

Памяти П.А. Баранова –

автора пакета VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D)



**Новая версия пакета VP2/3 с
использованием гибридных сеток из
разномасштабных структурированных
блоков с неструктурированными вставками**

Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г.

(все – СПбГУГА-КНИТУ-КАИ), Усачов А.Е. (МК ЦАГИ),

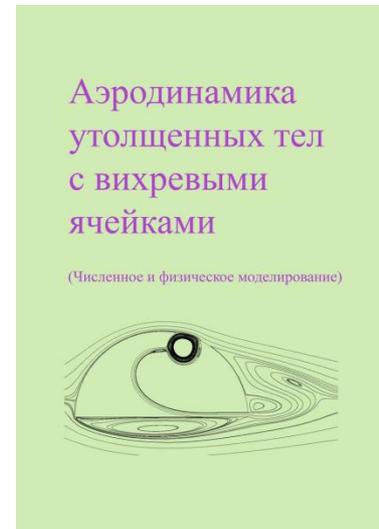
Калинин Е.И., Мазо А.Б. (оба КФУ)

Темы

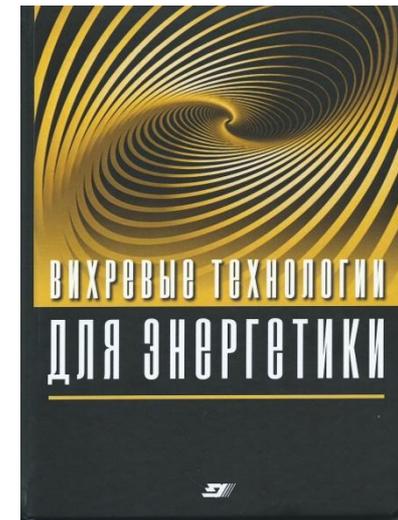
- Продвижение в развитии и применении VP2/3 в 2017 году
- Соединение URANS, коррекции SST-модели с учетом кривизны линий тока, модифицированных многоблочных вычислительных технологий с использованием гибридных сеток в новой версии VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D)
- Тесты: наклоненная овальная траншея и пакет траншей на стенке узкого канала

Прогресс VR2/3 в 2017 году

- Развитие МВТ в направлении использования гибридных сеток
- Глубокая переработка комплекса – полностью C++ - версия



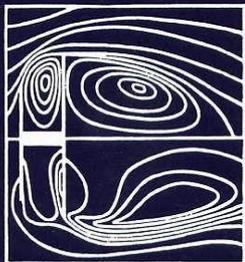
2016



2017

И.А. БЕЛОВ
С.А. ИСАЕВ
В.А. КОРОБКОВ

ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ



1989

RANS&URANS. Пакетные технологии (с 1974)

УПРАВЛЕНИЕ ОБТЕКАНИЕМ ТЕЛ 2001-2003 С ВИХРЕВЫМИ ЯЧЕЙКАМИ

В ПРИЛОЖЕНИИ К ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ ИНТЕГРАЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ (ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Математические модели. МВТ(VP2/3)

- допущения: 1) $\bar{\rho} = \frac{1 + \bar{p} \kappa M_0^2}{T}$; 2) подход Рейнольдса

2

$$\nabla \cdot \rho V = 0;$$

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{V} V - \tau) = -\nabla p + \tilde{S}_V;$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{h}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\tilde{\mu}}{Pr} \right) \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \right] + \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \tilde{\tau}_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) (\kappa - 1) M_0^2.$$

SA	Спаларт-Аллмарес (1992)
RNG -k-ε	(1986)
Realizable-k-ε	(1993)
k-ω - MSST	Ментер (1993, 2003)
V2F	Дурбин (1995)

- учет кривизны линий тока: $\mu_t = \mu_{to} / (1 + C_c Ri_t)$

μ_{to} – без учета кривизны; $C_c = 0.02 - 0.1$

- сочетание метода пристеночных функций и низкорейнольдсовых моделей [по Ментеру (2003)]

Масштабы

скорость U	длина d
скорость внешнего потока	диаметр цилиндра, лунки ширина траншеи, каверны
среднемассовая скорость	длина хорды

Диапазоны изменения режимных параметров:

Re	$10^2 \div 10^7$
Pr	$0.7 \div 4000$
M ₀	$0 \div 9$

$Pr_t = 0.9$; $T_w = \text{const} (373K)$; $T_{inlet} = 293K$;

$Tu = 1.5\%$

Министерство образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет "Военмех"

И.А. БЕЛОВ, С.А. ИСАЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Учебное пособие

2001

Санкт-Петербург
2001

многоблочные вычислительные технологии



Сергей Исаев
Павел Баранов
Александр Усачов

Многоблочные вычислительные технологии в VP2/3 по аэротермодинамике

Разработка, верификация и применение

2013



4 CFD Уикенд в ИГиМ им. М.В. Келдыша,

декабрь 2017 года

Коррекция SST-модели 2003 года (подход Роди-Лешцинера-Исаева), апробированная на стационарных и нестационарных 2D/3D задачах

Прямая коррекция турбулентной вязкости

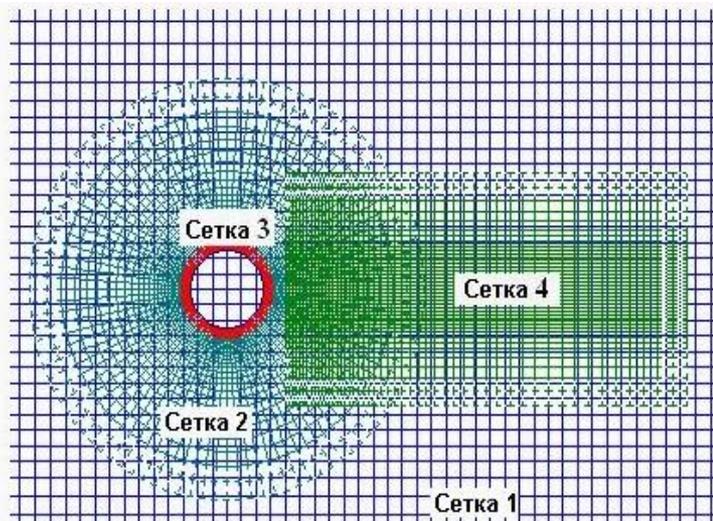
$$\tilde{\mu}_t = f_\mu \mu_t$$

$$f_\mu = \frac{1}{1 + c_r} \quad c_r = c_c Ri_t; \quad c_c = 0.02 \quad -0.4 < c_r < 3.5$$

$$Ri_t = \left(\frac{k}{\varepsilon}\right)^2 \left(\frac{U}{r^2} \frac{\partial(Ur)}{\partial n}\right) \quad \text{-----} \rightarrow \quad Ri_t = \left(\frac{1}{c_\mu \omega}\right)^2 \frac{\vec{\Omega} \cdot \vec{b}_{qk}}{|\vec{V}|^2}$$

Развиваемый подход на основе многоблочных вычислительных технологий (МВТ). С конца 90-х гг.

*Блоки пересекающихся
разномасштабных сеток вблизи
круглого цилиндра*

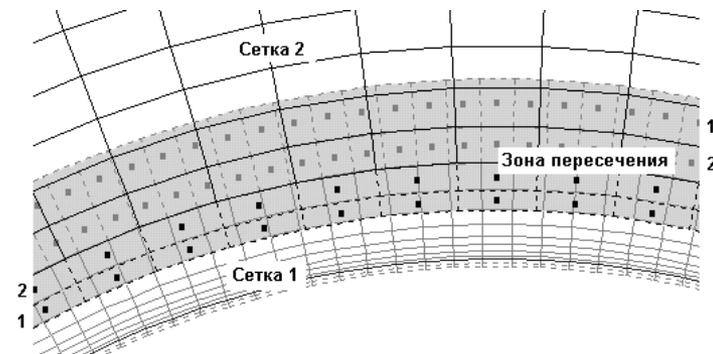


*Совокупность сеток относительно простой топологии,
линейные масштабы которых согласованны с
масштабами улавливаемых характерных структурных
элементов задачи*

