

Д.А. Редчиц, Т.П. Белоусова, И.В. Выгоднер,

Т.П. Ляхович, С.В. Моисеенко

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПРЕПРОЦЕССОР ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ

Аннотация. На базе многоблочных пересекающихся структурированных сеток разработан автоматизированный препроцессор для решения задач вычислительной гидродинамики. Многоблочные вычислительные технологии позволяют проводить численное моделирование стационарных и нестационарных, ламинарных и турбулентных течений несжимаемой жидкости вокруг подвижных и неподвижных тел сложной геометрии. Разработанный алгоритм обладает возможностью легкого распараллеливания на многоядерных системах.

Ключевые слова: препроцессор, вычислительная аэrodинамика, структурированные сетки.

Введение

Современный этап развития вычислительной аэродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) характеризуется разработкой коммерческих программных продуктов, реализованных в виде пакетов прикладных программ. Модельное и методологическое наполнение программ непрерывно улучшается. Развитие вычислительной аэродинамики сохраняет высокие темпы благодаря непрерывному совершенствованию элементной базы вычислительной техники, расширению парка доступных для аэродинамиков-вычислителей высокопроизводительных компьютеров.

Методы создания дискретного пространства

Основная задача препроцессора – создание вблизи обтекаемого тела дискретного пространства, логически взаимосвязанного с используемым численным алгоритмом. Создание многоблочного дискретного пространства включает в себя решение следующих задач: интерполяцию обтекаемой поверхности, задание (односвязной или многосвязной) расчетной области, разбиение расчетной области на по-

домасти, построение расчетных сеток в каждой подобласти, определение параметров контрольных объемов для каждой расчетной сетки, установление топологической взаимосвязи между подобластями, определение процедур пересчета геометрических параметров подобластей и взаимосвязей между ними при движении отдельных блоков, размещение искомых гидродинамических величин в каждой подобласти, включая ячейки (контрольные объемы), необходимые для задания граничных условий на внешних границах расчетной области, выбор (разработку) алгоритмов расчета (интерполяции) искомых величин на внутренних границах между подобластями.

Широкое применение получили три основных типа расчетных сеток: неструктурированные, многоблочные структурированные и многоблочные пересекающиеся структурированные (типа Chimera).

Каждая из этих сеток обладает своими преимуществами и недостатками. Так, основное преимущество неструктурированной сетки – это возможность ее генерации вокруг тел произвольной формы включая многосвязные области, а также адаптация к областям больших градиентов. К недостаткам можно отнести сложный численный алгоритм реализации солвера, а также его низкую разрешающую способность в вязких слоях. К тому же требования, предъявляемые к объему оперативной памяти при использовании данного вида сетки, в несколько раз выше, чем для структурированных.

Основное преимущество структурированной сетки без пересечений – возможность создания на их основе простого алгоритма для солвера, а также высокая разрешающая способность в погранслоях. Главным недостатком является жесткая связанность количества узлов соседних блоков по смежным направлениям.

Многоблочные пересекающиеся (с нахлестом) структурированные сетки, известные также как Chimera, возникли в начале 80-х [1, 2] и получили широкое распространение в 90-х годах прошлого века. Она объединяет в себе преимущества неструктурированной и структурированной многоблочной сетки и, к тому же, лишена главного недостатка структурированной многоблочной сетки – равного количества узлов соседних блоков по смежным направлениям. Отдельной проблемой стоит движение сеток относительно друг друга при решении задач динамики элементов профиля. Для многоблочной пересекаю-

щейся структурированной сетки возможность движения блоков заложена изначально.

Стратегия данного подхода заключается в разбиении сложной вычислительной области на более мелкие, которые можно представить относительно простыми расчетными сетками. Основной задачей является обеспечение передачи структуры данных между вычислительными сетками. Каждая сетка вычислительной области входит в препроцессор для определения взаимосвязи между сетками и расчета интерполяционных данных.

