

дами число арифметических операций составит  $O([N_{\theta}n(N_{\theta}+1)]^3) = O(106,48 \times 10^8)$ , то есть быстродействие от применения метода матричной прогонки возрастает более чем в 120 раз.

**Выводы.** Таким образом, построен эффективный алгоритм для расчета напряженного состояния в шинах при больших деформациях. На основании изложенного здесь алгоритма составлен пакет программ на алгоритмическом языке C++. Пакет разработан в интерактивном режиме и предусматривает ввод необходимых исходных данных для конкретных шин, включая их физические параметры и геометрические формы. Имеется возможность изменять параметры сетки и требуемую точность вычислений, включая число интервалов деления по времени. Конечная информация выдается в нескольких видах, в частности, позволяет вычислять распределение напряжений по толщине шины. Программа применяется для прочностного расчета нескольких разновидностей шин низкого давления и больших габаритных размеров. В частности, с помощью данного пакета программ выяснена причина волнообразного выпучивания боковых поверхностей шин и разработаны меры по устранению этого нежелательного явления.

### Бibliографические ссылки

1. Остапенко В. А. Математическая модель системы с переменной структурой для больших деформаций гибких оболочек / В. А. Остапенко // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: «Математика». – 2000. – Вип. 5. – С. 119–122.
2. Огибалов П. М. Оболочки и пластины / П. М. Огибалов. – М., 1969. – 695 с.
3. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. Том 1. – М., 1968. – 831 с.
4. Кваша Э. Н. Контактные задачи анизотропных слоистых оболочек / Э. Н. Кваша // Теоретические основы гражданского строительства. – Днепропетровск, 1994. – С. 195 – 199.
5. Ортега Дж. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений / Дж. Ортега, У. Пул. – М., 1986. – 288 с.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М., 1977. – 656 с.

*Надійшла до редколегії 13.12.2011.*

УДК 532.516

**Д. А. Редчиц**

*Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «ТРАНСМАГ»*

### РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРЕПРОЦЕССОРА ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

На базі багатоблокових пересічних структурованих сіток, що перетинаються, розроблено автоматизований препроцесор для розв'язання задач обчислювальної гідродинаміки. Багатоблокові обчислювальні технології дозволяють проводити чисельне моделювання стаціонарних і нестаціонарних, ламінарних і турбулентних течій нестисливої рідини навколо рухомих і нерухомих тіл складної геометрії. Розроблений алгоритм має можливість легкого розпаралелювання на багатоядерних системах.

**Ключові слова:** гідродинаміка, багато блокові обчислювальні технології, автоматизований препроцесор.



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:** гидродинамика, многоблочные вычислительные технологии, автоматизированный препроцессор.

Automated preprocessor for solving problems of computational fluid dynamics are developed on the basis of multi-block overset structured grids. Multi-block computational technologies allow spending the numerical simulation of steady and unsteady, laminar and turbulent incompressible flows around moving and stationary objects of complex geometry. The developed algorithm has the ability to easily parallel on multicore systems.

**Key words:** fluid dynamics, multi-block computational technologies, automated preprocessor.

**Введение.** Современные тенденции в проектировании сложной техники связаны с применением полных математических моделей механики жидкости и газа, основанных на общих физических законах (сохранение массы, импульса, энергии), реологических соотношениях, динамике турбулентных вихрей. Такие модели являются, с математической точки зрения, сложными системами нелинейных дифференциальных уравнений, для решения которых требуется использование мощных вычислительных комплексов. Для создания таких моделей используется практически весь аппарат высшей математики – аналитическая и дифференциальная геометрия, математический анализ, тензорное исчисление, теория уравнений математической физики. Решение этих систем создает качественно новый уровень проектирования – проведение численных экспериментов, полностью воспроизводящих условия натуральных экспериментов. Такой подход является основой сравнительно молодой науки – вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD).

На сегодняшний день вычислительная гидродинамика является одной из составляющих процесса проектирования во многих отраслях промышленности, что обусловлено меньшей стоимостью численных экспериментов по сравнению с натурными.