Сетки, как правило, близки к ортогональным

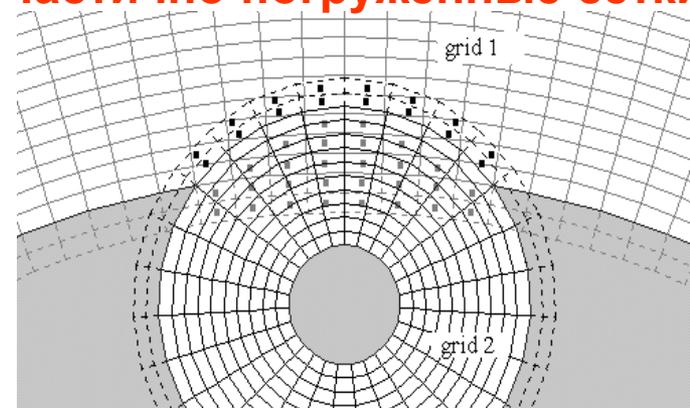


Многоярусные сетки



Многоблочные сетки вблизи твердой поверхности

Частично погруженные сетки



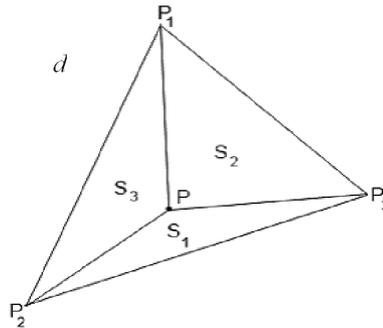
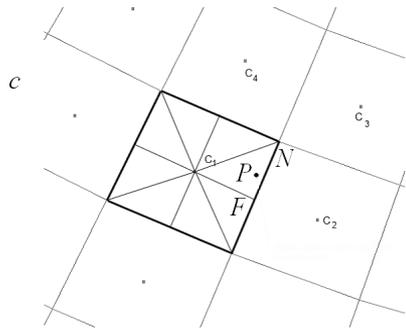
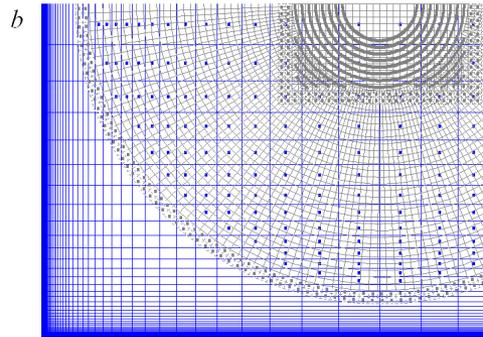
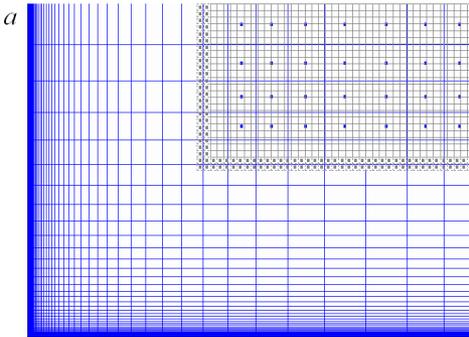
*Многоблочные сетки на твердой поверхности с
каверной*

Многоблочная вычислительная технология реализована в специализированном пакете VP2/3. Пакет VP2/3 представляет собой библиотеку задач, объединенных общим решателем.

Принципиальные особенности МВТ и пакета VP2/3

Обмен данными между сетками

Консервативная квадратичная интерполяция



$$\Phi(\xi, \eta) = c_0 + c_1\xi + c_2\eta + c_3\xi^2 + c_4\eta^2$$

ξ, η - обобщенные координаты

Для нахождения неизвестных коэффициентов используются значения переменной в углах ячейки, а также соотношение

$$\int_S \Phi ds = \Phi_C S$$

Φ_C - значение переменной в центре ячейки

S - площадь ячейки

Искомое значение переменной в точке P Сетки 2 можно представить в виде:

$$\Phi_P = \frac{1}{S_P} \sum_k \int_{D_k} \Phi ds$$

Кусочно-постоянное распределение переменных. В этом случае интегрирование сводится к значительно более простой задаче определения площадей пересечения ячеек:

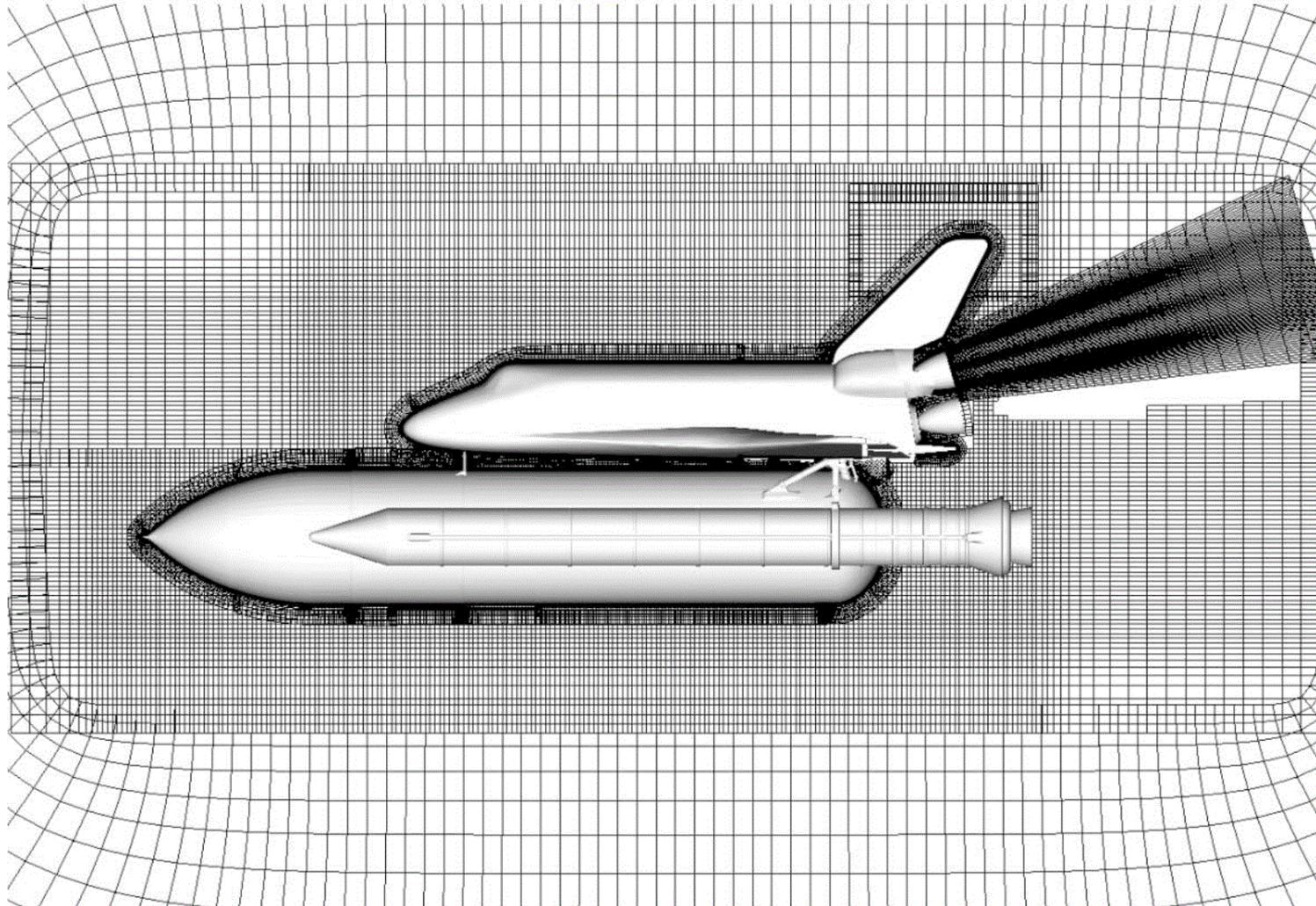
$$F_P = \sum_{i=1}^4 F_i h_i \quad h_i = \frac{\text{vol}(P, P_m, P_n, P_k)}{\text{vol}(P_1, P_2, P_3, P_4)}$$

