

УДК 532.526.048.3

**Повышение эффективности численного моделирования
турбулентных отрывных течений с помощью применения гибридных
сеток со структурированными разномасштабными блоками и
неструктурированными вставками**

Усачов А.Е.^{1*}, Мазо А.Б.^{2}, Калинин Е.И.^{2***}, Исаев С.А.^{3****},
Баранов П.А.^{4*****}, Семилет Н.А.^{1*****}**

*¹Центральный аэрогидродинамический институт,
ЦАГИ, ул. Жуковского, 1, Жуковский, 140180, Россия*

*²Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, 35,
Казань, 420008, Россия*

*³Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»,
ул. Пилотов, .38, Санкт-Петербург, 196210, Россия*

*⁴Аккумуляторная Компания “Ригель”, ул. проф. Попова, 38,
Санкт-Петербург, 197376, Россия*

**e-mail: usachov_al@mail.ru*

***e-mail: abmazo1956@gmail.com*

****e-mail: kalininei@yandex.ru*

*****e-mail: isaev3612@yandex.ru*

******e-mail: paul-baranov@yandex.ru*

******e-mail: nikita-semilet@rambler.ru*

Аннотация

В статье предлагается методология применения композитных гибридных сеток для расчета турбулентных внутренних течений при небольших числах Рейнольдса. Чтобы оценить возможности предложенной методики численно

моделируется внутреннее турбулентное течение в плоском канале с открытой цилиндрической каверной на различных сетках, в том числе и гибридных. Рассмотрены три вида сеток: грубая гибридная сетка, уточненная гибридная сетка с неструктурированными ставками и неструктурированная треугольная сетка. Результаты численного моделирования сравниваются с данными, полученными на экспериментальной установке в Институте механики МГУ при числе Рейнольдса $Re=1.34 \cdot 10^5$. На основе сопоставления совпадения данных расчета и эксперимента можно сделать выводы о применимости различных гибридных сеток для подобных типов течений.

Ключевые слова: вычислительная аэродинамика, турбулентные течения, модель турбулентности, гибридные сетки.

Введение

Численное моделирование задач прикладной аэрогидродинамики занимает значительное место в современных исследованиях, о чем свидетельствует широкий спектр выполненных работ, например, [1-5]. Для решения важных практических задач аэродинамики и теплофизики был разработан метод Многоблочных Вычислительных Технологий (МВТ), который позволяет в рамках вычислительной аэродинамики численно моделировать течения жидкости и газа в сложных геометрических областях [6]. Для численного моделирования использовались структурированные ортогональные или близкие к ортогональным перекрывающиеся

сетки с учетом физических масштабов в различных областях турбулентных течений (Рис.1).

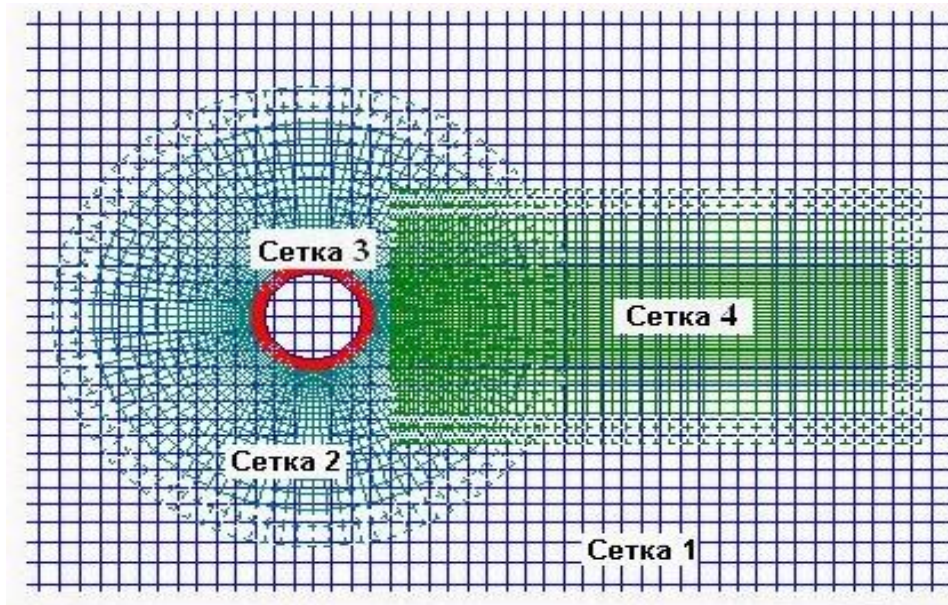


Рис.1. Пример построения многоблочной сетки для численного моделирования двумерного обтекания цилиндра.

Для передачи информации от одной сетки к другой использовалась аппроксимационная процедура в сочетании с итерационным методом.