Основная задача CFD – воспроизведение реальных физических процессов с максимальной степенью достоверности. За счет этого удастся глубже понять происходящие процессы, выработать рекомендации по аэродинамическим формам проектируемого устройства близким к оптимальным.

Подобные расчеты позволяют получить подробные характеристики устройства задолго до его изготовления и внедрения, существенно сокращая затраты на дорогостоящие продувки в аэродинамических трубах, которые присутствуют при стандартных методах проектирования. Отдельной проблемой является компьютерная визуализация получаемого решения, необходимая не только для получения отдельных характеристик, но и для понимания общей картины течения.

**Пакеты прикладных программ вычислительной аэродинамики (CFD).** Развитие вычислительной гидродинамики и рост интереса к исследованию более сложных аэродинамических форм привели к совершенствованию и усложнению численных методов решения уравнений Навье-Стокса, а также ужесточению требований, предъявляемых к дискретизации расчетной области.

Современный этап развития вычислительной аэродинамики характеризуется разработкой коммерческих программных продуктов, реализованных в виде пакетов прикладных программ. Модельное и методологическое их наполнение



непрерывно улучшается. Развитие вычислительной гидродинамики сохраняет высокие темпы благодаря непрерывному совершенствованию элементной базы вычислительной техники, расширению парка доступных для аэродинамиков-вычислителей высокопроизводительных компьютеров.

Несмотря на наличие научно-прикладных (NASA, ONERA, DLR, NLR, OVERflow, NXAIR, INS3D) и коммерческих (ANSYS, CFD-Star, STAR-CD, FLUENT, FLOW-3D, SolidWorks, ACE-U, CFD++, CFX, FlowVision) пакетов по вычислительной гидродинамике, использование их для расчета процессов обтекания ротора ветроэнергетической установки, динамики многоэлементного профиля, а также задач плазменной аэродинамики представляется проблематичным. К тому же, некоторые из них требуют использования препроцессора для взаимосвязи между пересекающимися областями.

**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 подобласти;
- 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 искоемых гидродинамических величин в каждой подобласти, включая ячейки (контрольные объемы), необходимые для задания граничных условий на внешних границах расчетной области;
- выбор (разработку) алгоритмов расчета (интерполяции) искоемых величин на внутренних границах между подобластями.

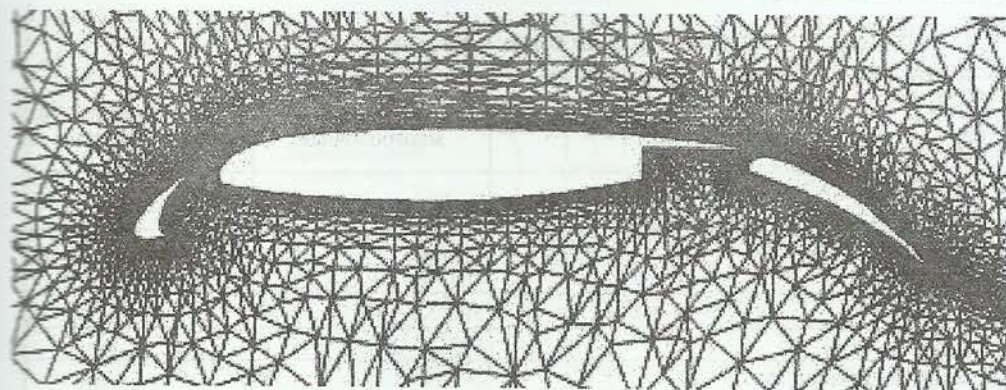
Широкое применение получили три основных типа расчетных сеток: неструктурированные, многоблочные структурированные и многоблочные пересекающиеся структурированные (типа Chimera) (рис. 1).

Каждая из этих сеток обладает своими преимуществами и недостатками (табл. 1). 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.