$$\Phi(\xi, \eta) = \Phi_C$$

$$\Phi_P = \frac{1}{S_P} \sum_k \Phi_{C_k} S_k$$

Разработки NASA 90е годы – overset grids

Domain Decomposition of Volume



The Grid Guys 1993

AIAA-93-0533

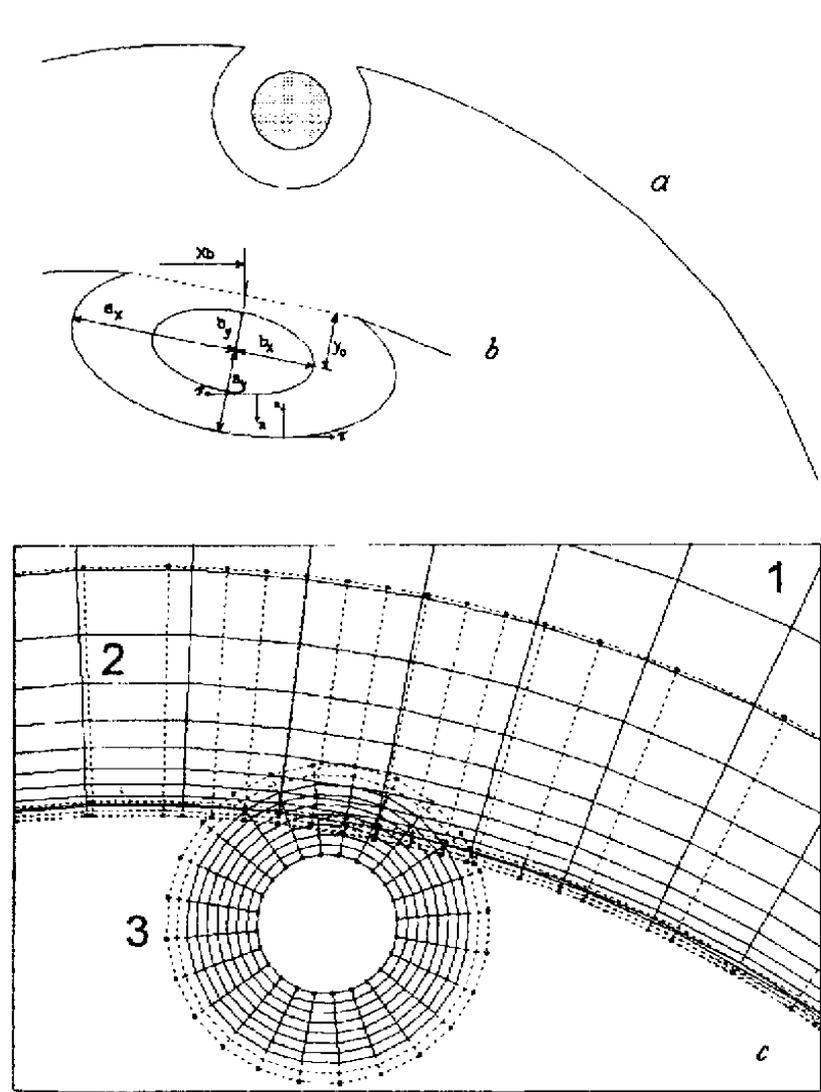
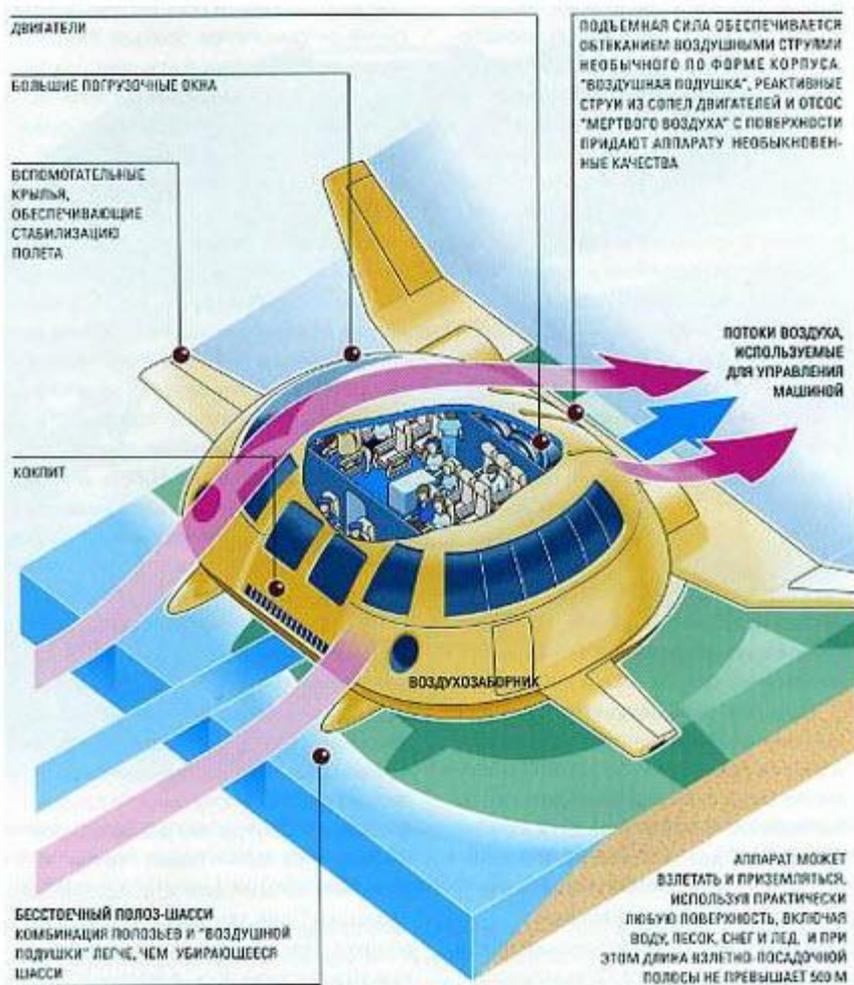


Рис. 1. Фрагмент контура цилиндра с вихревой ячейкой (a), эскиз ячейки с нанесенными обозначениями и фрагмент композитной сетки (b), состоящей (c) из двухъярусной (1, 2) сетки около цилиндра и сетки в вихревой ячейке (3).

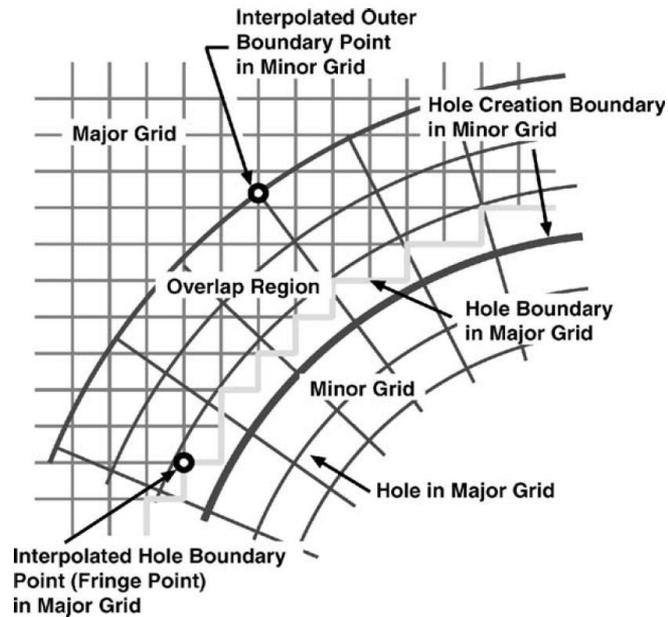


Fig. 2. Construct of the Chimera grid.

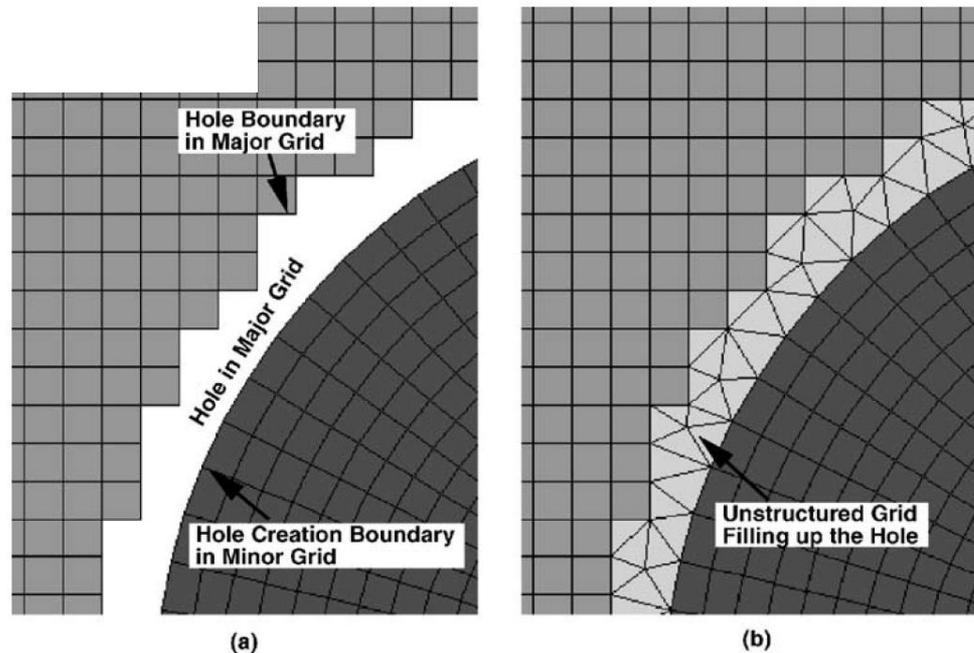


Fig. 3. Direct Replacement of Arbitrary Grid Overlapping by Non-structured grid: (a) Chimera grid, (b) DRAGON grid.

