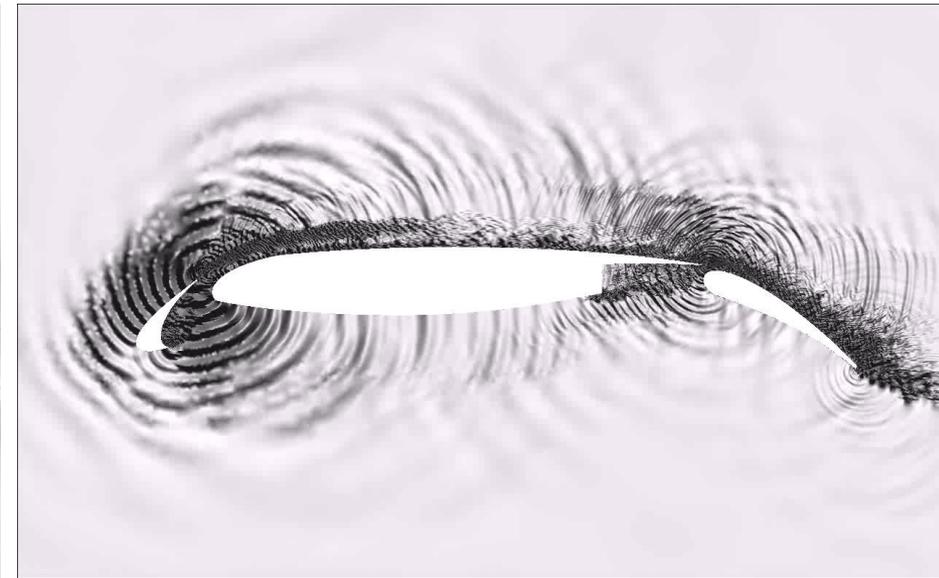
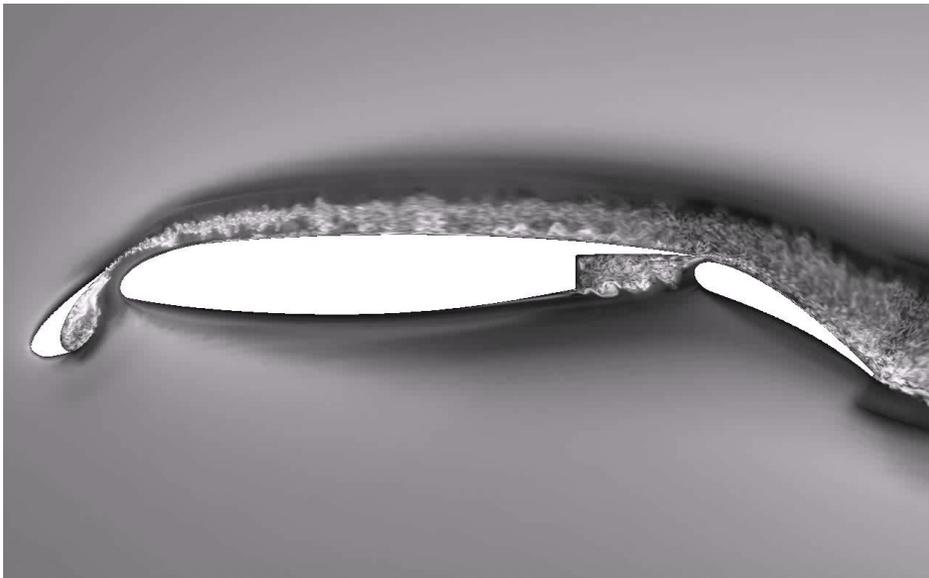
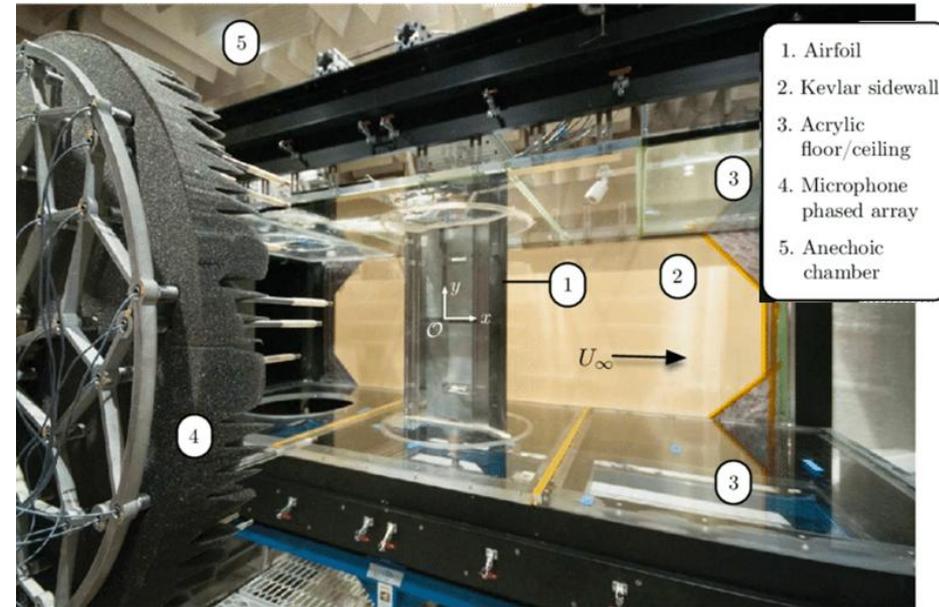
САА расчет стреловидного крыла авиалайнера