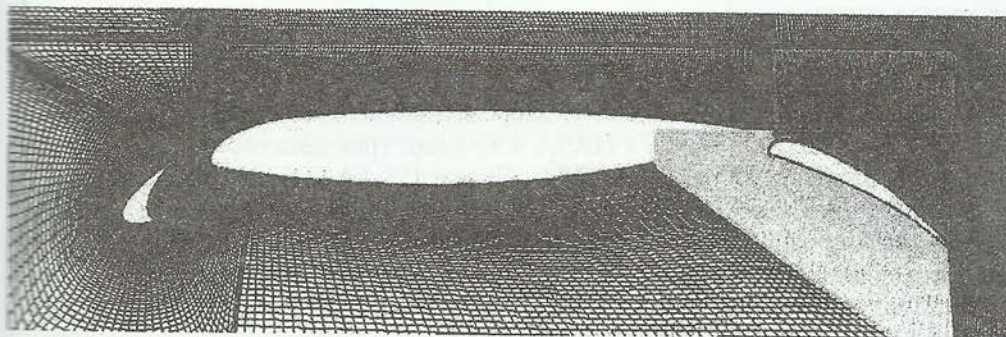
Основное преимущество структурированной сетки без пересечений – возможность создания на их основе простого алгоритма для солвера, а также высокая разрешающая способность в погранслоях. Главным недостатком является жесткая связанность количества узлов соседних блоков по смежным направлениям.

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. Они объединяют в себе преимущества неструктурированных и структурированных многоблочных сеток и, к тому же, лишены 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 пересекающейся структурированной сетки возможность движения блоков заложена изначально.

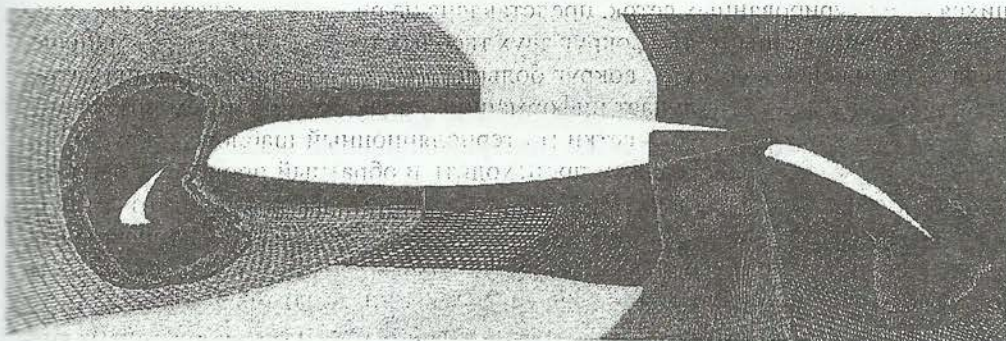




а)



б)



в)

Рис. 1. Методы построения дискретного пространства (сеток) вокруг тела:

а) неструктурированная одноблочная сетка [15]; б) структурированная многоблочная сетка; в) многоблочная пересекающаяся структурированная сетка (типа Chimera)

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.



Сравнительная характеристика сеток

	Неструктурированная	Структурированная многоблочная	Структурированная пересекающаяся
Генерация сетки для тел сложной геометрии	+	–	+ –
Движение сеток относительно друг друга	+ –	–	+
Адаптация сетки	+	–	+
Численный алгоритм	–	+	+
Разрешающая способность вязких слоев	–	+	+
Требования к памяти	–	+	+
Требования к процессору	–	+	+

На сегодняшний день наиболее универсальным является препроцессор PEGASUS [3], разрабатывающийся 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, необходимых 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. 2, 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 то же 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 её точки 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. 3, 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. Точки сетки А вокруг удаленных называются краевыми. Они получают информацию о поле течения путем интерполяции от ячеек сетки В. Краевые точки обозначены квадратными символами (рис. 3). Соответственно, точки на внешней границе сетки В получают информацию о поле течения от ячеек сетки А. Они обозначены кружками (рис. 3).

**Описание разработанного CFD пакета.** Автором разработан специализированный CFD пакет, состоящий из трех основных элементов: препроцессора, вычислительного ядра (солвера) и постпроцессора (рис. 4).

*Препроцессор* отвечает за формирование исходной геометрии, создание дискретного пространства и движение отдельных блоков расчетной сетки.