AIAA JOURNAL

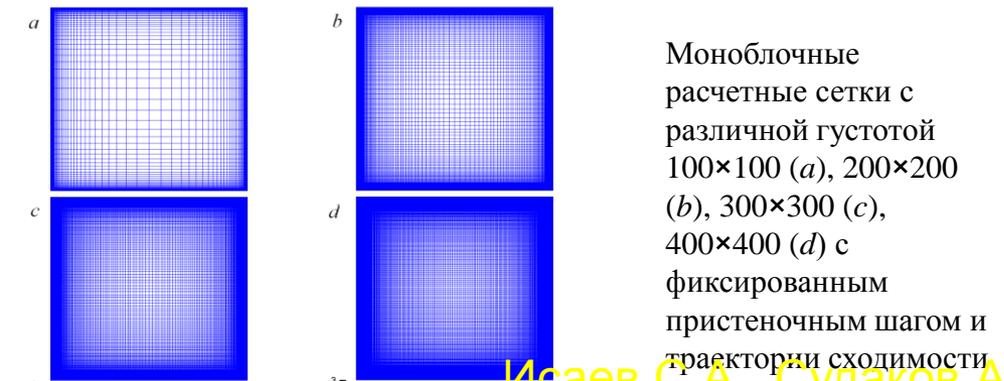
Vol. 33, No. 10, October 1995

Advance in Overset Grid Schemes: From Chimera to DRAGON Grids

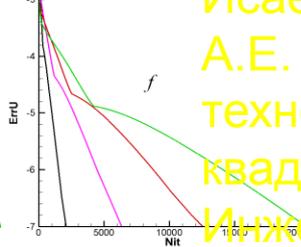
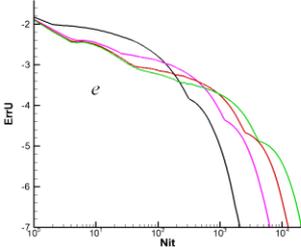
Kai-Hsiung Kao* and Meng-Sing Liou¹

NASA Lewis Research Center, Cleveland,
Ohio 44135

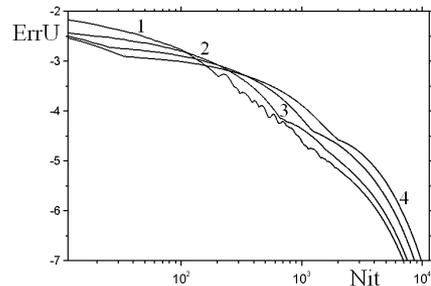
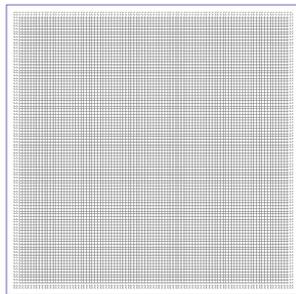
Сопоставление результатов расчетов циркуляционных течений в каверне, полученных на сетках разной топологии, в том числе композитных $Re=1000$



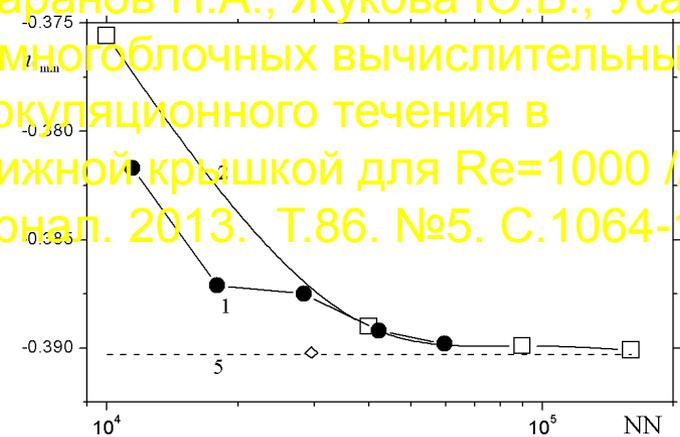
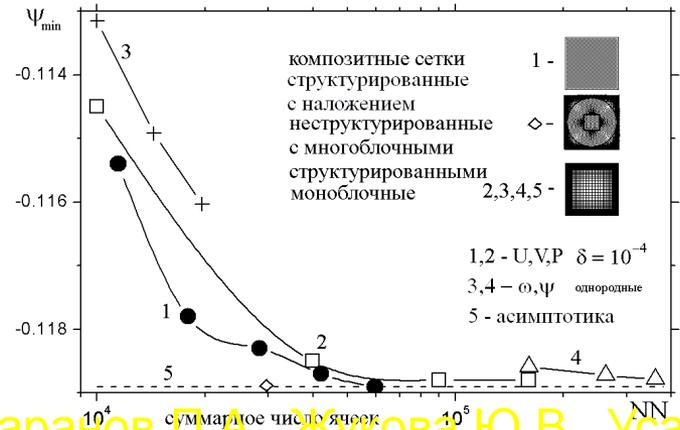
Моноблочные расчетные сетки с различной плотностью 100×100 (a), 200×200 (b), 300×300 (c), 400×400 (d) с фиксированным пристеночным шагом и траектории сходимости с логарифмическим (e) и линейным (f) масштабом.



Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е. Анализ масштабов многоблочных вычислительных технологий при расчете циркуляционного течения в квадратной каверне с подвижной крышкой для $Re=1000$ // Инженерно-физический журнал. 2013. Т.86. №5. С.1064-1079.

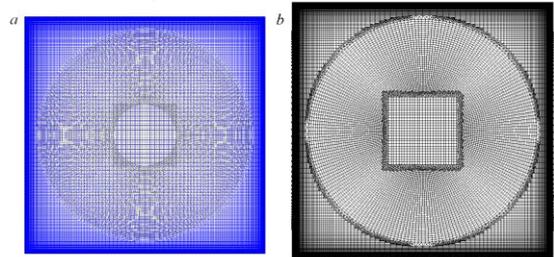


Траектории сходимости при расчетах на композитных сетках, сочетающих: фиксированную внутреннюю равномерную сетку 100×100 , покрывающую квадратную зону размером 0.95×0.95 , и внешние сетки различной плотности. 1 – $N=100$; 2 – 150; 3 – 200; 4 – 250. В качестве начальных приближений взяты решения при $Re=10^2$.



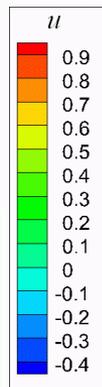
Сравнение зависимостей минимальных величин функции тока и продольной скорости от суммарного числа расчетных ячеек для композитных неструктурированных и структурированных и моноблочных сеток.

Многоблочные структурированные с наложением (a) и композитные неструктурированные (b)

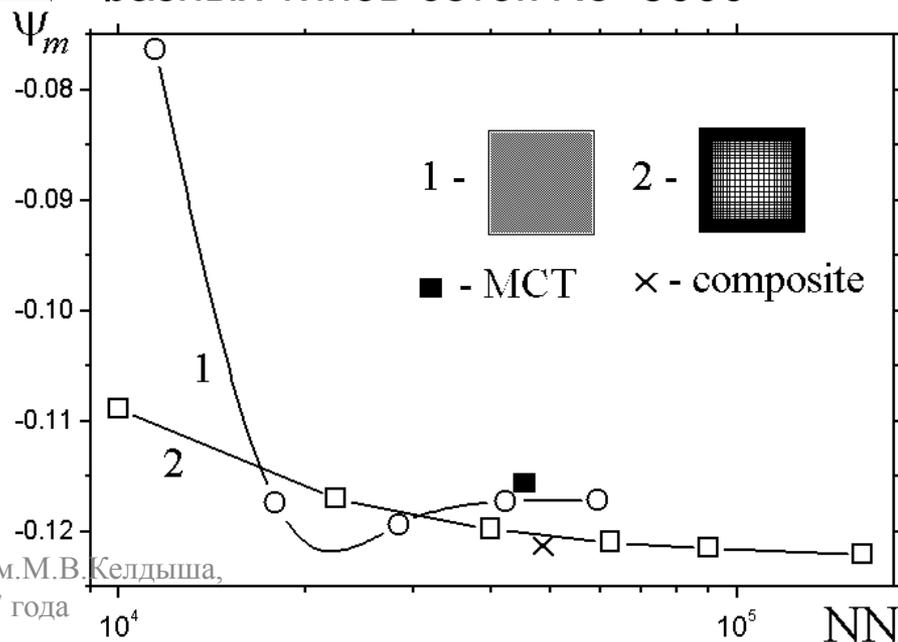


Сопоставление результатов расчетов циркуляционных течений в каверне, полученных на сетках разной топологии, в том числе композитных

Re=5000



Зависимость минимальной функции тока от общего количества расчетных ячеек для разных типов сеток Re=5000



