

**Рис. 3.** Поля температур в плоскости симметрии модели при температуре в зоне резания  $T_r = 600\text{ °С}$

из внутренней полости стебля борштанги. Температура СОЖ на выходе при температурах в зоне резания  $600\text{--}800\text{ °С}$  удовлетворяет рекомендуемому диапазону, представленному в специализированной литературе. Результаты сравнения численного решения с аналитическими оценками и экспериментальными данными позволяет сделать вывод, что предложенная расчетная модель является адекватной и при соответствующей доработке, позволяющей учитывать геометрию инструмента, может быть использована при проектировании станков и составлении технологических карт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уткин Н.Ф. Обработка глубоких отверстий. Л.: Машиностроение, 1988.
2. [http://www.resurs-nafta.ru/index/php?option=com\\_sobi2&sobi2Task=sobi2Details&catid=i.25&sobi2Id=13&Itemid=2-17.06.2008](http://www.resurs-nafta.ru/index/php?option=com_sobi2&sobi2Task=sobi2Details&catid=i.25&sobi2Id=13&Itemid=2-17.06.2008).

## Технология параллельных вычислений теплогидравлики программы «САВАРЕТ»



## 27 Технология параллельных вычислений теплогидравлики программы «CABARET»

В статье кратко описана программа «CABARET» и приведены методики и технологии подготовки сеток, декомпозиции сеток, проведения расчетов и постпроцессинга на кластерной системе «Скиф». Методики могут быть использованы также для параллельных вычислений на CFD-пакетах, использующих методы установления.

### Введение

Важность некоторых теоретически вычисленных динамических характеристик технически сложных объектов подтверждается, например, последствиями недавних аварийных ситуаций при эксплуатации протяженных мостовых сооружений и гидротурбин большой мощности. Если частота турбулентного шума от воздействия потока воздуха или воды на конструкцию объекта совпадает с собственными частотами колебаний, то резонансные колебания приводят к опасным последствиям.

Экспериментально определить точные частотные характеристики потока иногда невозможно, поэтому используются теоретические методы. К таким методам можно отнести методы вычислительной гидродинамики, основанные на проведении вычислений на суперкомпьютерах.

Достоверность результатов, полученных численно, критическим образом зависит как от качества используемого численного метода, так и от подробности расчетных сеток.

В последнее десятилетие российскими математиками были разработаны высокоэффективные расчетные схемы, позволяющие существенно уменьшить так называемые «аппроксимационные» ошибки, что дает возможность рассчитывать развитые вихревые течения на относительно грубых расчетных сетках. Однако и при использовании таких высокоточных схем, к числу которых относится схема «CABARET», задачи, интересные для промышленности, требуют использования очень подробных сеток и, как следствие, — многопроцессорных вычислительных комплексов.

Проведение параллельных вычислений на современном программно-аппаратном уровне требует разработки новых методик подготовки исходных данных, проведения расчетов и обработки результатов расчетов. Для большого числа расчетных точек в математической модели, значительного количества процессоров кластерной системы и сложной программы расчета требуется создание набора уникальных методик, объединенных в технологию проведения вычислений. Такого рода технология представлена для программного комплекса «CABARET» для решения задач теплогидравлики при создании нового поколения энергетического оборудования.

Программный комплекс «CABARET» явного по времени решения уравнений газовой динамики разработан на основе двухшагового алгоритма [Goloviznin]. При создании алгоритмов программного комплекса учитывались основные тенденции в развитии как известных коммерческих кодов (Fluent, CFX), так и открытых программных комплексов (openFOAM).

### АВТОРЫ:

**А.М. Зайцев** – Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН;  
e-mail: azai@ibrae.ac.ru

## Описание программного комплекса «CABARET»

Эффективное распараллеливание алгоритмов решения задач динамики жидкости предполагает минимальное использование оперативной памяти на один элемент (ячейку) расчетной сетки и минимальное время обработки одного элемента за шаг по времени — параметра, важного для планирования максимально возможного числа ячеек в модели с возможностью оценки времени решения задачи на установление. Для сеток до 40 миллионов элементов потребная оперативная память составляет 1,2 гигабайта на миллион элементов. Время обработки одного элемента за шаг по времени зависит от эффективности алгоритма декомпозиции, загруженности кластерной системы и колеблется от 6 до 20 секунд на шаг по времени на миллион элементов. Число шагов до установления доходит до 100 000. Окончание расчета определяется по стабилизации средних значений определяющих параметров расчета. Решается нестационарная задача теплогидравлики методом установления. Основные характеристики расчета — коэффициенты сопротивления и спектральные характеристики интересующих величин. Часть расчетов может быть выполнена на половине или четверти расчетного объема с применением плоскости симметрии.