1 Построение гибридных сеток

Дальнейшее развитие МВТ привело к созданию гибридных сеток, сочетающих в себе преимущества многоблочных и моноблочных сеток. С одной стороны, для численного моделирования турбулентных течений применение различных типов сеток в одной расчетной области позволяет значительно повысить точность и эффективность расчетов, с другой стороны, моноблочная сетка не требует пересчета параметров с одной расчетной сетки на другую, что упрощает численный алгоритм и требует меньше итераций. В одной расчетной области могут использоваться как

структурированные, так и неструктурированные сетки с учетом физических особенностей течения (пограничный слой, невязкое течение, циркуляционные зоны и т.д.).

С этой целью был разработан генератор гибридных сеток [7], который предоставляет возможность построения сеток на основе композитного подхода. Построение гибридной сетки включает в себя несколько шагов: создание структурированных сеток–прототипов в элементарных областях; отображение прототипов в произвольные области с помощью координатных преобразований; наложение сеток; построение 3D сеток методами продавливания или вращения. Основной операцией построения гибридной сетки является операция объединения двух произвольных сеток, имеющие ненулевое пересечение областей в одну. Полученная в результате операции сетка сохраняет элементы родительских сеток везде за исключением небольшой области (буферной зоны) около линии контакта областей, которая заполняется треугольниками с возможным рекомбинированием в четырехугольники. Буферная область всегда строится внутри базовой сетки. Геометрия наложенной сетки остается незатронутой. Буферная зона строится как область всех ячеек базовой сетки, отстоящих от линии контакта сеток не более чем на размер буферной зоны, задаваемой пользователем (Рис.2).

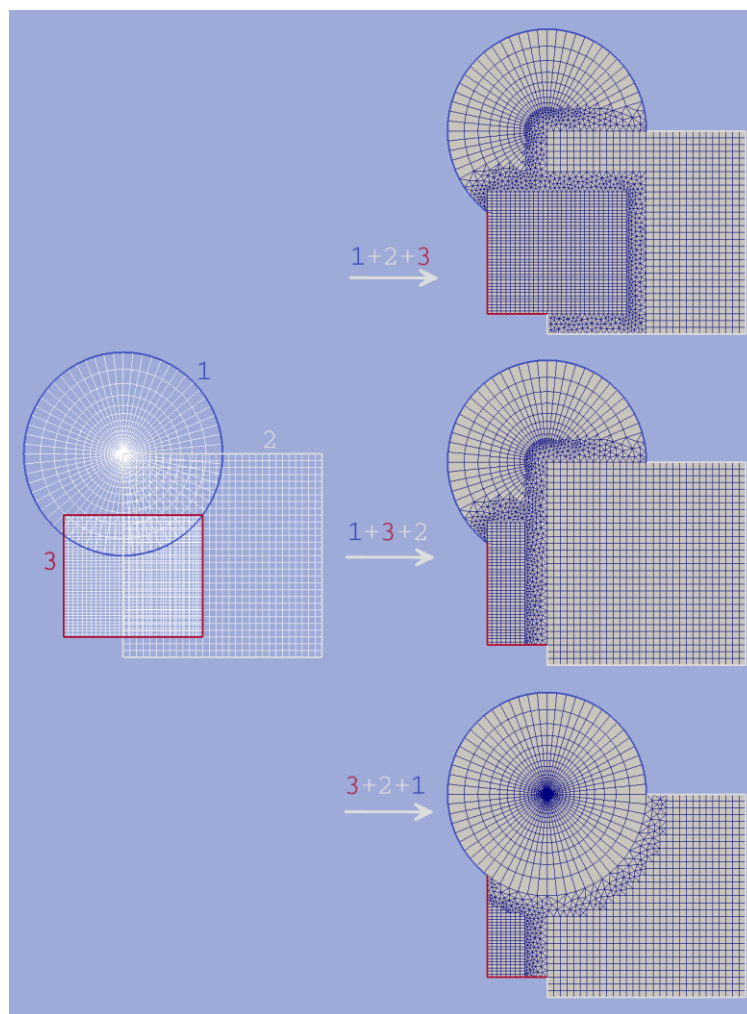


Рис.2. Варианты построения гибридной сетки с различным положением буферной зоны.

Для апробации предложенной методики с помощью дифференциальной модели турбулентности Ментера MSST численно моделируется внутреннее турбулентное течение в плоском канале с открытой цилиндрической каверной на различных сетках, в том числе и гибридных. Рассмотрены три вида сеток: грубая гибридная сетка, уточненная гибридная сетка с неструктурированными ставками и неструктурированная треугольная сетка. Результаты численного моделирования сравниваются с данными, полученными на экспериментальной установке (Рис.3.) в Институте механики МГУ С.В. Гувернюком с соавторами [8] при числе Рейнольдса

$Re=1.34 \cdot 10^5$. На основе сопоставления совпадения данных расчета и эксперимента можно сделать предположения о применимости различных гибридных сеток для подобных типов течений.