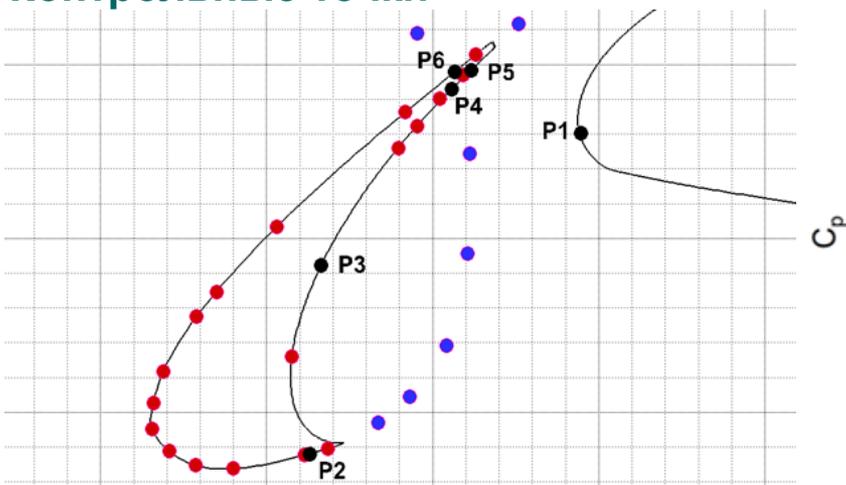
Все крыло с RANS разрешением,
узкая секция с DES разрешением
не так уж и дорого
не так уж и неточно

- Периодика по размаху
- FW/H для шума в дальнем поле

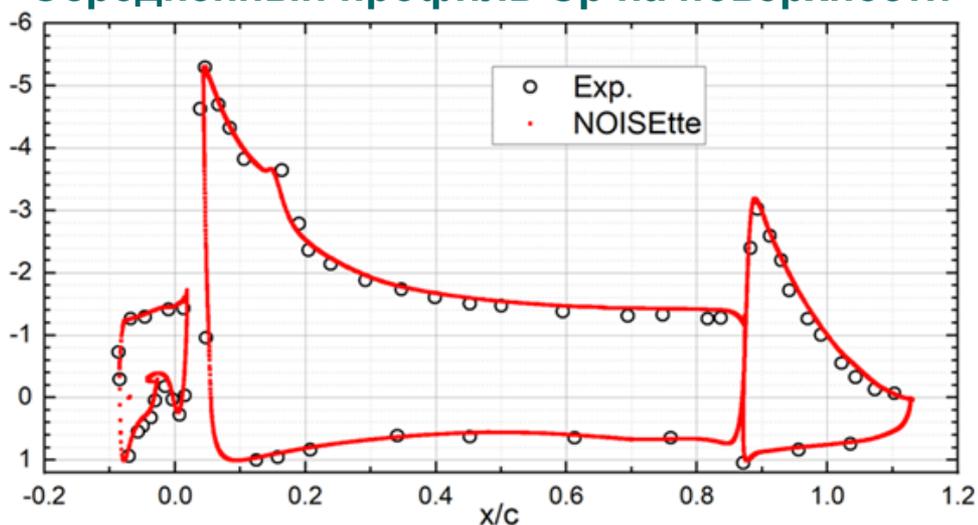
Pascioni, Kyle & Cattafesta, Louis. (2016).
Aeroacoustic Measurements of
Leading-Edge Slat Noise.
22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference.
DOI: 10.2514/6.2016-2960