В *вычислительном ядре* происходит интегрирование уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости, расчет параметров турбулентности и выполнение



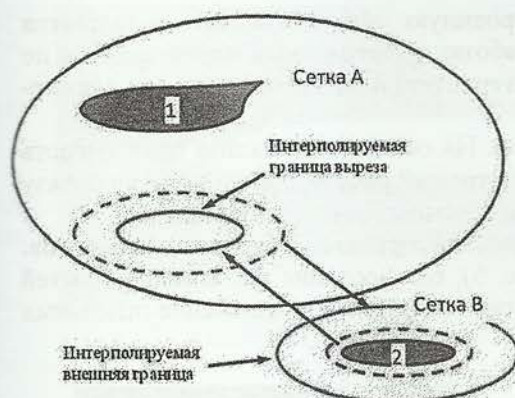


Рис. 2. Общая концепция пересекающихся сеток

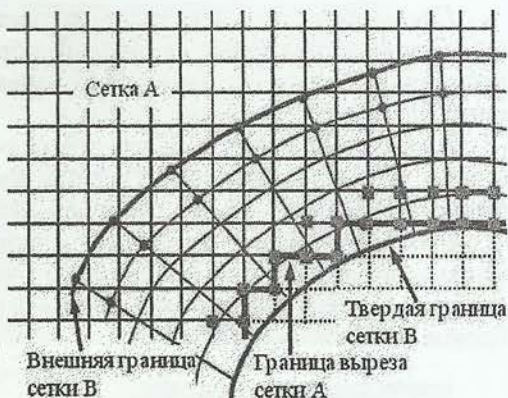


Рис. 3. Детальный вид области пересечения [3]

граничных условий. Численный алгоритм базируется на основе уравнений Навье-Стокса, включая несколько дифференциальных моделей турбулентности (SA [8], SARC [9], SALSA [10]) для расчета стационарных и нестационарных ламинарных и турбулентных течений. Согласование полей давления и скорости осуществлялось с помощью метода искусственной сжимаемости, модифицированного для расчета нестационарных задач [11].



Рис. 4. Схема комплекса программ

Система исходных уравнений интегрировалась численно с использованием метода контрольного объема. Для конвективных потоков использовалась противопоточная аппроксимация Rogers-Kwak, основанная на схеме Roe третьего порядка точности [12]. В моделях турбулентности для аппроксимации конвективных слагаемых применялась схема TVD с ограничителем потоков ISNAS третьего порядка [13]. Производные в вязких членах аппроксимировались центрально-разностной схемой второго порядка.

Алгоритм решения уравнений базируется на трехслойной неявной схеме с подитерациями по псевдовремени второго порядка точности по физическому времени. Полученная блочно-матричная система линейных алгебраических уравнений решалась методом минимизации обобщенной невязки GMRES с ILU(0) предобуславливанием.



**Постпроцессор** відповідає за вбудовану візуалізацію результатів (скалярні та векторні величини), обробку інтегральних характеристик по часу (рахунок аеродинамічних характеристик) та підготовку даних для зовнішніх візуалізаторів.

**Автоматизований препроцессор.** На основі аналізу переваг та недоліків різних типів сіток в поточній роботі зроблено вибір на користь структурованих перетинаючихся багаторебричних сіток.

Робота автоматизованого препроцесора складається з 4 основних елементів: генерація перетинаючихся сіток (I) (рис. 5), узгодження розрахункових областей (II) (рис. 6), оптимізація багаторебричної сітки (III) (рис. 7) та рух окремих блоків (IV) (рис. 8).