Рис.3. Схема экспериментальной установки.

2 Численный алгоритм решения

Дифференциальные уравнения движения вязкого газа [9] численно решаются хорошо зарекомендовавшим себя методом контрольного объема [10], позволяющим строить консервативные дискретные схемы для неортогональных криволинейных сеток с ячейками различной формы. Методом контрольного объема решаются как стационарные, так и нестационарные уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу. При дискретизации конвективных потоков через грани контрольного объема использовались противопоточные схемы второго порядка точности [11]. Давление рассчитывалось с помощью полунявного метода (SIMPLEC), основанного на предложенной Патанкаром процедуре SIMPLE [10]. На основе данной методики многоблочной вычислительной технологии (МВТ) разработан

программный комплекс VP2/3, который успешно применяется при численном моделировании различных задач тепломассообмена при течениях вязкой жидкости и газа [6].

Для замыкания уравнений Рейнольдса использовались различные модели турбулентности. В работе [12] представлены данные численного моделирования несжимаемого стационарного течения в канале с цилиндрической каверной для случаев замыкания уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с помощью моделей турбулентности Спаларта-Аллмареса с коррекцией источникового члена [13], realizable k- ϵ модели турбулентности [14], SST k- ω модели Ментера [15], transition SST k- ω модели [16-17] и модель для Рейнольдсовых напряжений (RSM) [18-21]. Как было показано в [12], приемлемые результаты дает SST k- ω модели Ментера (6), которая использовалась в данной работе.

3 Варианты расчетных сеток для численного моделирования течения в канале с цилиндрической каверной на его нижней стенке

Первый вариант гибридной сетки (№1), который использовался при численном моделировании, имел совсем небольшое число ячеек 8020 и число узлов 8243. Фрагменты этой сетки представлены на рисунке 4. Для построения этой гибридной сетки использовались три блока сеток: прямоугольная декартовая сетка в плоском канале, радиальная ортогональная сетка в каверне и квадратная декартовая сетка в каверне. Сопряжение сеток осуществлялось с помощью координатных преобразований без построения буферной зоны.

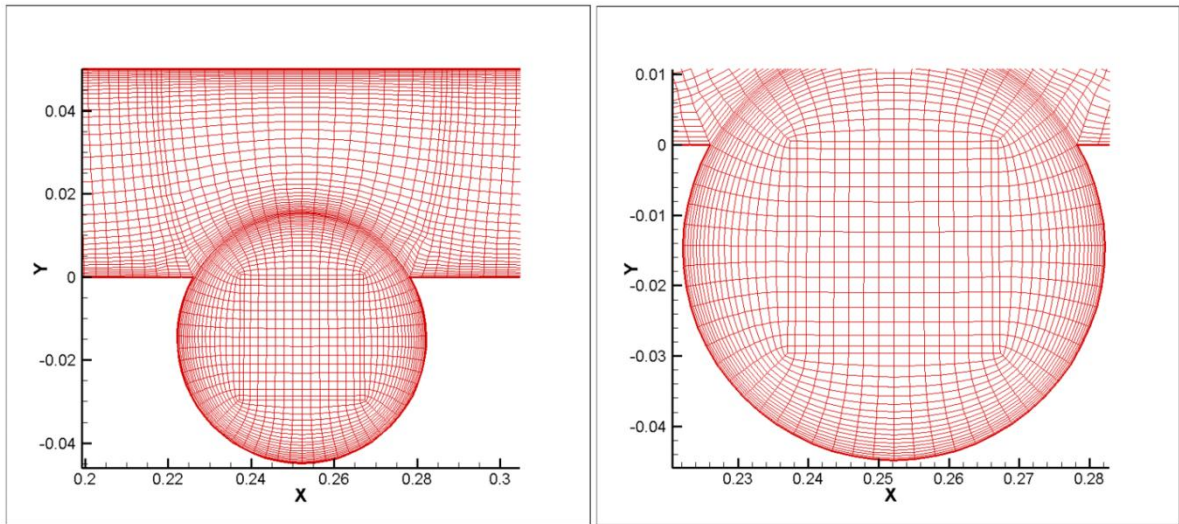


Рис.4. Фрагменты гибридной сетки №1.

Второй уточненный вариант гибридной сетки (№2), фрагменты которой показаны на рисунке 5, содержал число ячеек 22441 и число узлов 21796. При построении этой сетки применялись декартовы, радиальные и неструктурированные треугольные сетки.