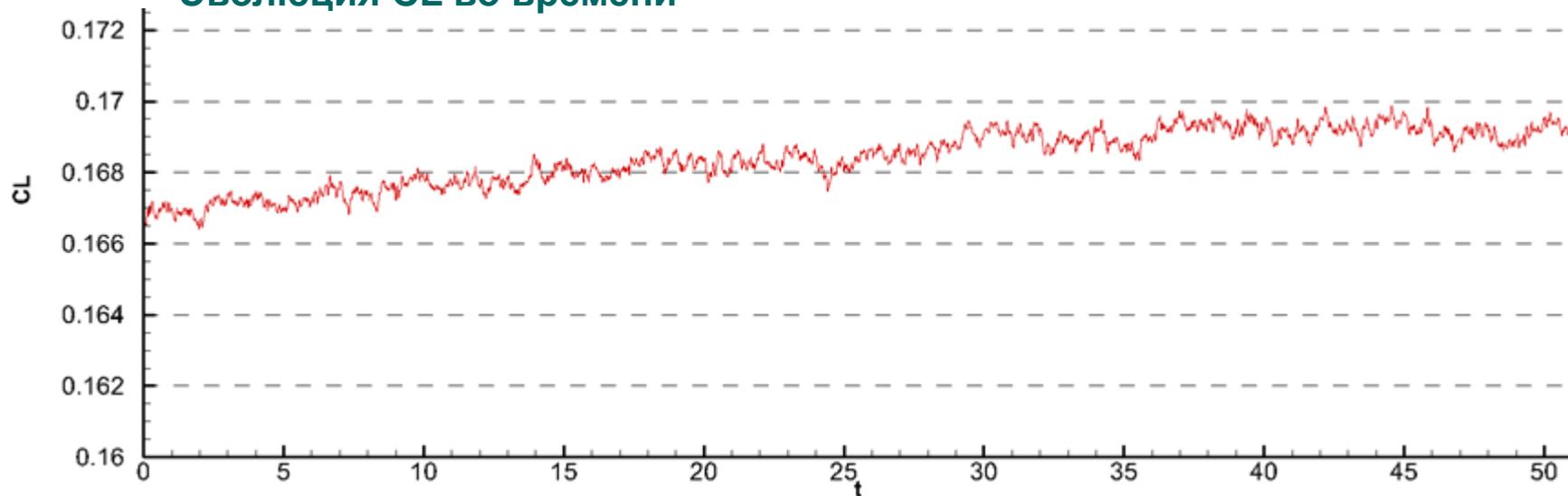
Контрольные точки



Осредненный профиль C_p на поверхности

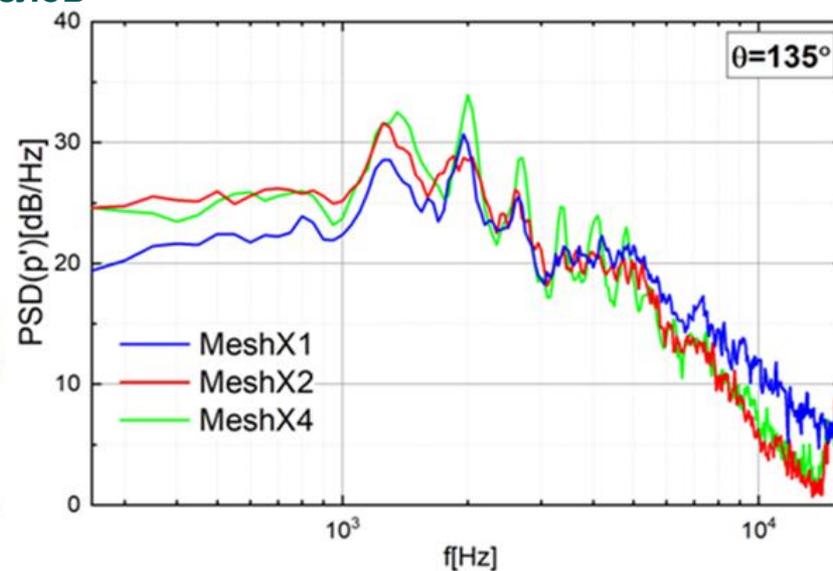