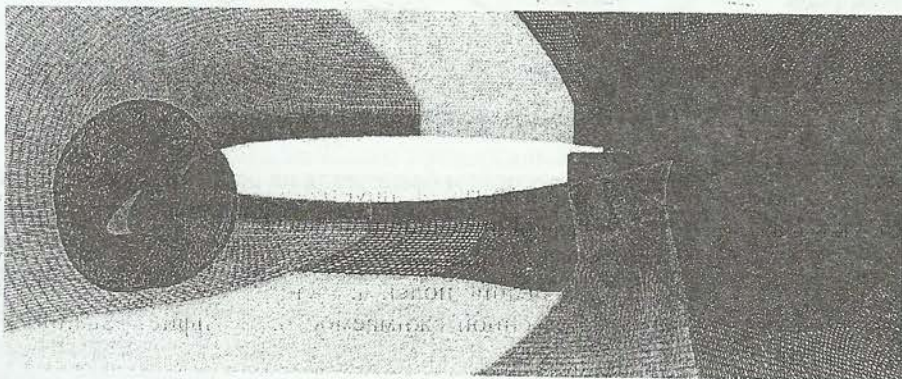


Рис. 5. Генерація перетинаючихся сіток

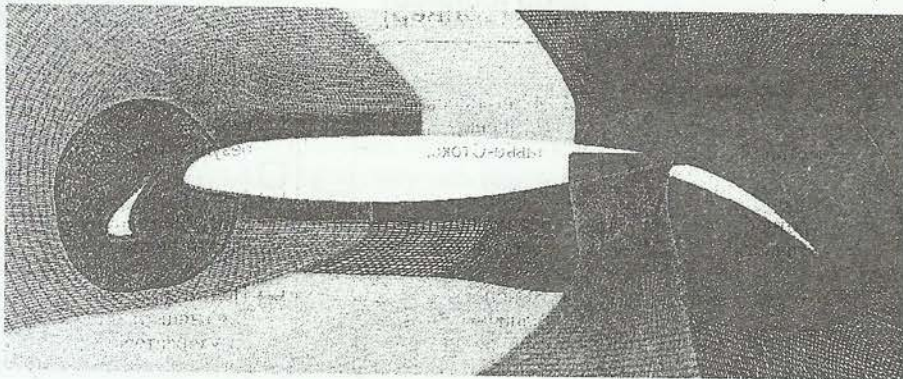


Рис. 6. Узгодження розрахункових областей

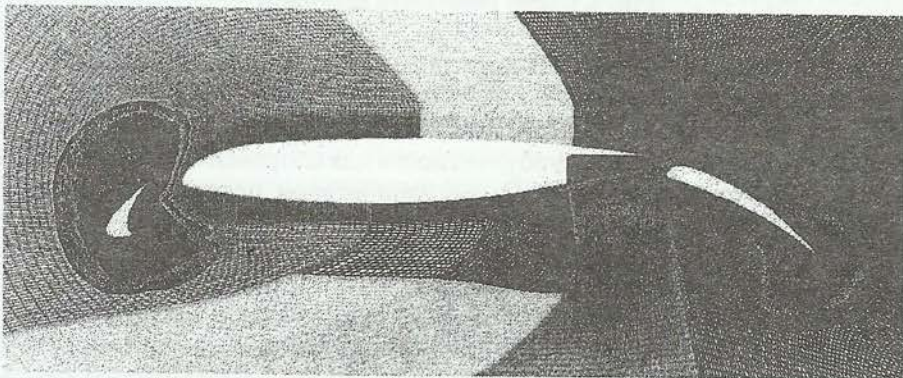


Рис. 7. Оптимізація багаторебричної сітки



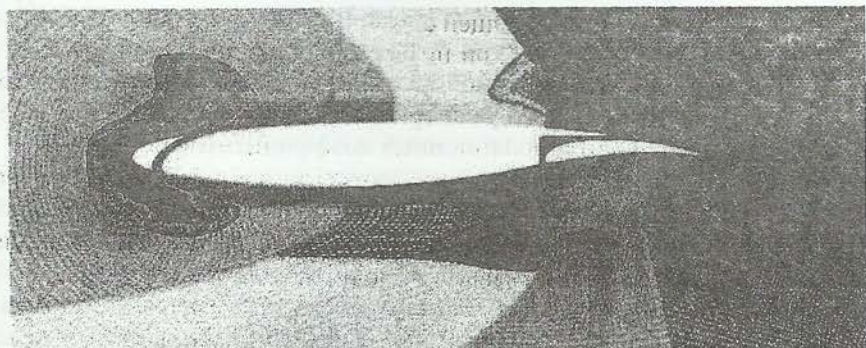


Рис. 8. Движение отдельных блоков

**Генерация пересекающихся сеток.** Расчетные сетки типа О, Н и С строятся вокруг обтекаемого тела методом многих поверхностей [14] или могут быть импортированы из любого генератора структурированных сеток.