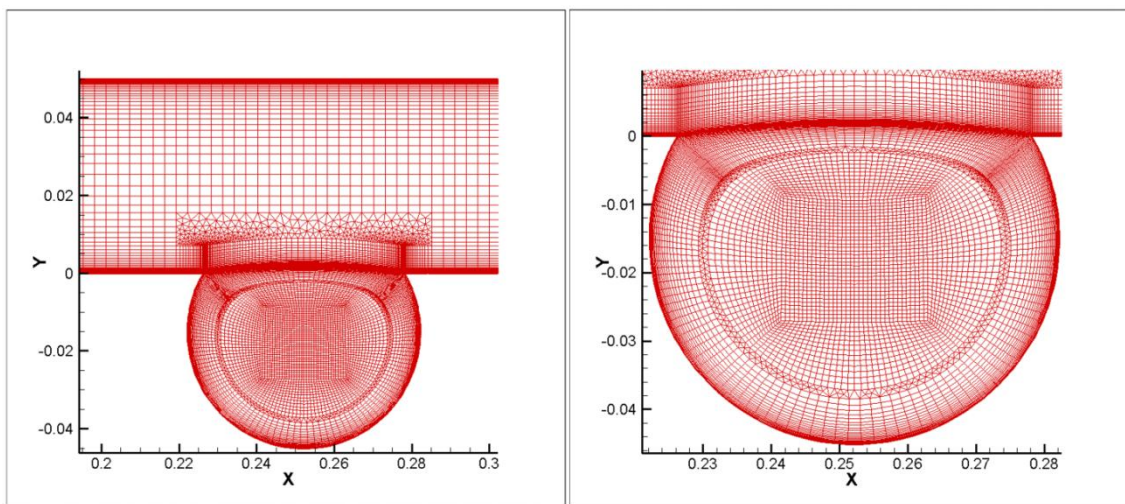


Рис.5. Фрагменты гибридной сетки №2.

Чтобы понять возможности применения гибридных сеток выберем для сравнения неструктурированную треугольную сетку с числом ячеек 137678, фрагменты которой представлены на рисунке 6.

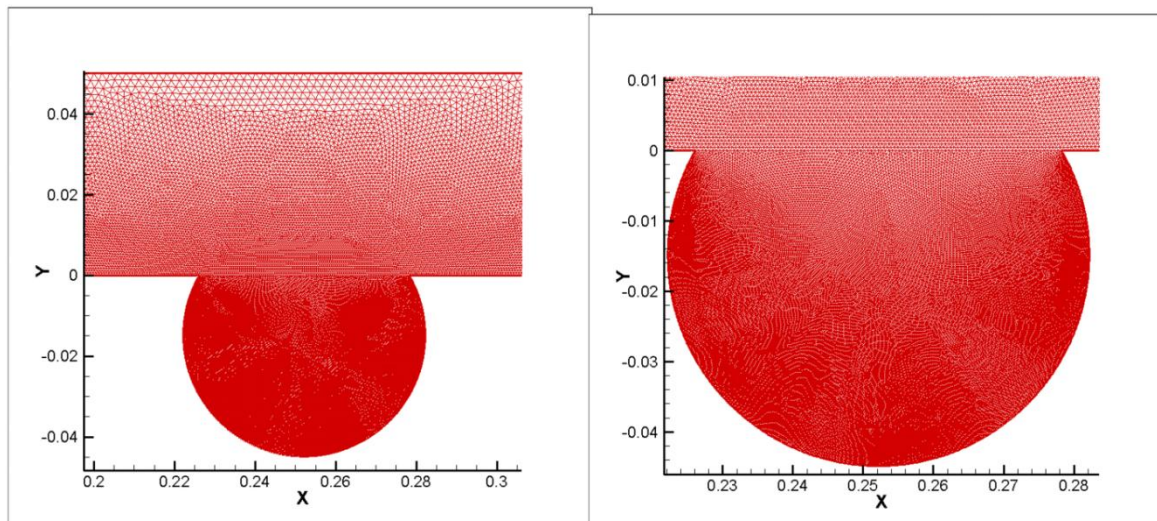


Рис.6. Фрагмент неструктурированной треугольной сетки №3.

4 Результаты численного моделирования течения в канале с цилиндрической каверной на его нижней стенке

На рисунках 7 и 8 приведены некоторые результаты численного моделирования двумерного турбулентного течения в канале с цилиндрической каверной на его нижней стенке при числе Рейнольдса $Re=1.34 \cdot 10^5$. Сопоставление полей вектора скорости и траекторий меченных частиц для различных сеток показывает их практическое совпадение. Различие в траекториях меченных частиц наблюдается только в густоте линий, которое определяется количеством ячеек сетки в зоне течения.