Интерполяционные данные, которые передаются в вычислительное ядро, включают в себя список интерполяционных точек, интерполяционные коэффициенты, донорные ячейки для каждой интерполируемой точки. В интерполяционные данные также включается (входит или должен входить) список точек, которые изымаются из вычислительной области, если те попадают во внутрь твердого тела.

На сегодняшний день наиболее универсальным является препроцессор PEGASUS [3], который разрабатывается в NASA в течении трех десятилетий. Существуют и другие препроцессоры (DCF3D [4], Beggar [5], FASTRAN [6], Overture [7]) для многоблочных пересекающихся структурированных сеток, которые обладают различным уровнем автоматизации. Каждый из этих препроцессоров выдает список интерполяционных данных, которые необходимы для вычислительного ядра. Так, автоматизированный препроцессор PEGASUS успешно применяется со следующими CFD-кодами: OVERflow, NXAIR, INS3D.

Обзор Chimera подхода

Идея, лежащая в основе многоблочных пересекающихся структурированных сеток, представлена на рис. 1, где показано две независимо сгенерированные сетки вокруг двух твердых тел. Сетка В, вокруг меньшего тела 2, «вложена» в сетку А, вокруг большего тела 1. Внешняя граница сетки, вокруг меньшего тела 2, получает информацию о поле течения путем интерполяции от соответствующих ячеек сетки (интерполяционный шаблон) вокруг большего тела 1. В тоже время должен происходить и обратный процесс обмена информацией. Так, сетка А должна получать информацию о поле течения от сетки В. Для сетки А необходимо определить искусственную границу, так как некоторые точки этой сетки попадают внутрь меньшего тела 2, и

таким образом лежат вне области поля течения. Все точки искусственной границы сетки А, которые попали внутрь сетки В, могут получать информацию о поле течения путем интерполяции от ячеек сетки В. В общем случае, любая сетка может обмениваться данными с другой через внешнюю границу области и точки искусственной границы.

Процесс интерполяции показан на рис. 2, где рассмотрена часть области пересечения между двумя сетками. Точки расчетной сетки А, которые лежат внутри тела, изымаются из расчетной области. В Chimera технологии эти точки называются удаленными точками. Точки сетки А вокруг удаленных называются краевыми точками. Они получают информацию о поле течения путем интерполяции от ячеек сетки В. Краевые точки обозначены квадратными символами (рис. 2) Соответственно, точки на внешней границе сетки В получают информацию о поле течения от ячеек сетки А. Эти точки обозначены кружками (рис. 2).

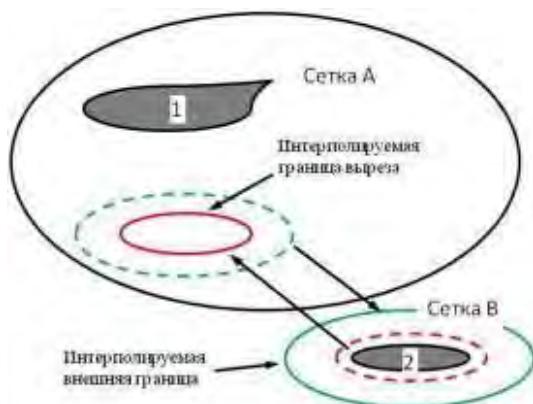


Рисунок 1 – Концепция
пересекающихся сеток

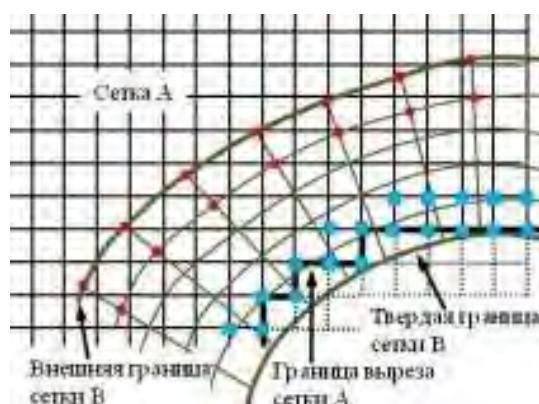


Рисунок 2 – Область
пересечения [3]

Автоматизированный препроцессор

На основании анализа преимуществ и недостатков различных типов сеток в настоящей работе был сделан выбор в пользу структурированных пересекающиеся многоблочных сеток.