Re=1000

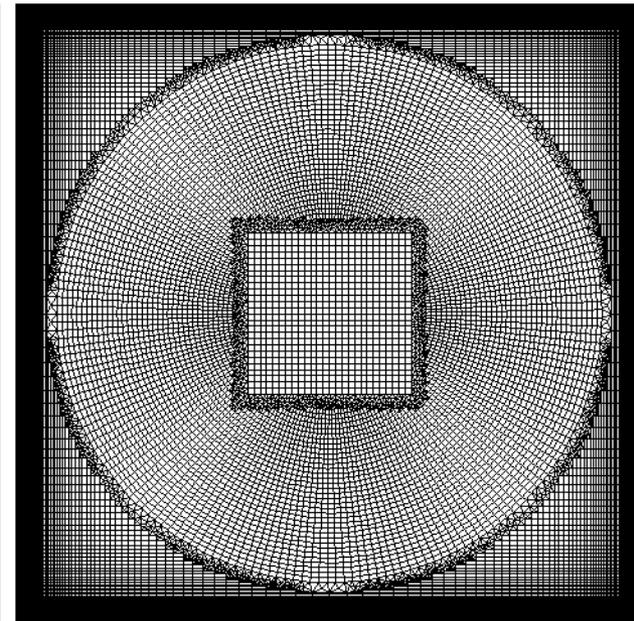
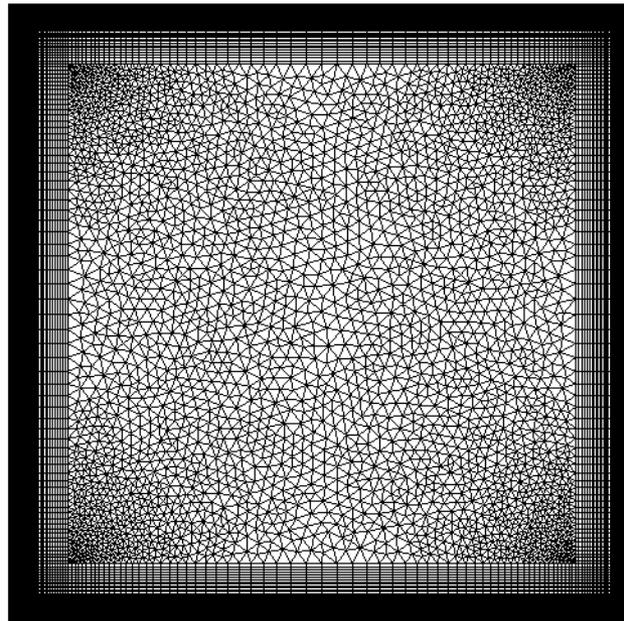
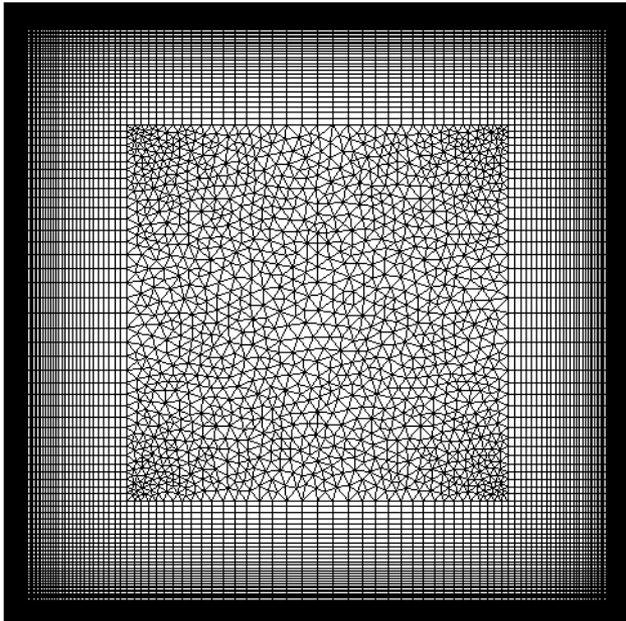
Сравнение картин изополей продольной компоненты скорости u : слева - МВТ, справа – композитные неструктурированные сетки с примерно равным количеством ячеек

Сравнение неструктурированных и композитных сеток по экстремальному значению функции тока в каверне с подвижной крышкой $Re=5000$

NN=42142

51324

49097



-0.11907

-0.11825

-0.12125

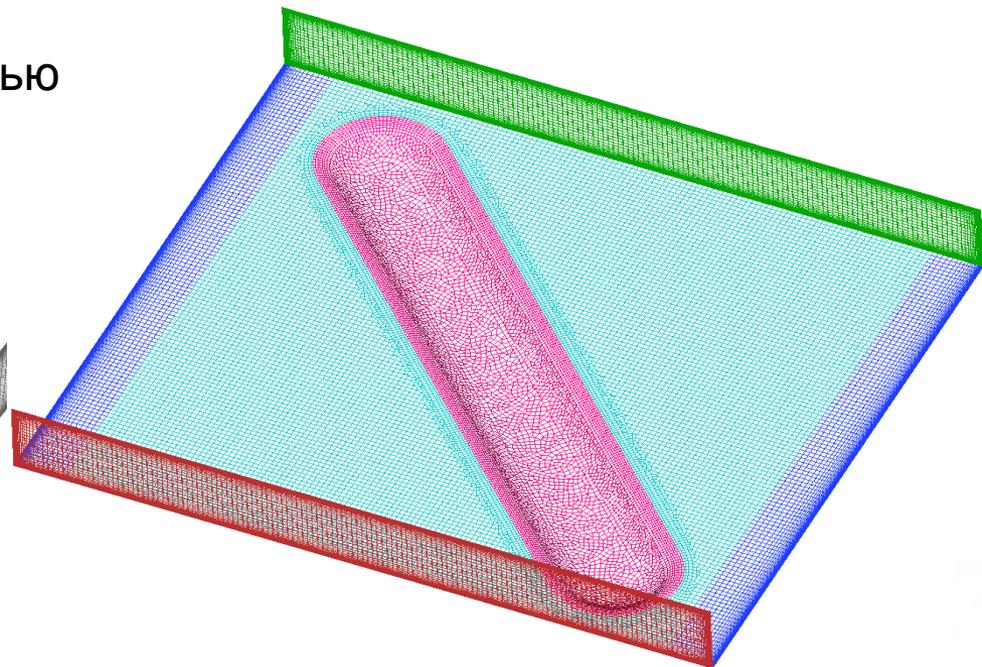
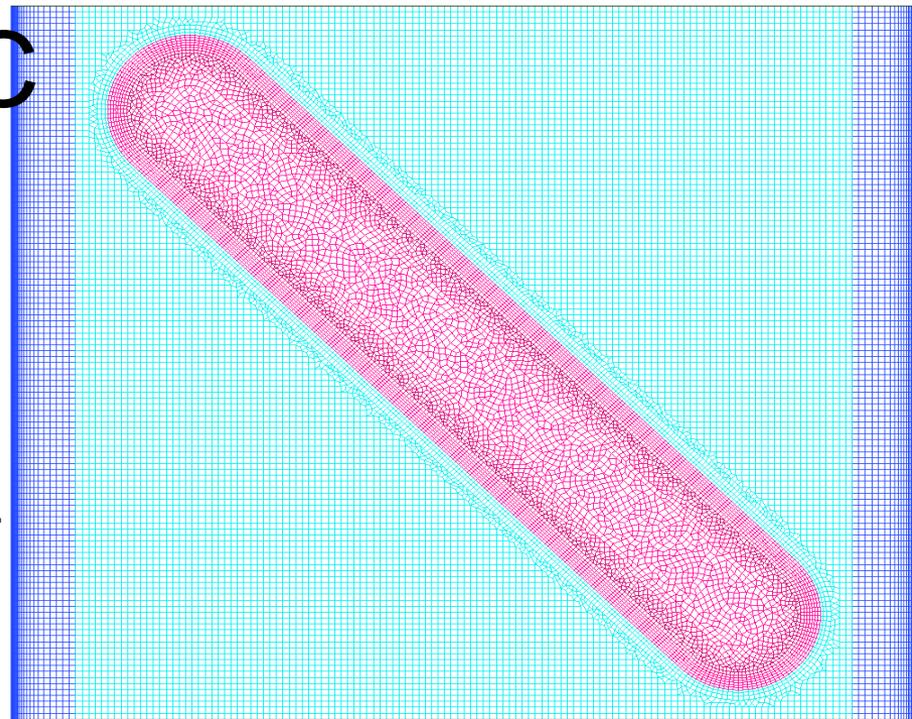
Kalinin E. I., Mazo A. B. and Isaev S. A. Composite mesh generator for CFD problems // 11th International Conference on "Mesh methods for boundary-value problems and applications" IOP Publishing IOP. Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. 158. 6p.