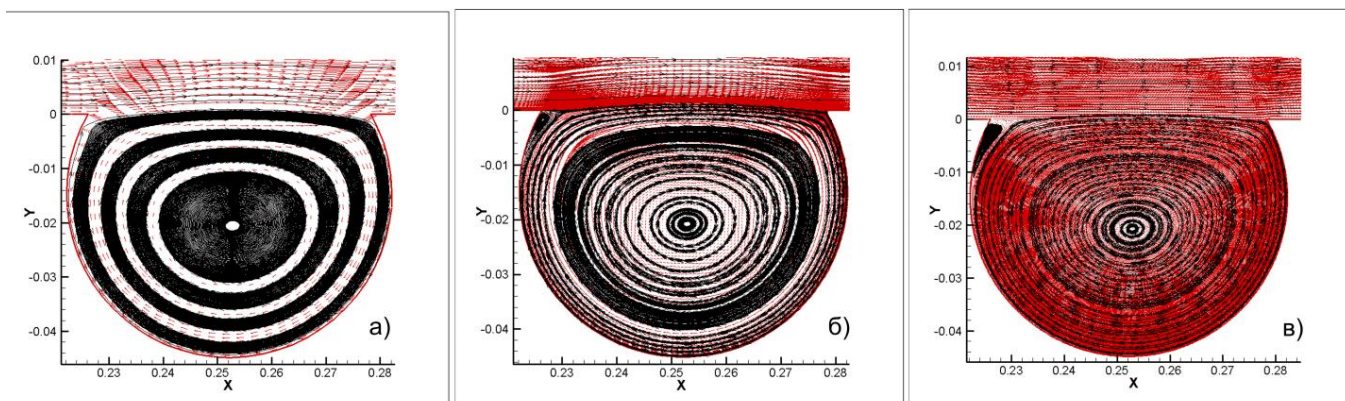


Рис.7. Вектора скорости и траектории меченных частиц, полученные: а) - на гибридной сетке №1; б) – на гибридной сетке №2; в) - неструктурированной треугольной сетке №3.

Картины поля модуля скорости изображенные на Рис.8 также совпадают между собой.

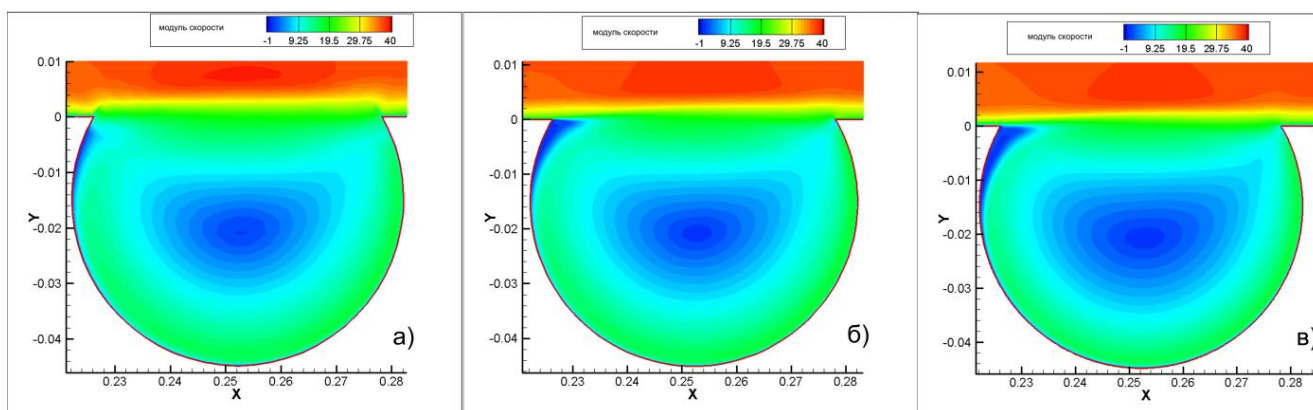


Рис.8. Поля модуля скорости, полученные: а) - на гибридной сетке №1; б) – на гибридной сетке №2; в) - неструктурированной треугольной сетке №3.

Контроль значения безразмерной величины y^+ вблизи стенки дал следующие результаты: для гибридной сетки №1 $y^+ < 4$, для гибридной сетки №2 $y^+ < 1$, для неструктурированной сетки №3 $y^+ < 2$.

Таким образом, поля скорости вблизи цилиндрической каверны, полученные в результате численного моделирования на трех различных сетках очень близки между собой.

5 Сравнение результатов численного моделирования с данными эксперимента

Сопоставим результаты численного моделирования с данными эксперимента.

Рассмотрим профиль осредненной горизонтальной составляющей скорости в поперечном сечении, которое проходит через центр цилиндрической каверны (Рис.9).