### Подготовка сеток и их декомпозиция для параллельных вычислений

Сетки могут быть созданы в любом из пакетов подготовки данных CFD. Отлаженная технология создания сеток включает в себя генерацию сеток в Gambit 2.4.6 с выводом данных в формате Fluent. Исходные данные для параллельных программных комплексов представляют собой некоторую базу данных со сложной иерархией записей. Данные в формате Fluent считываются специализированной программой, выполняя перенумерацию элементов, абсолютные номера которых используются в протоколе сетевого обмена между процессорами. Если перенумерация выполнена по координате или инварианту координат, то в последующем декомпозиция может быть выполнена на разном количестве процессоров без снижения вычислительной эффективности как по памяти, так и по времени быстройдействия. В случае использования алгоритмов типа «metis» перед декомпозицией необходимо подготовить списки абсолютных номеров элементов для каждого процессора. Формат исходных данных после декомпозиции основан на записи координат узлов и специальной системе записи номеров элементов с указанием относительного номера узла в элементе, что позволяет

компактно в бесформатном виде готовить исходную информацию. Номера групп граничных условий и условий периодичности дополняют узловую информацию. Размер файла зависит от числа элементов и составляет около полугигабайта на миллион элементов. Считывание исходной информации осуществляется одним процессором с трансляцией на все процессоры данных по узлам. Считывание двухуровневое, сначала каждый процессор определяет размеры необходимых

массивов, затем их наполняет уже с локальными номерами ячеек, граней и узлов. На рис. 1, 2 представлены сечение сетки тепловыделяющей сборки и разбиение сетки по алгоритму metis.

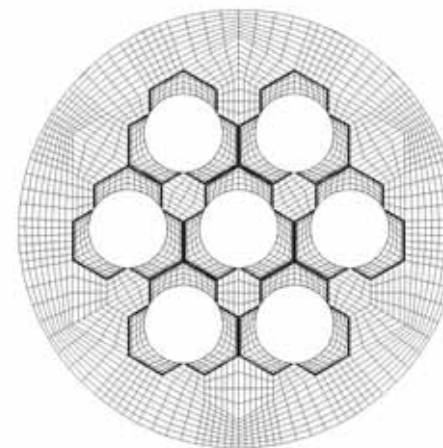


Рис. 1. Сечение сетки тепловыделяющей сборки



Рис. 2. Сетка фрагмента тепловыделяющей сборки со спейсером (светлые линии – области декомпозиции по алгоритму metis)

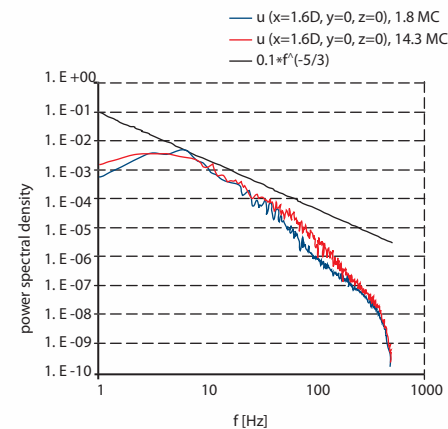
### Шаблоны по времени и пространству

Достоверность результатов CFD-расчетов интенсивно изучалась в последнее десятилетие. К известным их недостаткам следует отнести неполную консервативность, что сказывается на нефизичном коэффициенте гидравлического сопротивления, отсутствии нестационарных пульсационных течений и др. Преимущества «CABARET», использующего полностью консервативные конечно-разностные шаблоны с низкой вычислительной вязкостью, в высоком разрешении решений зарождения и пространственной эволюции вихревых структур на относительно разреженной сетке, отсутствии необходимости детально разрешать решения в пограничных слоях. Принятая концепция ILES (Implicit Large Eddy Simulation) предполагает (что подтверждается и сравнением численных и натуральных экспериментов) возникновение каска-