Работа автоматизированного препроцессора состоит из 4 основных элементов: генерация пересекающихся сеток (I) (рис. 3), согласование расчетных областей (II) (рис. 4), оптимизация многоблочной сетки (III) (рис. 5) и движение отдельных блоков (IV) (рис. 6).

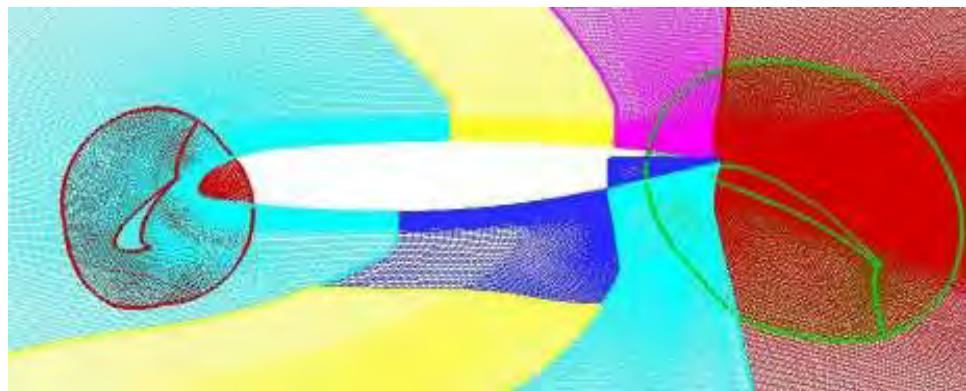


Рисунок 3 – Генерация пересекающихся сеток

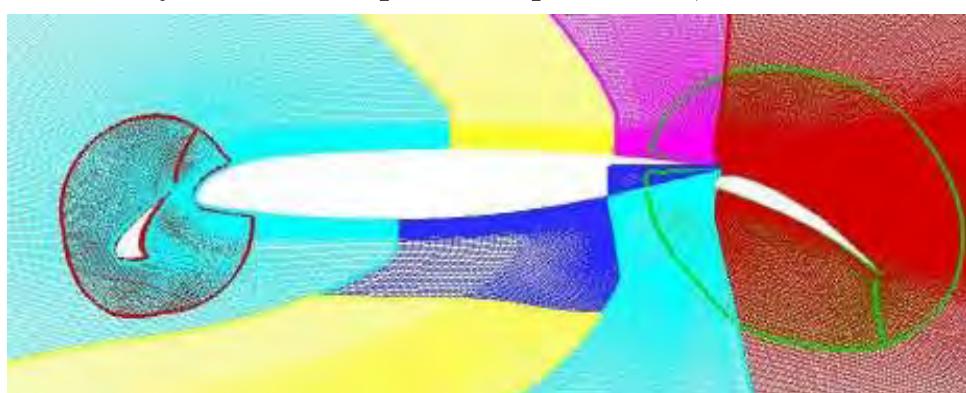


Рисунок 4 – Согласование расчетных областей



Рисунок 5 – Оптимизация многоблочной сетки

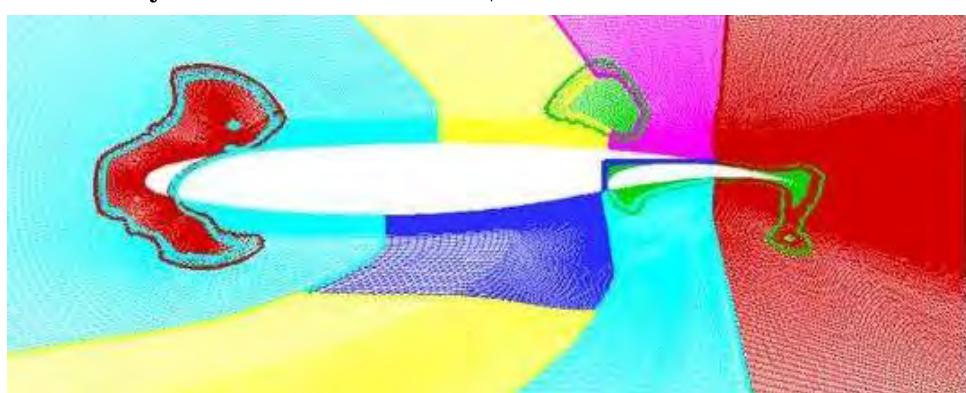


Рисунок 6 – Движение отдельных блоков

I. Генерация пересекающихся сеток. Расчетные сетки типа О, Н и С строятся вокруг обтекаемого тела методом многих поверхностей или могут быть импортированы из любого генератора структурированных сеток.

II. Согласование расчетных областей. Для получения интерполяционных данных, требуемых для вычислительного ядра (сolvера), автоматизированному препроцессору необходимо выполнить три основных операции.

Шаг 1. Вырез отверстий в сетках. Узлы расчетных сеток, попавшие внутрь тела, изымаются из вычислительной области. Для определения краевых точек и точек внешней границы необходимо иметь два слоя интерполяционных точек. Количество слоев интерполяционных точек называется периферийным уровнем. Например, на рис. 2 приведено два периферийных уровня. Двойной периферийный уровень обладает определенными преимуществами для вычислительного ядра и обеспечивает более высокую точность решения.

Шаг 2. Идентификация интерполяционных точек. Различают два типа интерполяционных точек: краевые точки, соседние с удаленными, и точки внешней границы (рис. 2). Нахождение краевых точек не представляет особых сложностей, так как они являются соседними с удаленными точками. Точки внешней границы – это точки, которые лежат на границе вычислительной сетки и для которых не ставятся граничные условия солвера.