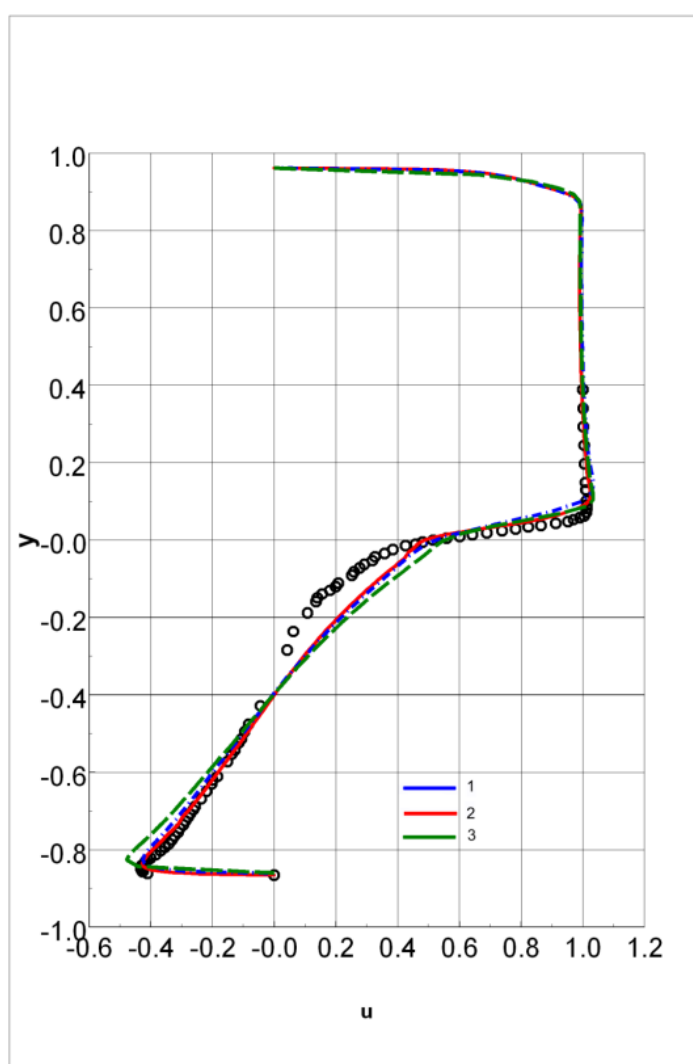


Рис. 9. Сравнение результатов расчетов профиля осредненной горизонтальной составляющей скорости на различных сетках с данными эксперимента: синий – гибридная сетка №1, красный – гибридная сетка №2, зеленый – неструктурированная треугольная сетка №3; о - эксперимент.

Сравнение данных расчета с данными эксперимента показывает достаточно хорошее совпадение их между собой. Различие между данными численного моделирования совсем небольшое, поэтому целесообразно сравнить отдельные области графиков для подробного сопоставления. Эти области даны на рисунке 10.

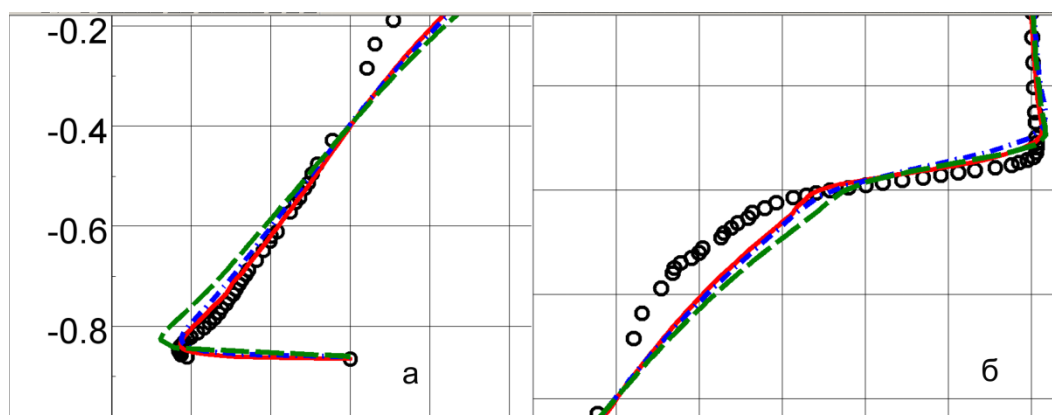


Рис. 10. Фрагмент сравнения результатов расчетов профиля осредненной горизонтальной составляющей скорости на различных сетках с данными эксперимента: синий – гибридная сетка №1, красный – гибридная сетка №2, зеленый – неструктурированная треугольная сетка №3; ○ - эксперимент.