**Рис. 3.** Изообласти температуры при турбулентном смешении двух жидкостей в тройнике (красный цвет – более горячая жидкость)

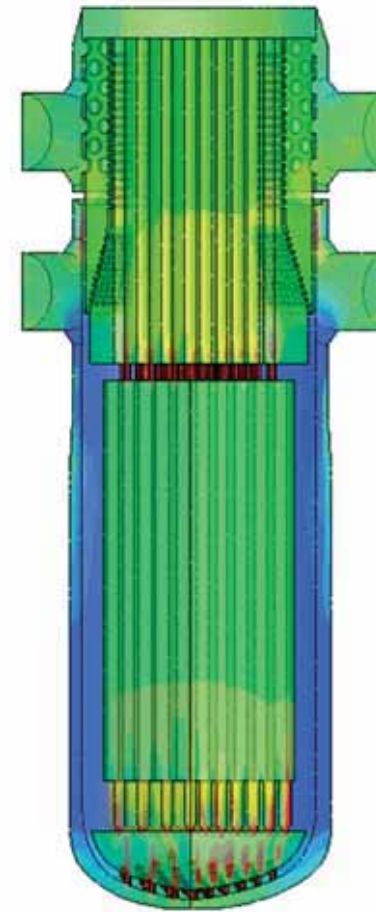
дов крупных приповерхностных вихрей, численная спектральная плотность PSD (Power Spectral Density) которых покрывает значимую часть частотного диапазона. На рис. 3 представлены изообласти температуры при турбулентном смешении двух жидкостей в тройнике.



**Рис. 4.** Спектральная характеристика пульсаций скорости для двух различных сеток

### Проведение расчетов и пост-процессинг

Основным кластером, где создавался и тестировался программный комплекс, является Суперкомпьютер СКИФ МГУ "Чебышев" (<http://parallel.ru/>). Общее процессорное время тестирования превышает 100 000 процессорочасов. Генерация сеток осуществлялась на рабочем компьютере с 12 Гб оперативной памяти и двумя четырехъядерными процессорами Xeон E5420. Для сеток более 40 миллионов элементов генерация проводилась под операци-



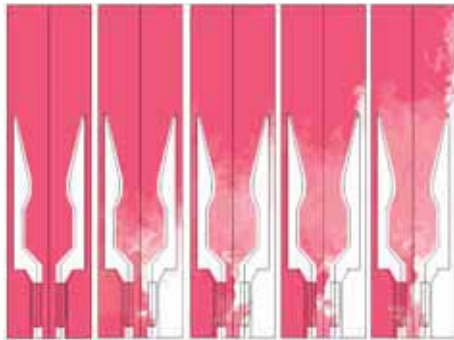
**Рис. 5.** Изообласти скорости в задаче нестационарного движения теплоносителя

онной системой openSuSe 11.2 с дополнительным диском подкачки 60 Гб. Общее время подготовки данных превышало 30 часов. В последующем файл данных перекачивался по сети общего назначения со скоростью до 400 Кб/сек. Основной кластер СКИФ содержит 1 Гб оперативной памяти на ядро, что осложняет запуск задач в малопроцессорном режиме. Без заметной потери времени быстроедействие расчеты выполнялись вплоть до 512 процессоров. Постпроцессинг осуществлялся на рабочем компьютере с перекачкой сжатых данных. Максимальное время расчетов до 2 суток. Спектральная характеристика пульсаций скорости для двух различных сеток и изообласти скорости в задаче нестационарного движения теплоносителя представлены на рис. 4, 5.

Важной составляющей исследований является вывод по времени результатов расчетов для последующего анализа. Эволюции смешения в нестационарных задачах движения теплоносителя представлены на рис. 6, 7.



**Рис. 6.**  
Изообласти температуры в задаче нестационарного истечения нагретой струи



**Рис. 7.**  
Изообласти температуры в задаче нестационарного смешения струй с различными скоростями и температурами

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goloviznin V.M. Balanced Characteristic Method for Systems of Hyperbolic Conservation Laws. Doklady Math. 72 (2005). P. 619–623.

## 3D PIC моделирование взаимодействия светового поля экстремальной интенсивности с плазменными средами