НОВЫЙ КОМПЛЕКС VP2/3

Построение трехмерной сетки в варианте «2.5D». Сначала строится поверхностная сетка на нижней поверхности канала, а затем проводится операция выдавливания (extrude) вдоль вертикального направления.

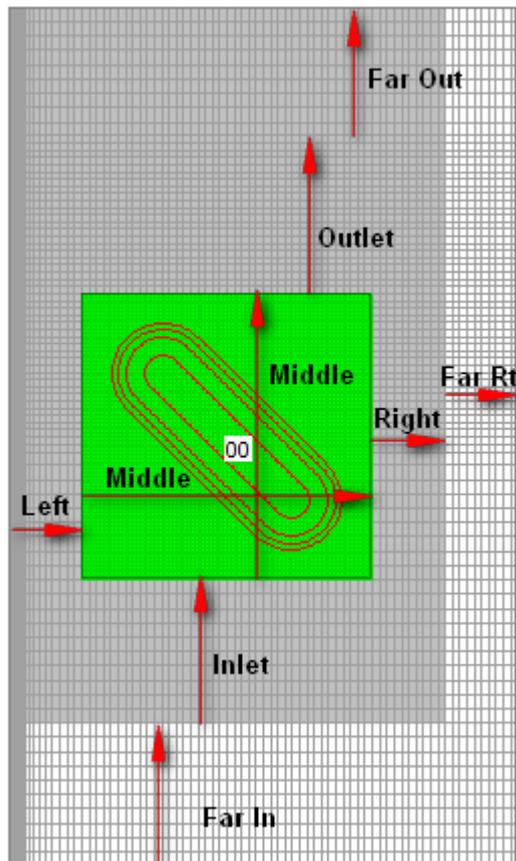
Периодический модуль с наклоненной овальной траншеей на стенке узкого канала

Большинство операций, связанных с генерацией сетки, производится с помощью пакета HybMesh (<https://github.com/kalininei/HybMesh>).



Предыдущий VP2/3

СОЗДАНИЕ РЕЛЬЕФА



Gauge region (dimples region, MR)

Size	4.000	4.000	Buffer size	0.100	<input type="button" value="Apply"/>
Step (ZX)	0.050		Trace Length	2	

Center = (0, 0); Shift = 0	Center = (-1, -1); Shift = 2

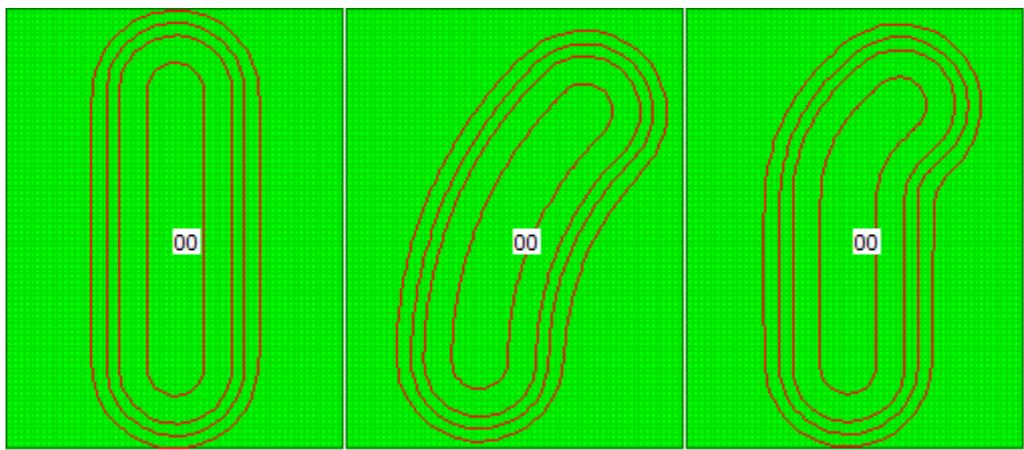
--	--	--

None

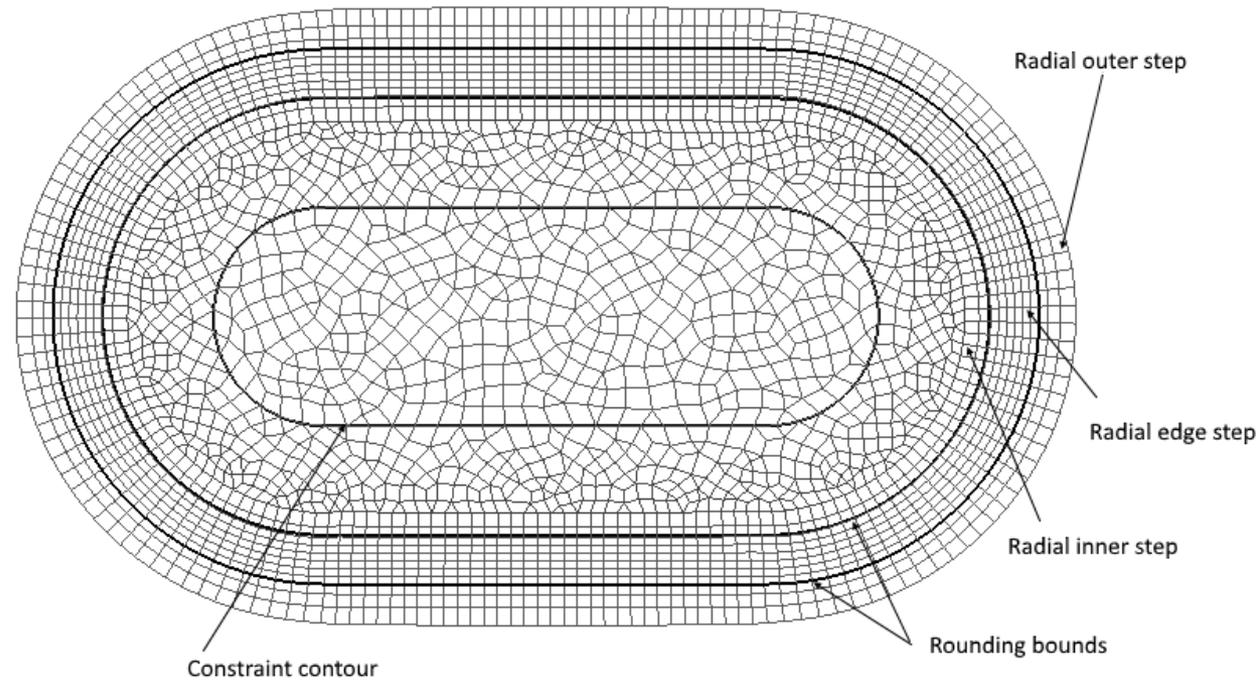
Even rows

Even cols

ФОРМЫ ВИХРЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НОВОГО ТИПА



BaseDimple	BaseLine	Mesh	Info	<input checked="" type="checkbox"/> rebuild mesh	Apply
Diameter	1.000	Diameter function			
Depth/D	0.250	X	0.000	0.750	1.000
Rad0/D	0.250	Y	1.000	1.000	1.000
		YScale function			
		X	0.000	0.750	1.000
		Y	1.000	1.000	1.000
					progress



Пока что это не полноценный параллельный комплекс, а набор программ, его имитирующих в ручном режиме.

Сторонние утилиты

Для генерации сеток используются программы gmsh (<http://gmsh.info>) и hybmesh (<https://github.com/kalininei/HybMesh>). Последняя должна быть установлена обычным способом (инсталлятор 3-party\hybmesh-v0.4.6-win64.exe). Для декомпозиции – программа METIS

(<http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/metis/metis/overview>) : 3-party\gpmetis.exe.

Для выполнения параллельных расчетов должна быть установлена MS-MPI ([https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb524831\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb524831(v=vs.85).aspx)). Инсталлятор находится в 3d-party\MSMpiSetup-8.0.exe.

При работе некоторых программ генерации сеток может быть предложено указать место расположения вспомогательных модулей.

Генерация исходной задачи

По-прежнему используются в основном дельфийские программы (каталог «preprocessor – delphi»). Итогом становится рабочая директория для решателя. Если нужна пост-обработка в Дельфи, то, естественно, нужно сохранять и файлы типа lf2(3).

Из последних изменений – траншея-бумеранг. Ніб - лунка-бумеранг.docx.

Не-дельфийских задач пока немного: задача для рельефа и каверны – квадратная и круговая в канале (каталог «alone_tasks»).

Декомпозиция (*partitioning*)

Выполняется программой `utils/vtaskRepartition2(3)`.

Исходными данными является рабочая директория решателя, созданная при генерации задачи.

Не важно, это моноблочно – композитная или MBT-сетка. В последнем случае все индексы узлов, граней и т.д. сначала переводится из локальной (по областям) в единую нумерацию и уже в ней уже строится декомпозиция.