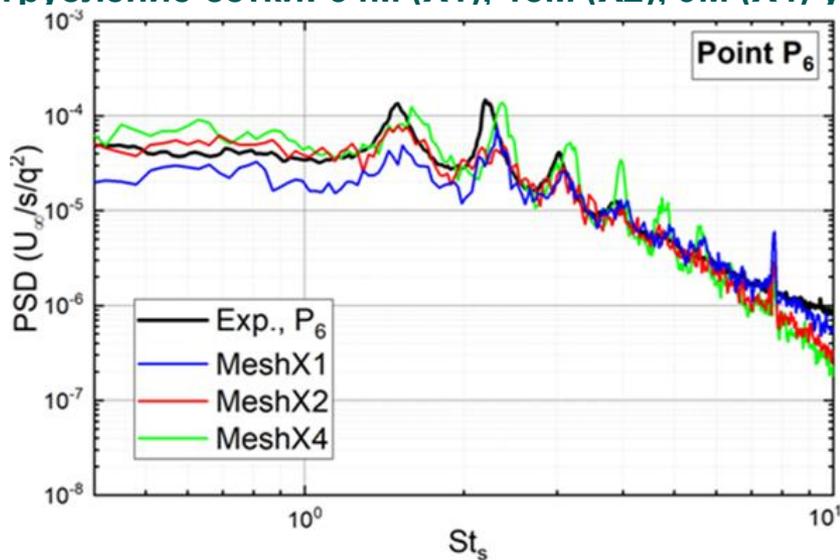


Эволюция C_L во времени

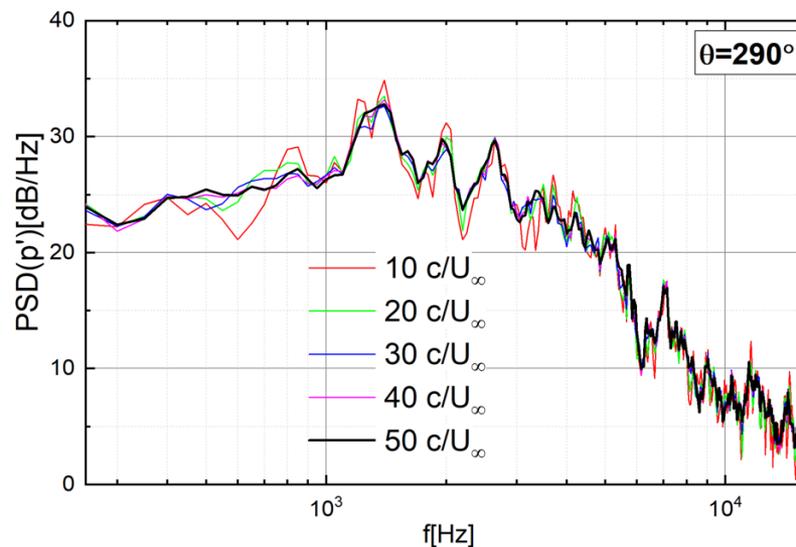
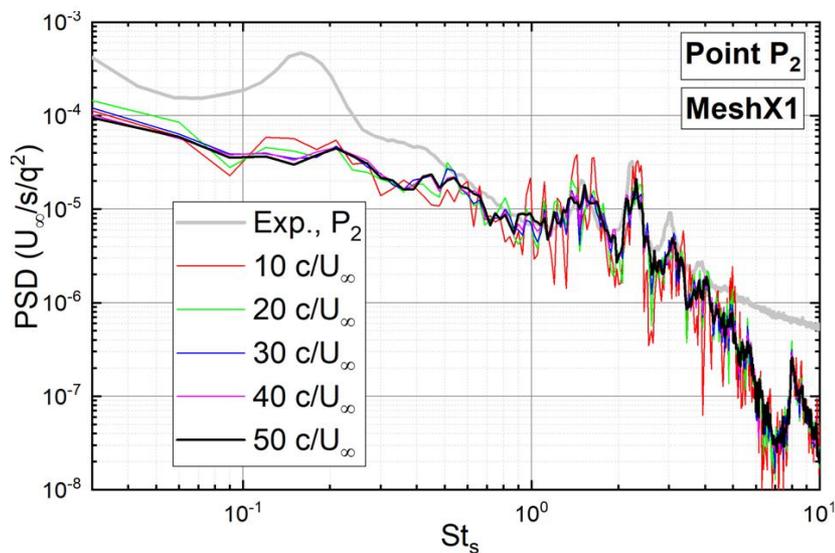