В нижней части профилей скорости вблизи дна каверны наиболее близки к эксперименту расчеты на гибридных сетках, неструктурированная сетка несколько хуже совпадает с данными эксперимента (Рис.9а). Сопоставление профилей скорости в области слоя смешения (Рис.9б) показывает аналогичные результаты.

Для более точного сопоставления данных численного моделирования с экспериментом рассмотрим распределение безразмерного статического давления \bar{p}

$$\bar{p} = \frac{p - p_a}{p_1 - p_a}$$

Где p_1 - значение статического давления в точке $x = 3.5$ от начального сечения, p_a - атмосферное давление.

На рисунке 11 дано сопоставление результатов численного моделирования с данными эксперимента для величины безразмерного статического давления на стенке канала и дне каверны.

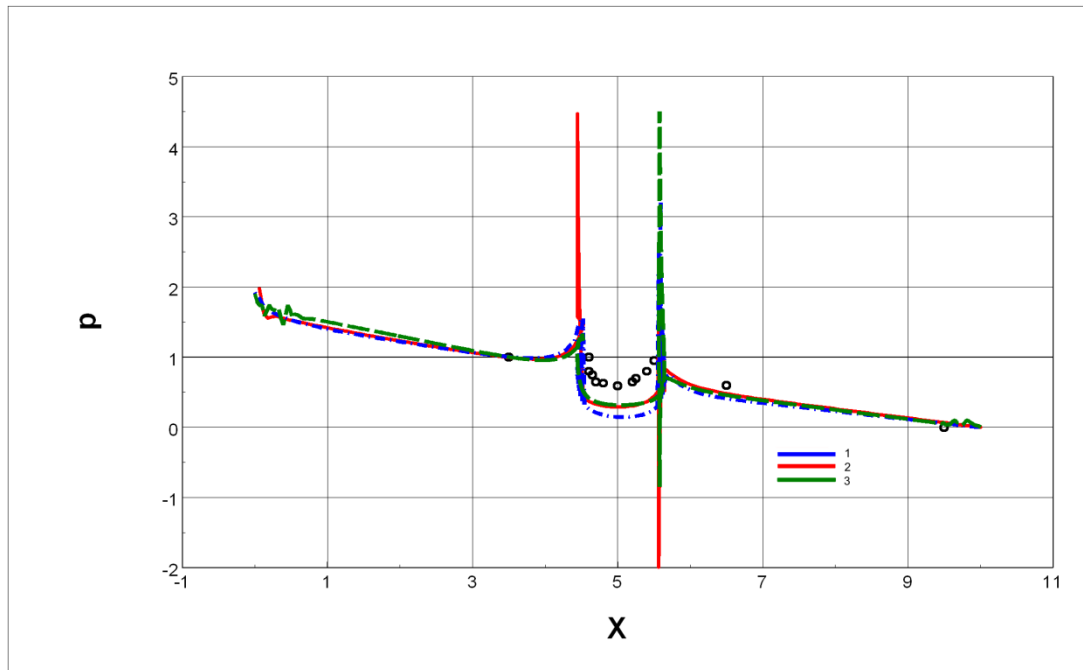


Рис. 11. Сравнение результатов расчетов распределения безразмерного статического давления на нижней стенке канала и дне каверны на различных сетках с данными эксперимента: синий – гибридная сетка №1, красный – гибридная сетка №2, зеленый - неструктурированная треугольная сетка №3; \circ - эксперимент.

Из рисунка 11 видно, что есть некоторое несовпадение данных эксперимента и расчета на дне цилиндрической каверны. Увеличенный фрагмент этого рисунка показан на рисунке 12. При этом, на грубой гибридной сетке №1 это расхождение больше, чем для уточненной гибридной сетки №2 и неструктурированной расчетной сетки №3. Расхождения данных расчета и эксперимента может быть объяснено трудностями в постанове точных граничных условий на входной и выходной границах области расчета для давления.

В целом можно отметить хорошее совпадение данных численного моделирования с результатами эксперимента.