Процесс оптимизации многоблочных пересекающихся структурированных сеток в автоматизированном препроцессоре начинается с идентификации точек, которые попали внутрь обтекаемого тела и точек внешней границы. При оптимизации области пересечения большое количество внутренних точек могут быть идентифицированы как интерполяционные граничные точки. Таким образом, процесс интерполяции в препроцессоре начинается с поиска всех возможных донорных ячеек расчетных сеток для каждой точки сетки. Данный процесс распадается на подпроцессы, в каждом из которых участвует пара сеток, одна – как донорная, другая – как принимающая. Заметим, что для любых двух сеток А и В возникает два подпроцесса: первый с сеткой А в качестве донорной и В как принимающей; и второй, когда В – донорная, а сетка А – принимающая. Таким образом, возникает $N(N-1)$ возможных пар донорно-принимающих сеток, где N

– число вычислительных сеток. Число пар сеток растет пропорционально N^2 , поэтому для увеличения вычислительной эффективности интерполяционного процесса в автоматизированном препроцессоре реализован следующий алгоритм поиска.

Интерполяционный подпроцесс для пары сеток начинается с определения возможного пересечения двух сеток. Для этого вокруг каждой сетки строится прямоугольник таким образом, чтобы все узлы расчетной сетки находились внутри данной области. Если прямоугольники, описанные вокруг двух различных сеток, не пересекаются, значит и узлы расчетных сеток не участвуют в интерполяции. Если прямоугольники пересекаются, то выполняется следующий цикл подпроцесса для каждого узла принимающей сетки. Внутри этого цикла проверяется, находится ли узел данной сетки внутри прямоугольника донорной сетки, и в заключение выполняется поиск ячейки донорной сетки, необходимой для интерполяции. После того как для каждого узла принимающей сетки найдена донорная ячейка, происходит расчет интерполяционных коэффициентов.