**Согласование расчетных областей.** Для получения интерполяционных данных, требуемых для вычислительного ядра (солвера), 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. 3 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. 4). Нахождение краевых точек не представляет особых сложностей, так как они являются соседними с удаленными точками. Точки внешней границы – это точки, лежащие 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, попавших 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 под-



процесса 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.

**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. 9 а). Затем в области пересечения двух сеток выделяются ячейки с большей площадью (рис. 9 б). Стрелками показано направление передачи данных параметров течения от ячеек с меньшей площадью к ячейкам с большей. Направление стрелки указывает на интерполируемый узел, а ее конец – на донорную ячейку.

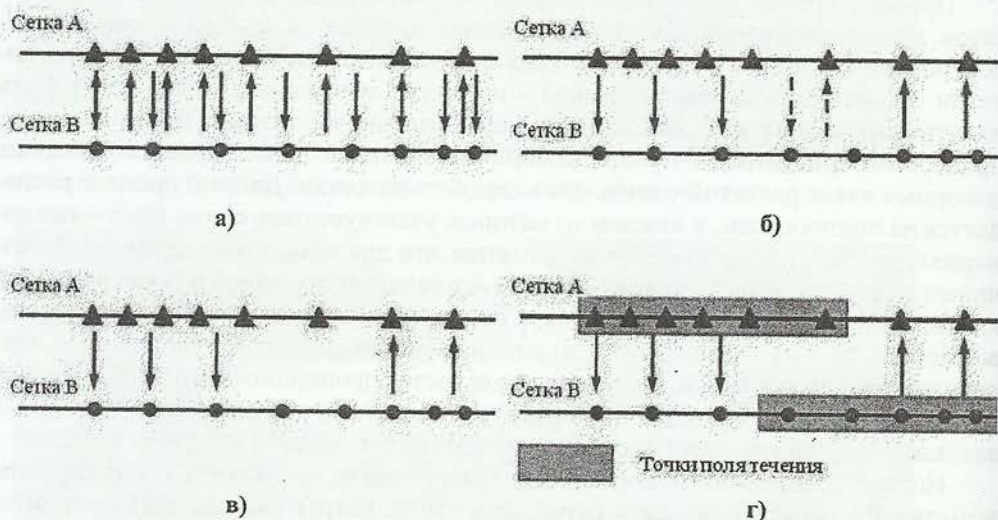


Рис. 9. Оптимизация многоблочных структурированных сеток [3]:

- а) интерполяция всех точек сеток А и В; б) выделение ячеек с большей площадью;
- в) удаление интерполируемых точек, которые являются частью донорных ячеек;
- г) выделение узлов поля течения



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. 9 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. 9 г).

**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.

**Результаты вычислительных экспериментов.** Представлены результаты двух вычислительных экспериментов по генерации многоблочных пересекающихся структурированных сеток вокруг трехэлементного профиля 30P30N (рис. 7), а также вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Савониуса и Дарье (рис. 10).