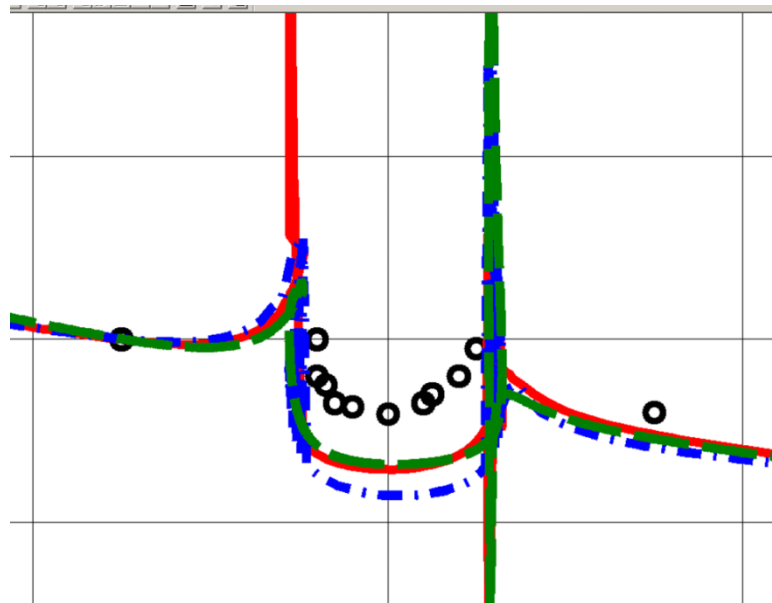


Рис. 12. Фрагмент сравнения результатов расчетов распределения безразмерного статического давления на нижней стенке канала и дне каверны на различных сетках с данными эксперимента: синий – гибридная сетка №1, красный – гибридная сетка №2, зеленый - неструктурированная треугольная сетка №3; \circ - эксперимент.

Обозначения

x_i - декартовы координаты ($i = 1, 2, 3$);

u_i - компоненты осредненной скорости течения жидкости в направлении x_i ;

p - осредненное статическое давление;

Выводы

Использование гибридных сеток позволяют значительно экономить вычислительные ресурсы (больше чем на порядок 8 тысяч ячеек гибридная сетка - 130 тысяч узлов неструктурированная треугольная сетка) при этом результаты численного моделирования очень близки между собой. Необходимо отметить, что важно формировать гибридные сетки, адаптируя физическую картину течения со структурой сетки. Так видно, что структура гибридной сетки №1 грубо моделирует слой смешения на границе канала и каверны, поэтому результаты сравнения статического давления на стенке канала хуже совпадают с данными эксперимента, чем уточненная гибридная сетка №2.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований грант №17-08-00148.

Библиографический список

1. Ермишин А.В., Исаев С.А. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование). - М.: МГУ, 2003. - 360 с.
2. Ларина Е.В., Крюков И.А., Иванов И.Э. Моделирование осесимметричных струйных течений с использованием дифференциальных моделей турбулентной вязкости // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75565>

3. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2-х томах. - М.: Мир, 1991. Т.1. - 504 с.
4. Щукин А.В., Хабибуллин И.И., Ильинков А.В., Такмовцев В.В. Влияние формы диффузорной выемки на характер ее обтекания // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84395>
5. Roache P.J. Computational Fluid Dynamics, Hermosa, Albuquerque: N.M., 1976, 616 p.
6. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. LAP LAMBERT Academic Publishing, Саарбрюкен, 2013. - 316 с.
7. Kalinin E.I., Mazo A.B., Isaev S.A. Composite mesh generator for CFD problems // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2016, no. 158, 012047, doi:10.1088/1757-899X/158/1/012047.
8. Баранов П.А., Гувернюк С.В., Зубин М.А., Исаев С.А. Численное и физическое моделирование циркуляционного течения в вихревой ячейке на стенке плоскопараллельного канала // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2000. № 5. С. 44 – 56.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1987.- 736 с.
10. Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 152 p.
11. Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. - 253 с.

12. Baranov P.A., Guvernuyuk S.V., Zubin M.A., Isaev S.A., & Usachov A.E. Application various models of turbulence for calculation of incompressible internal flows // TsAGI Science Journal, 2017, vol. 48, no. 1, pp. 1 – 13.
13. Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // AIAA. Paper 92-0439, 30 Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 1992.
14. T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu. A New k- ϵ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation // Computers Fluids, 1995, vol. 24, no.3, pp. 227 - 238.
15. Menter F.R. Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper, 1993, N93-2906, pp. 21.
16. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4. Ed. K.Hajalic, Y.Nogano, M.Tummers, Begell House, Inc. 2003, pp. 625 - 632.
17. Menter F.R., Langtry R.B., Likki S.R., Suzen Y.B., Huang P.G., and Volker S. Correlation Based Transition Model Using Local Variables. Part 1 - Model Formulation. (ASME-GT2004-53452), 2004, pp. 413 - 422.
18. Daly B.J., Harlow F.H. Transport Equations in Turbulence // Physics of Fluids, 1970, no. 13, pp. 2634 - 2649.
19. Gibson M.M., Launder B.E., Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer // Journal of Fluid Mechanics, 1978, no. 86, pp. 491 - 511.
20. Launder B.E. Second-Moment Closure: Present and Future? // International Journal of Heat and Fluid Flow, 1989, vol. 10, no. 4, pp. 282 - 300.

21. Launder B.E., Reece G.J., Rodi W. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure // Journal of Fluid Mechanics, April 1975, vol. 68, no. 3, pp.537 - 566.