Шаг 3. Определение донорных ячеек, которые используются для расчета значений параметров поля течения в краевых и граничных точках области, найденных в шаге 2. Если для интерполируемой точки не найдена подходящая донорная ячейка, то такая точка называется изолированной.

Для выполнения первых двух шагов необходима полная информация по граничным условиям для каждой сетки. В качестве входных параметров автоматизированный препроцессор использует дискретную геометрию обтекаемого тела, расчетные сетки, а также граничные условия.

III. Оптимизация многоблочной сетки. Заключительным шагом в получении качественного решения для пересекающихся областей должна быть оптимизация многоблочных структурированных сеток. В областях пересечений отдельных блоков остаются лишь ячейки с минимальной площадью.

Разработанный в автоматизированном препроцессоре алгоритм оптимизации пересекающихся областей обладает высокой надежностью и не требует человеческого участия. Эта процедура выполняется после автоматического выреза отверстий в сетках, и когда становятся известны все донорные/принимающие узлы расчетных сеток. Метод

оптимизации пересекающихся областей основан на том, что узлы подробной сетки остаются как часть вычислительной области, в то время как для узлов грубой сетки применяется интерполяция с узлов подробной сетки.

В качестве примера рассмотрим оптимизацию зоны пересечения двух одномерных сеток А и В. Сгущение узлов сетки А выполнено к левому краю, а сетки В – к правому.

Первым шагом является интерполяция всех точек сетки А на сетку В и наоборот (рис. 7 а). Затем в области пересечения двух сеток выделяются ячейки с наибольшей площадью (рис. 7 б). Стрелками показано направление передачи данных параметров течения от ячеек с меньшей площадью к ячейкам с наибольшей. Направление стрелки указывает на интерполируемый узел, а ее конец на донорную ячейку.

На третьем шаге происходит проверка, являются ли интерполируемые узлы, идентифицированные на первом шаге, частью донорных ячеек. Если являются, то данный узел изымается из списка интерполируемых узлов. Результат данного процесса для сеток А и В показан на рис. 7 в.

Для завершения процесса оптимизации пересекающихся сеток необходимо определить какая из донорных ячеек (в случае сложного пересечения – трех и более сеток) будет передавать информацию на интерполируемый узел. Критерием выбора служит минимальная площадь ячейки. Используя данную процедуру, определяем интерполируемые узлы и узлы поля течения (рис. 7 г).

IV. Движение отдельных блоков. При решении задачи с подвижными поверхностями происходит смещение отдельных блоков сетки, а затем выполняется шаг 2 и шаг 3 работы препроцессора. В качестве примера рассмотрена задача о раскрытии многоэлементного профиля.