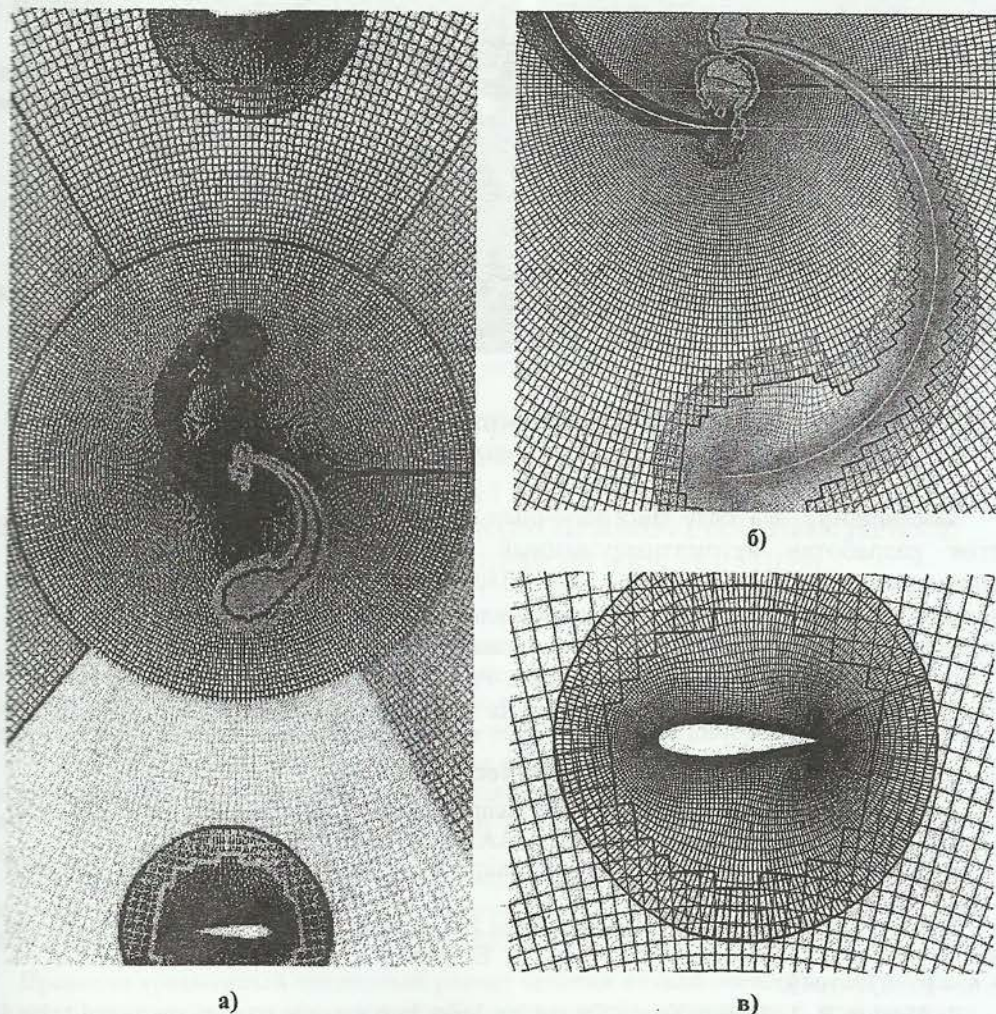


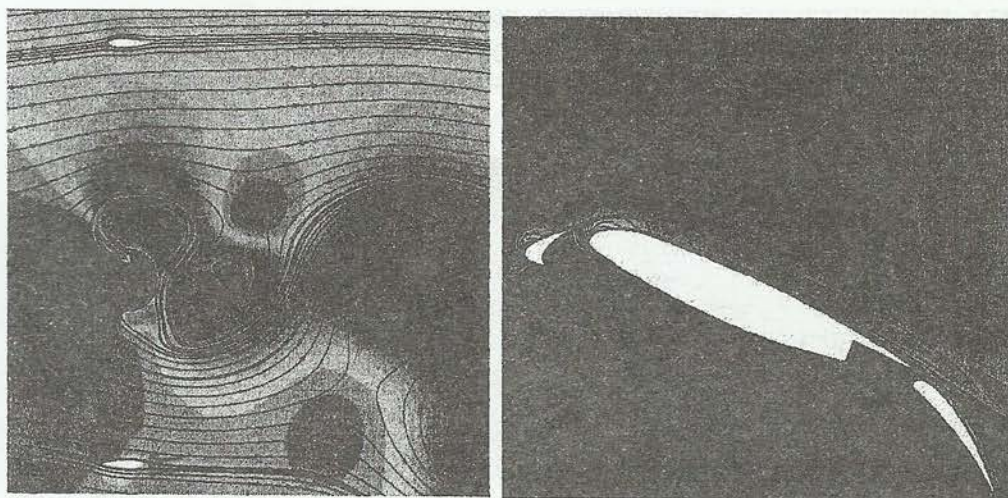
Рис 10. Многоблочная пересекающаяся структурированная сетка вокруг вертикально-осевой ветроэнергетической установки (а), а также вблизи лопасти роторов Савониуса (б) и Дарье (в)



Примеры двух пересекающихся сеток и результат оптимизации области пересечения вокруг предкрылка и закрылка трехэлементного профиля 30P30N приведен на рис. 7, а также вблизи лопастей ротора Дарье рис. 10 в. 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. 10 б. В этом случае оптимизация в «ручном» режиме будет чрезвычайно сложной и практически невозможной в трехмерном случае.