Сравнение результатов

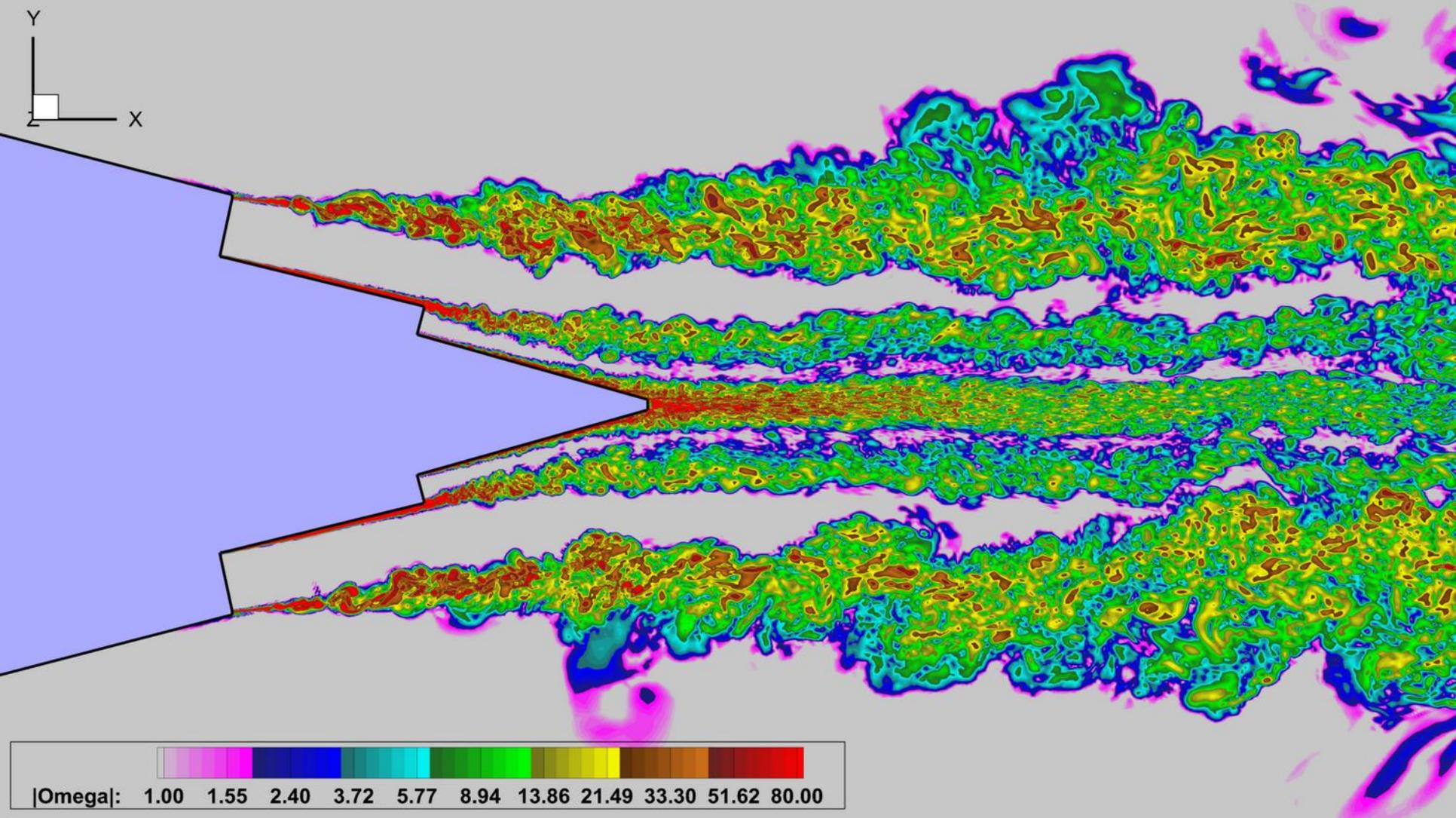
Огрубление сетки: 34М (X1), 18М (X2), 9М (X4) узлов