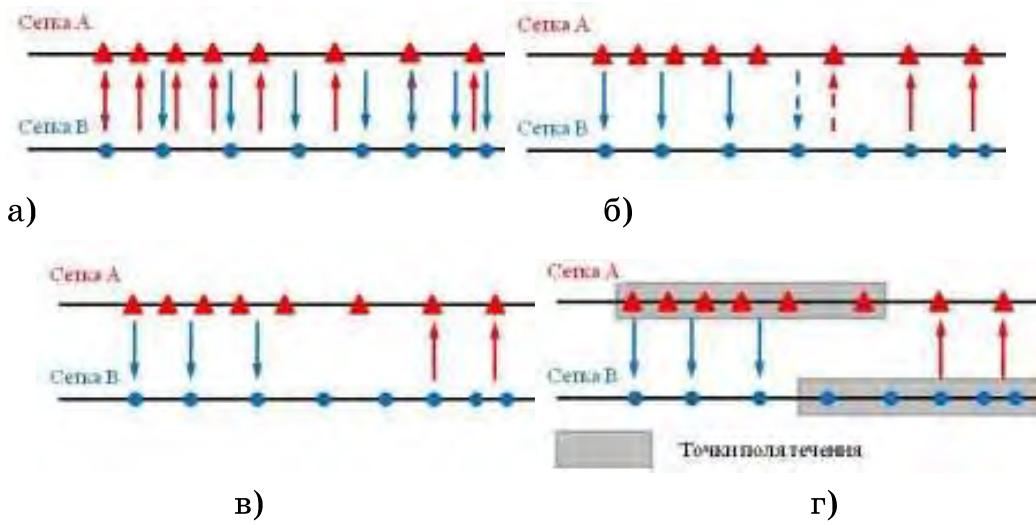


Рисунок 7 – Оптимизация многоблочных структурированных сеток [3]:

- интерполяция всех точек сеток А и В;
- выделение ячеек с наибольшей площадью;
- удаление интерполируемых точек, которые являются частью дополнительных ячеек;
- выделение узлов поля течения

Результаты вычислительных экспериментов

Представлены результаты вычислительных экспериментов по генерации многоблочных пересекающихся структурированных сеток вокруг трехэлементного профиля (рис. 5), J-профиля (рис. 8), а также вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Савониуса и Дарье (рис. 9).

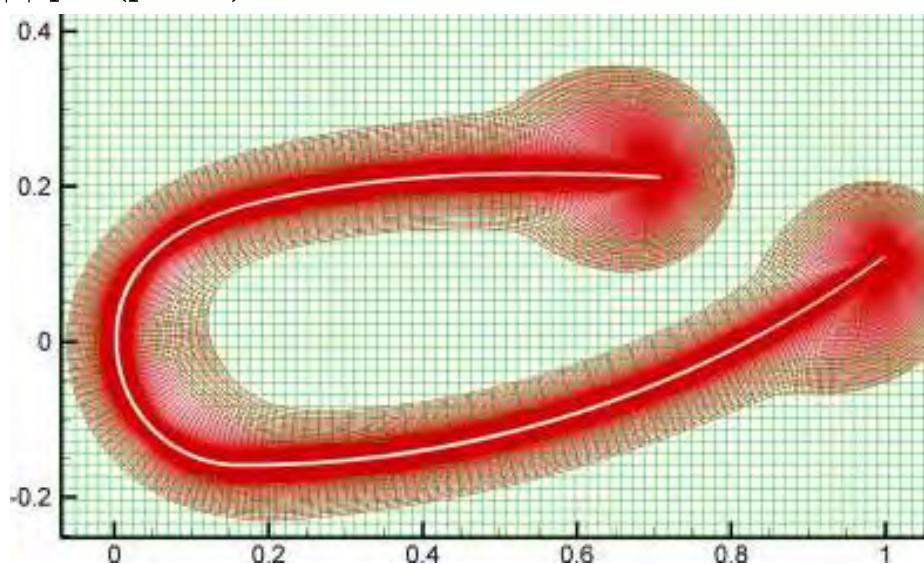


Рисунок 8 – Многоблочная пересекающаяся структурированная сетка вокруг J-профиля

Примеры двух пересекающихся сеток и результат оптимизации области пересечения вокруг предкрылка и закрылка трехэлементного

профиля 30Р30N, а также вблизи J-профиля и лопасти ротора Дарье приведены на рис. 5, 8, 9 в, соответственно. Как видно, область пересечения находится вдали от области существенного сгущения узлов в районе пограничных слоев.

Результат оптимизации области пересечения для случая трех сеток представлен на рис. 9 б. В этом случае оптимизация в «ручном» режиме будет чрезвычайно сложной и практически невозможной в трехмерном случае.