На базе сгенерированных многоблочных пересекающихся структурированных сеток проведено численное моделирование турбулентного обтекания вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Савониуса и Дарье (рис. 11 а), а также трехэлементного профиля 30P30N во взлетно-посадочной конфигурации (рис. 11 б).



а)

б)

Рис 11. Турбулентное 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.

#### Библиографические ссылки

1. Benek J. A. A flexible grid embedding technique with application to the Euler equations / J. A. Benek, J. L. Steger, F. C. Dougherty // AIAA Paper 1983-1944.
2. Benek J. A. A 3-D grid embedding technique / 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 / 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 / R. L. Meakin // AIAA Paper 2001-2537.
5. Johnson R.A. Multigrid approach to overset grid communication / 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 / Z. J. Wang // AIAA Paper 1998-217.
7. Brown D. L. Overture – Object-oriented tools for overset grid applications / D. L. Brown, D. William // AIAA Paper 1999-3130.
8. Spalart P. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow / P. R. Spalart, S. R. Allmaras // AIAA Paper 1992-0439.
9. Spalart P. R. On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature / P. R. Spalart, M. L. Shur // Aerospace Science and Technology. – 1997. – № 5. – P. 297–302.
10. Rung T. Restatement of the Spalart-Allmaras eddy-viscosity model in strain-adaptive formulation / T. Rung, U. Bunge, M. Schatz, F. Thiele // AIAA Journal. – 2003. – Vol. 4, № 7. – P. 1396–1399.
11. Rogers S. E. An upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations / S. E. Rogers, D. Kwak // AIAA Journal. – 1990. – Vol. 28, № 2. – P. 253–262.
12. Roe P. L. Approximate riemann schemes / P. L. Roe // Journal of Computational Physics. – 1981. – Vol. 43. – P. 357–372.
13. Zijlema M. On the construction of third-order accurate TVD scheme using Leonards normalized variable diagram with application to turbulent flows in general domains / M. Zijlema // Delft University of Technology: Technical Report DUT-TWI-94-104. – 1994. – 25 p.
14. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости / К. Флетчер. – М., 1991. – Т. 1. – 501 с. – Т. 2. – 552 с.
15. Bonhaus D. L. Numerical study to assess sulfur hexafluoride as a medium for testing multielement airfoils / D. L. Bonhaus, W. K. Anderson, D. J. Mavriplis // NASA Technical Paper 3496, 1995. – 31 p.

Надійшла до редколегії 12.12.2011

УДК 533.601:656.2

Е. В. Кравец

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

# ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ МЕЖТОРЦЕВОГО ПРОСТРАНСТВА НА СТРУКТУРУ ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОБТЕКАНИИ ВЯЗКИМ НЕСЖИМАЕМЫМ ПОТОКОМ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПРИЗМ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ТАНДЕМОМ НАД ЭКРАНОМ

Проведено тривимірний чисельний розрахунок течії нестисливої в'язкої рідини при обтіканні двох призм, що розташовані тандемом над екраном при наявності часткового перекриття міжторцевого простору. Система моделює рух повітря навколо вагонів з міжвагонними переходами поблизу поверхні землі при русі швидкісного потяга. Виконано аналіз структури течії та закономірностей вихороутворення в частково перекритому міжторцевому просторі призм. Визначено коефіцієнт аеродинамічного опору частково перекритого міжторцевого простору. Встановлено вплив часткового перекриття на структуру вихороутворення в міжторцевому просторі призм поблизу екрана.

Ключові слова: швидкісний потяг, обтікання двох призм тандемом поблизу екрана при наявності часткового перекриття, аеродинамічний опір міжторцевого простору з перекриттям, вплив часткового перекриття на структуру вихороутворення.

Проведен трехмерный численный расчет течения вязкой несжимаемой жидкости при обтекании двух призм, расположенных тандемом над экраном, при наличии частичного перекрытия межторцевого пространства. Система моделирует движение