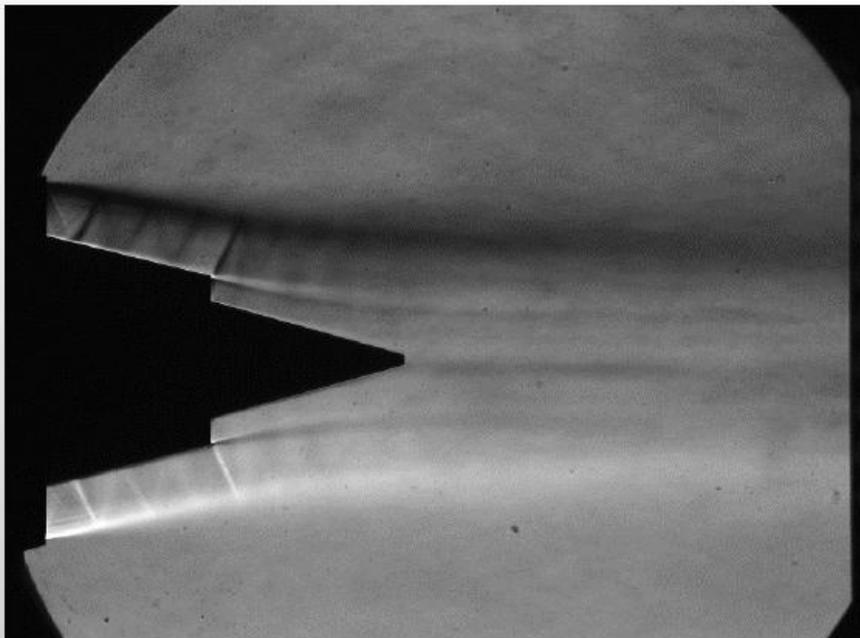
Уменьшение интервала осреднения



Струя из двухконтурного сопла ТРДД

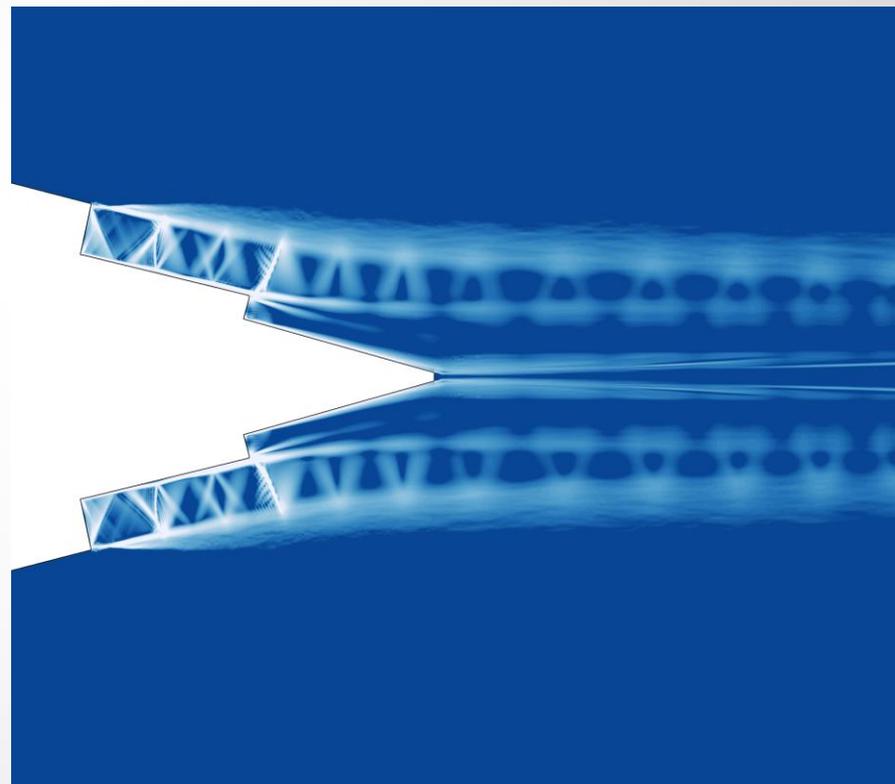


Main flow regime - $N_{pr1} = 1.72$, $N_{pr2} = 2.25$



Exposure equal 0.01 sec

Визуализация ИТПМ



Расчет (код NOISEtte, ИПМ РАН)

Прогресс в развитии

- 1) численных методов и моделей;
- 2) вычислительной техники и HPC технологий;
- 3) повышение технологичности использования численных методов и моделей, вычислительных систем и программных комплексов

**когда-нибудь приведет к светлому будущему
вихреразрешающего моделирования в промышленной практике**

Работы по приближению этого светлого будущего, особенно в части эффективного использования современных гибридных суперкомпьютеров, были поддержаны **Российским научным фондом**
Проект 19-11-00299

“Сверхмасштабируемые параллельные алгоритмы и гетерогенные вычисления для вихреразрешающего моделирования задач гидродинамики, аэродинамики и аэроакустики”

A.Gorobets, S.Soukov, P.Bogdanov. Multilevel parallelization for simulating turbulent flows on most kinds of hybrid supercomputers. *Computers and Fluids*. Volume 173, Pages 171-177. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.03.011>