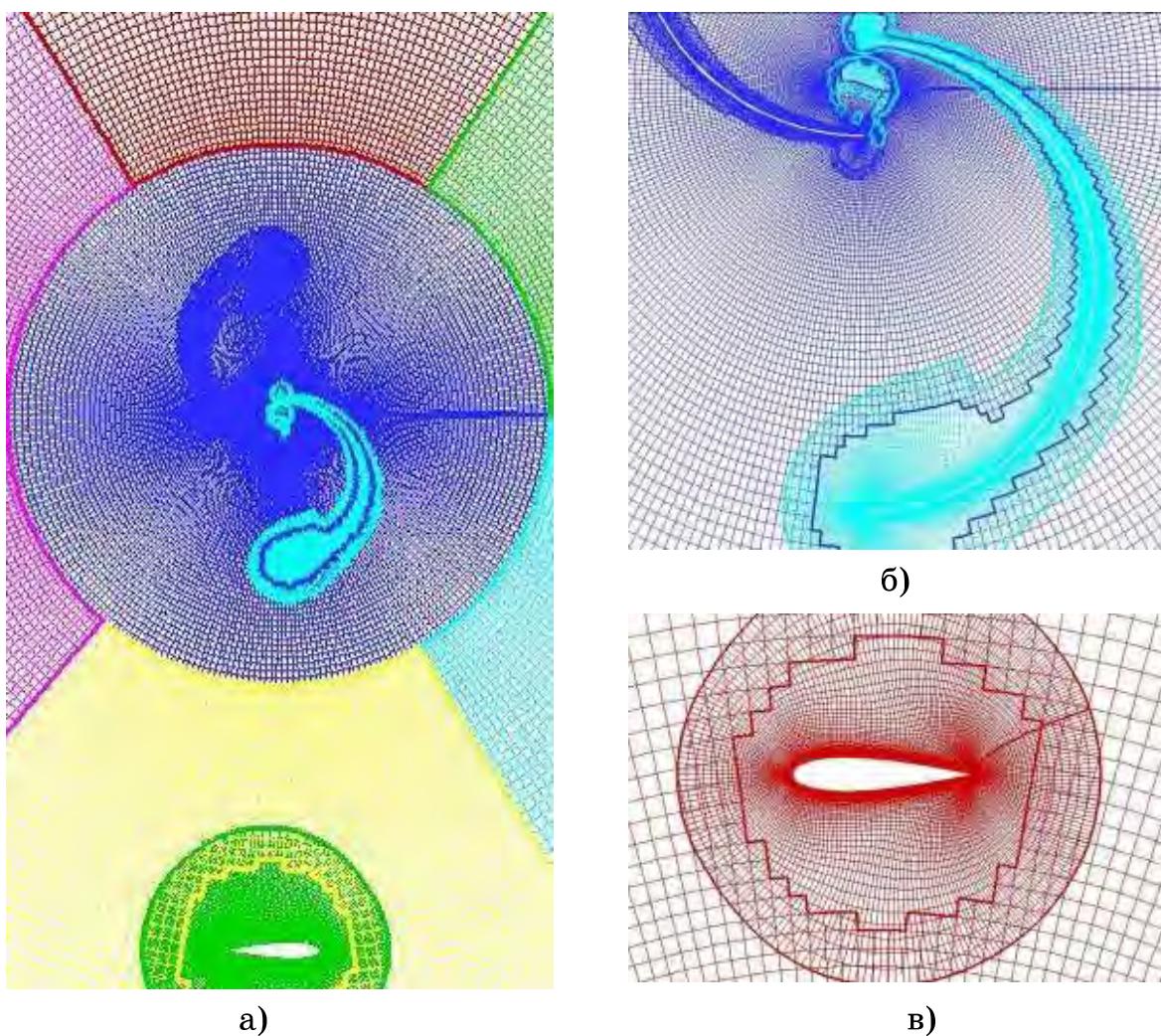


Рисунок 9 – Многоблочная пересекающаяся структурированная сетка вокруг вертикально-осевой ветроэнергетической установки

На базе сгенерированных многоблочных пересекающихся структурированных сеток проведено численное моделирование турбулентного обтекания вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Савониуса и Дарье (рис. 10 а), а также трехэлементного профиля 30Р30N во взлетно-посадочной конфигурации (рис. 10 б).