Для выполнения декомпозиции нужно установить нужное число разбиений (N_p) и нажать кнопку «Partitioning». Изменений в параметрах, установленных по умолчанию, как правило, не требуется.

Partitioning N_p

Scheme

Multilevel recursive bisectioning

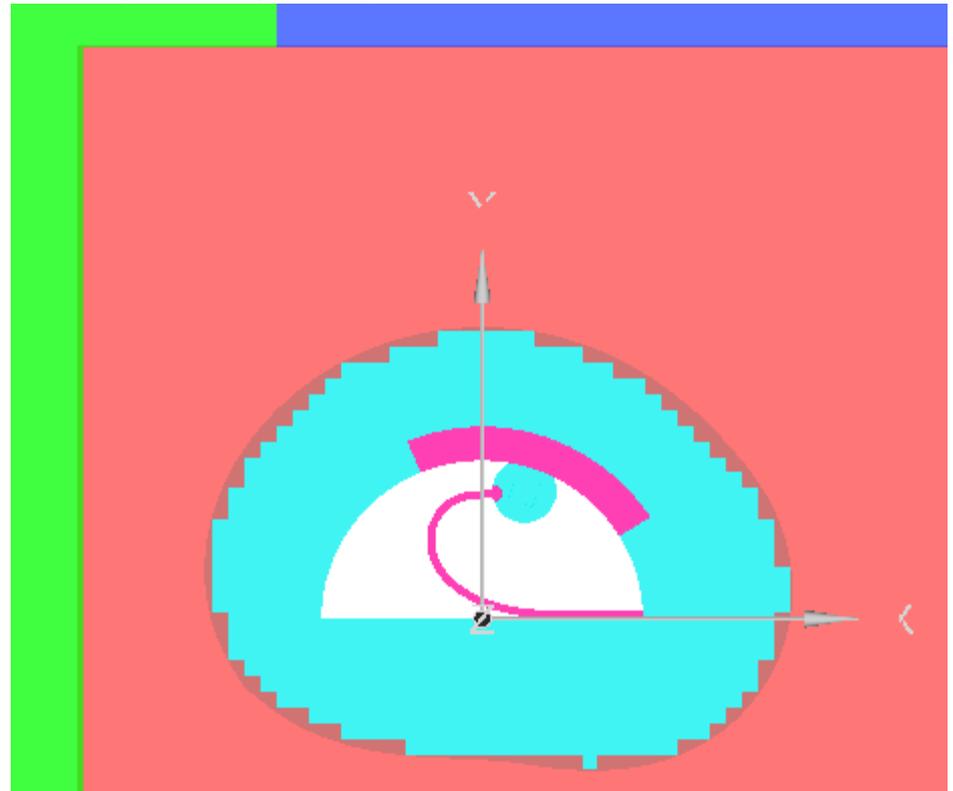
Multilevel k-way partitioning

Partitioning's objective function (k-way only)

Edgecut minimization

Total communication volume minimization

-contig (k-way only) -minconn (k-way only)



Обратная переинтерполяция.

Расчет на декомпозированной сетке является вполне полноценным. Если, например, нас интересуют только суммарные нагрузки, то можно больше ничего и не делать. Если же нужна дополнительная обработка, то лучше переинтерполировать задачу обратно на исходную сетку. Для просмотра в Техплоте это убирает неточности на краях областей. Если же исходная задача была сгенерирована из Дельфи, то декомпозированную оттуда просто невозможно прочесть. Только исходную.

Для переинтерполяции служит вторая вкладка в программе vtaskRepartition – «p2p interpolation».

Это НЕ полноценная переинтерполяция. Ее специальное название p2p – point-to-point, т.е. интерполяция производится между сетками геометрически идентичными, но с разной нумерацией (собственно, декомпозиция это перенумерация и есть). Сначала выбираем директорию – источник (т.е. директорию декомпозированной задачи), потом целевую директорию (директорию исходной задачи).

После чтения доступна кнопка «Interpolate».

Флажки означают следующее

«Process nst or st data» - кроме основного файла данных (work_dir/data.vpdata) обрабатываются все файлы в директориях nst_data или st_data.

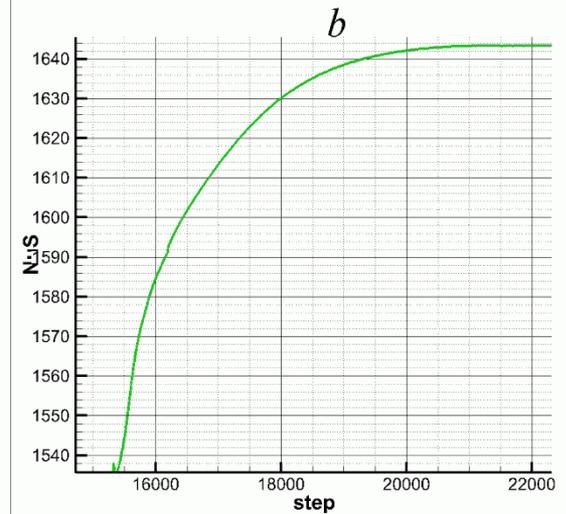
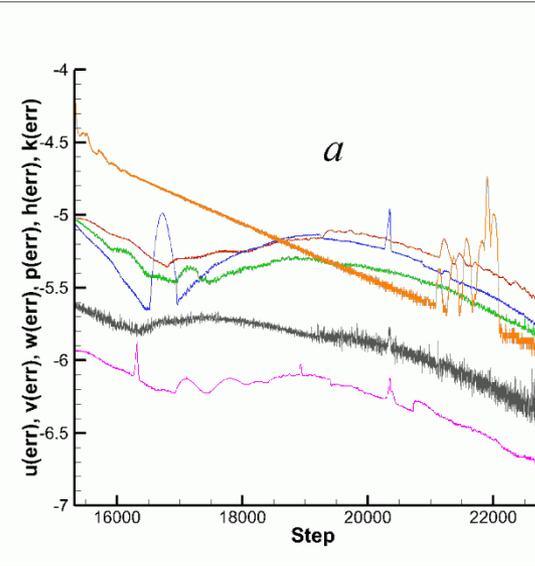
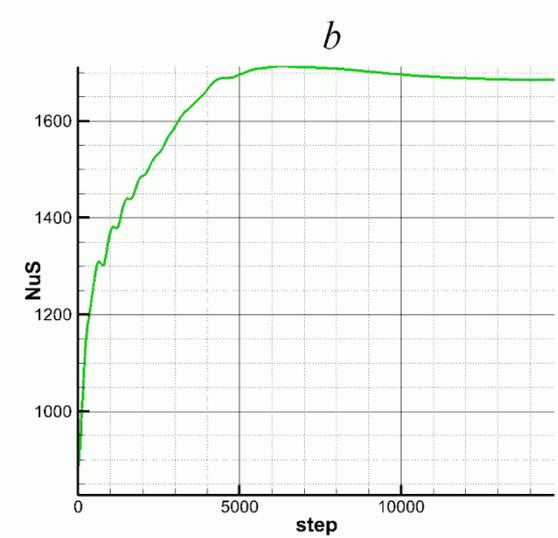
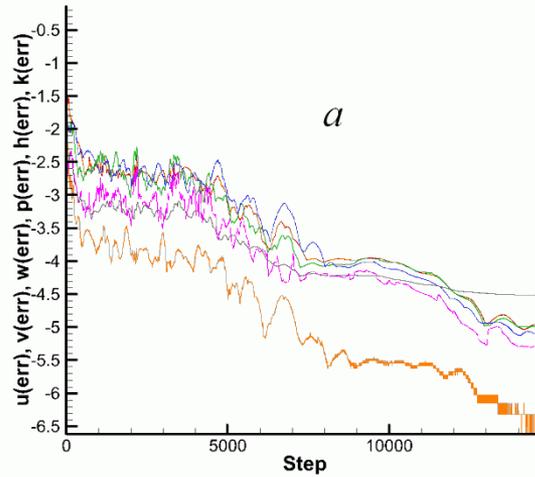
«z-ignore». Для 2.5D задач, где сетка построена выдавливанием двумерной по Z-направлению. Отключает при поиске фильтрацию по z-координате. Сделано было для круговой каверны, чтобы можно было перенести двумерное решение в качестве исходного для трехмерного расчета.