A.Gorobets. Parallel Algorithm of the NOISEtte Code for CFD and CAA Simulations. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2018, Vol. 39, No. 4, pp. 524–532. <https://doi.org/10.1134/S1995080218040078>

S. A. Soukov, A. V. Gorobets. Heterogeneous Computing in Resource-Intensive CFD Simulations. *Doklady Mathematics*, 2018, Vol. 98, No. 2, pp. 1–3. DOI: 10.1134/S1064562418060194

Gorobets A.V. Parallel technologies for solving CFD problems using high-accuracy algorithms, *Comput. math and math physics*, 2015, Volume 55, Issue 4, pp 638–649. <https://doi.org/10.1134/S0965542515040065>

Горобец А. В. Методика выполнения крупномасштабных расчетов задач газовой динамики, *Математическое моделирование*, 2016, том 28, номер 4, стр. 77-91.

P.A. Bakhvalov, I.V. Abalakin, T.K. Kozubskaya, Edge-based reconstruction schemes for unstructured tetrahedral meshes, *Int. J. Numer. Methods Fluids*. 81(6) (2016) 331–356. <http://doi.org/10.1002/flid.4187>

P.A. Bakhvalov, T.K. Kozubskaya, Reprint of: EBR-WENO scheme for solving gas dynamics problems with discontinuities on unstructured meshes, *Comput. Fluids* 169 (2018) 98-110. <http://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.03.050>

F.X.Trias, A.Gorobets, M.H.Silvis, R.W.C.P.Verstappen, and A.Oliva. A new subgrid characteristic length for turbulence simulations on anisotropic grids. *Physics of Fluids*, 29, 115109 (2017)