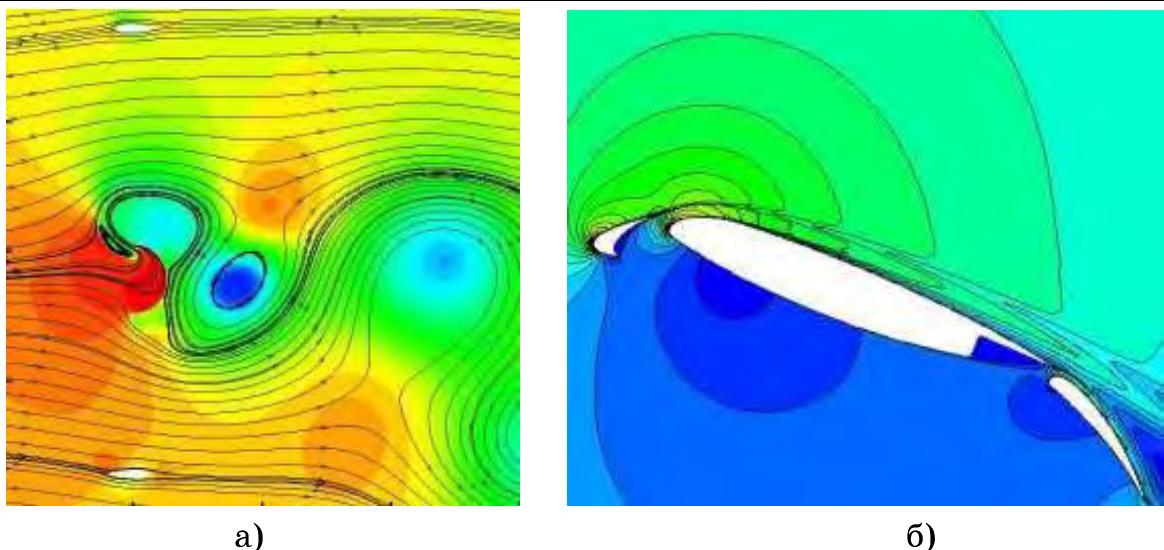


Рисунок 10 – Тройлентное обтекание ротора вертикально-осевой ветроэнергетической установки (а) и трехэлементного профиля (б)

Заключение

На базе многоблочных пересекающихся структурированных сеток разработан автоматизированный препроцессор для решения задач вычислительной гидродинамики. Многоблочные вычислительные технологии позволяют проводить численное моделирование стационарных и нестационарных, ламинарных и турбулентных течений несжимаемой жидкости вокруг подвижных и неподвижных тел сложной геометрии. Разработанный алгоритм обладает возможностью легкого распараллеливания на многоядерных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benek, J.A. A flexible grid embedding technique with application to the Euler equations [Text] / J.A. Benek, J.L. Steger, F.C. Dougherty // AIAA Paper 1983-1944.
2. Benek, J.A. A 3-D grid embedding technique [Text] / J.A. Benek, P.G. Buning, J.L. Steger// AIAA Paper 1985-1523.
3. Rogers, S.E. PEGASUS 5: An automated preprocessor for overset-grid computational fluid dynamics [Text] / S.E. Rogers, N.E. Suhs, W.E. Dietz// AIAA Journal. – 2003. – Vol. 41, № 6. – P.1037-1045.
4. Meakin, R. L. Object X-rays for cutting holes in composite overset structured grids [Text] / R.L. Meakin// AIAA Paper 2001-2537
5. Johnson, R.A. Multigrid approach to overset grid communication [Text] / R.A. Johnson, D.M. Belk // AIAA Journal. – 1995. – Vol. 33, № 12. – P. 2305-2308.
6. Wang, Z.J. A fully automated Chimera methodology for multiple moving body problems [Text] / Z. J. Wang // AIAA Paper 1998-217.
7. Brown, D.L. Overture – Object-oriented tools for overset grid applications [Text] / D. Brown, D. William // AIAA Paper 1999-3130.