Сравнение расчетов на новом и старом решателе. Поведение погрешностей и суммарного числа Нуссельта на стенке с траншеей

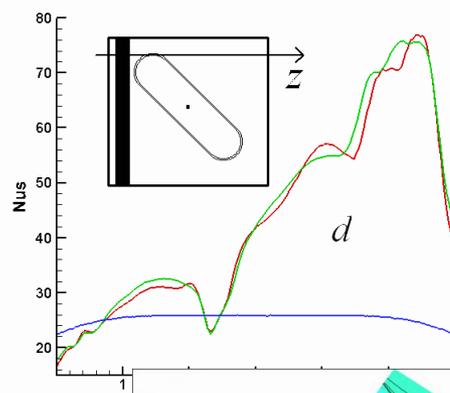
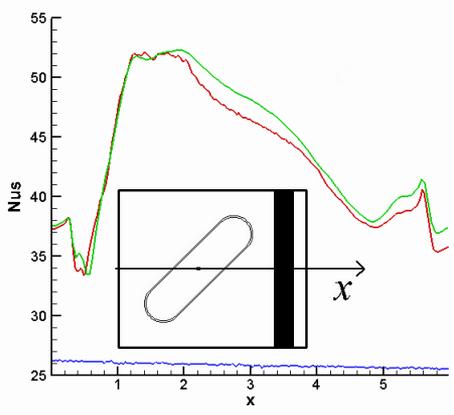
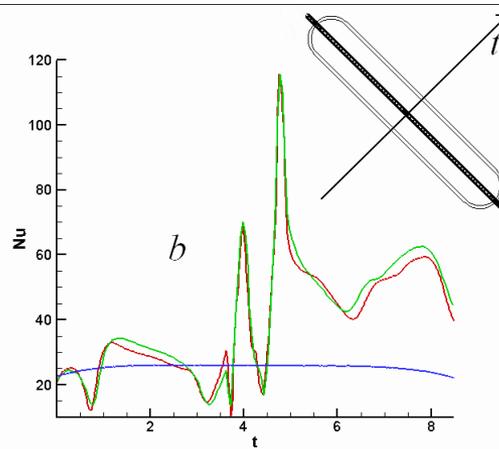
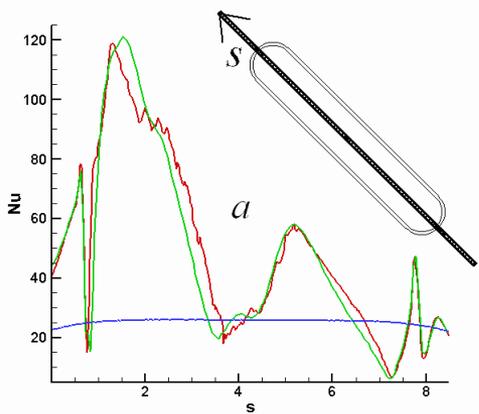
VP2/3
Многоблочные сетки

Новый VP2/3
Гибридные сетки

Сравнение теплогидравлических характеристик и экстремальных параметров турбулентного течения при $Re=10^4$, рассчитанных с помощью MBT и гибридных сеток

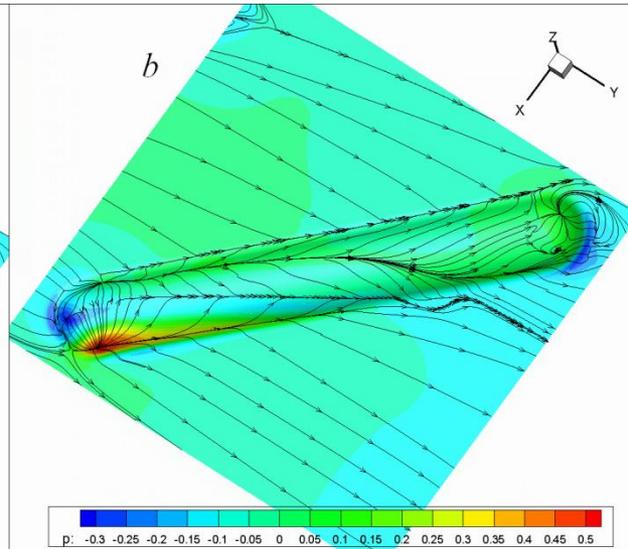
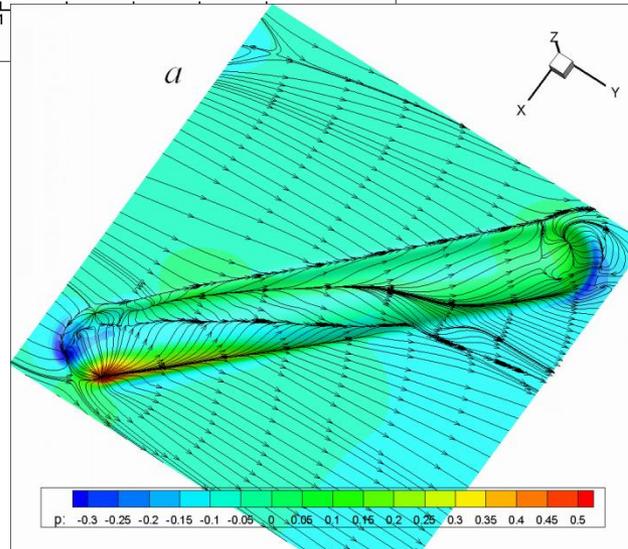


	Nus	$10^2 \zeta$	u_{max}	u_{min}	w_{max}	w_{min}	$10^2 k_{max}$	$10^3 \mu_{tma}$
MBT	43.34	2.33	1.45	-0.57	-1.23	0.49	7.08	5.21
HybGrid	43.31	2.26	1.44	-0.63	-1.20	0.40	5.00	4.96



Сравнение локальных Nu (a,b) и проинтегрированных по поперечным полосам Nus (c,d) чисел Нуссельта вдоль диагональных направлений (a,b), вдоль (c) и поперек (d) квадратного участка периодического модуля с лункой, полученных с помощью НГ (красные линии) и МВТ (зеленые линии). Данные для плоскопараллельного канала нанесены синими линиями. $Re=10^4$

Сравнение полей давления с нанесенными картинами растекания жидкости по поверхности стенки модуля с овально-траншейной лункой, полученных с помощью НГ (a) и МВТ (b)



*Усачов А.Е., Исаев С.А., Гувэрнюк С.В., Баранов П.А. Применение дифференциальных моделей турбулентности разного уровня для расчета внутренних течений // Ученые Записки ЦАГИ. 2017. Т. XLVIII. №1. С.26-36.

Baranov P.A., Guvernnyuk S.V., Zubin M.A., Isaev S.A., Usachov A.E. Application of various models of turbulence for calculation of incompressible internal flows // *TsAGI Science Journal*. 2017. Vol.48. No.1. P. 31–42.

***Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A. Improvement of aerodynamic characteristics of a thick airfoil with a vortex cell in sub- and transonic flow // *Acta Astronautica*. 2017. Vol.132. P.204 –220.**

*Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Попов И.А. Оценка времени существования уловленного вихря в круговой каверне на обтекаемом при нулевом угле атаки полукруговом профиле после отключения щелевого отсоса // Письма в ЖТФ. 2017. Т.43. вып.7. С.32-39.

Isaev S. A., Baranov P. A., Sudakov A. G., Popov I. A., and Usachov A. E. Estimation of the lifetime of a trapped vortex in a circular cavern on a semicircular airfoil streamlined at a zero angle of attack after switching off slot suction // *Technical Physics Letter*. 2017. Vol. 43. No. 4. P. 338–340.

*Исаев С.А., Усачов А.Е., Баранов П.А., Глушков Т.Д., Гуреев М.В. Численное исследование движения потоков воздуха в кабине грузового автомобиля при ее вентиляции в трех различных режимах // Инженерно-физический журнал. 2017. Т.90. №2. С.431-437.

Isaev S. A., Usachov A. E., Baranov P. A., Glushkov T. D. and Gureev M. V. Numerical investigation of the air flows in cab of a truck in three different regimes of its ventilation // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. Vol. 90. No. 2. P.405-411.

***Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A. Tornado-like heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol.109. P. 40-62.**

***Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A., Guvernnyuk S., Sinyavin A., Chulyunin A., Mazo A., Demidov D. Ensuring safe descend of reusable rocket stages – numerical simulation and experiments on subsonic turbulent air flow around a semi-circular cylinder at zero angle of attack and moderate Reynolds number // *Acta Astronautica*. 2017. Vol.132. P.**

*Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г., Попов И.А., Усачов А.Е. Управление обтеканием полукругового профиля под нулевым углом атаки при отсосе в одной и двух вихревых ячейках для достижения экстремальной подъемной силы // Письма в ЖТФ. 2017. Т.43. вып. 24. С.53-58.

Isaev S. A., Baranov P. A., Sudakov A. G., Popov I. A., and Usachov A. E. Controlling the Flow past a Semicircular Airfoil at Zero Angle of Attack Using Slot Suction in One or Two Vortex Cells for Attaining Extremal Lift // *Technical Physics Letters*, 2017, Vol. 43, No. 12, pp. 1115–1117.

Благодарности
Правительству
РФ (МЕГА
проект), РНФ,
РФФИ