

Высокопроизводительные вычисления в теории турбулентного горения



19 Высокопроизводительные вычисления в теории турбулентного горения

При сжигании разного рода топлива человечество сегодня получает порядка 80% используемой энергии, и столь значительная роль этого источника энергии сохранится в ближайшие десятилетия. Проблема получения подобной энергии сопряжена с проблемами безопасности, экологической чистоты и экономической эффективности. Необходимость соответствия технологий сжигания топлива международным стандартам, регламентирующим выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов, при одновременном обеспечении конкурентных преимуществ за счет эффективного использования топлива, побуждают к непрерывному развитию теоретического фундамента и вычислительных технологий для моделей турбулентного горения.

Моделирование турбулентного горения газовых топлив представляет фундаментальную задачу, решение которой находится на пределе возможностей современных компьютеров. Можно заключить, что в последнее десятилетие численное моделирование турбулентного горения оформилось как наиболее сложное научное направление вычислительной гидродинамики. Фундаментальная трудность данного научного направления заключается в том, что для турбулентного горения газов характерно тесное взаимодействие нескольких физико-химических явлений, среди которых основными являются турбулентность, химические реакции и лучистый теплообмен. Указанные процессы имеют существенно разную природу и характеризуются широким спектром пространственных и временных масштабов. Адекватное численное моделирование каждого из указанных явлений, даже рассматриваемых по отдельности, представляет задачу, не имеющую универсальных решений. Задача еще более усложняется, если турбулентность, химические реакции и тепловое излучение взаимодействуют в многофазной среде, как это происходит при распылении жидкого горючего или огнетушащего агента.

Помимо фундаментального, теоретического значения очевидна и практическая роль численного моделирования турбулентного горения. В самом деле, именно при сжигании топлив человечество получает порядка 80% используемой энергии, и столь значительная роль этого источника энергии сохранится, по крайней мере, в ближайшие десятилетия. Проблема получения энергии при сжигании топлив сопряжена с проблемами безопасности, экологической чистоты и экономической эффективности. Необходимость соответствия технологий сжигания топлива международным стандартам, регламентирующим выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов, при одновременном обеспечении конкурентных преимуществ за счет эффективного использования топлива побуждают к непрерывному развитию теоретического фундамента и вычислительных технологий для моделей турбулентного горения. При этом, с одной стороны, углубляется понимание разномасштабных физических процессов, протекающих при горении, а с другой — создаются мощные вычислительные инструменты и технологии параллельных многопроцессорных вычислений. Кроме того, следует отметить и развитие лазерных технологий диагностики турбулентных пламен, позволяющих выполнять измерения температуры, скорости и концентраций с высоким временным и пространственным разрешением без искажения внутренней структуры пламени. Благодаря этим технологиям получены и постоянно пополняются результаты измерений, которые затем используются для апробации математических моделей и компьютерных кодов.

По нашему мнению, непрерывное развитие как производительности компьютеров, так и программного обеспечения кодов (быстро откликающихся на новейшие тен-

АВТОР:

А.Ю. Снегирев — Санкт-Петербургский государственный политехнический университет 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 *e-mail: a.snegirev@phmf.spbstu.ru*

денции в развитии математических моделей) открывают возможность для сокращения разрыва между фундаментальными теоретическими разработками в теории горения и проблемами проектирования реальных технологических устройств и энергетического оборудования.

В современном развитии численного моделирования турбулентного горения можно выявить ряд характерных тенденций [1], связанных с эволюцией вычислительных технологий вообще.

Во-первых, следует отметить состоявшийся переход от разработки собственных алгоритмов и программных кодов к использованию достаточно мощных и универсальных вычислительных пакетов, в том числе распространяемых на коммерческой основе. Такой переход приводит к углубляющемуся со временем разделению труда: разработка моделей и технологий их применения более не выполняется теми же людьми, которые выполняют расчеты и анализируют результаты (и, тем более, ставят эксперименты).

Во-вторых, происходит смена поколений самих математических моделей. Наиболее ярким примером последнего десятилетия является широкомасштабный переход к технологиям моделирования турбулентности методом крупных вихрей — как для исследовательских, так и прикладных задач [2].

В-третьих, при широкомасштабном использовании коммерческих программ, в которых заложена возможность параллельных вычислений на многопроцессорных кластерах, наблюдаемая на практике производительность вычислений зачастую существенно отстает от теоретической максимальной производительности. Данный разрыв обусловлен архитектурой кластера, дисбалансом в загрузке ядер, свойствами вычислительных алгоритмов и стратегией их распараллеливания.

В-четвертых, для промышленности использование многопроцессорных компьютеров не является самоцелью; рост их числа и мощности оправдан в той мере, в какой он способствует решению прикладных задач, на которую ориентирована та или иная отрасль. В то же время полная длительность инженерных проектов, использующих высокопроизводительные вычисления, включает, помимо длительности вычислений, затраты времени на следующие виды работ: 1) разработку математической модели; 2) ее программную реализацию и верификацию кода; 3) разработку технологии вычислений, включая перемещение, выгрузку и хранение данных; 4) визуализацию и анализ результатов расчетов, их сопоставление с экспериментами и другими данными; 5) оценку адекватности и, при необходимости, модификацию модели и, наконец, 6) подготовку отчетной документации. В ряде случаев, процессорное время оказывается вовсе не основным компонентом всей технологической цепочки. Следовательно, рост производительности процессоров (для ко-

торого в последние десятилетия выполнялся экспоненциальный закон Мура) может не привести и, как правило, не приводит к пропорциональному снижению времени, необходимого для решения задачи. Для наиболее полной загрузки имеющихся вычислительных мощностей требуется их эффективное администрирование, надежная и удобная для пользователя операционная система и среда разработки.

Указанные тенденции неизбежно ставят проблемы методического характера при моделировании турбулентного горения газовых топлив. Насколько адекватны выбор модели, метод численного решения, размер расчетной области, топология и размерность расчетной сетки, требования к сходимости? Отвечая на эти вопросы, пользователь принимает решения, которые определяют степень достоверности результатов расчета и затраты на их получение. В свою очередь квалифицированный ответ на перечисленные вопросы требует знания и понимания физических основ моделируемых явлений.

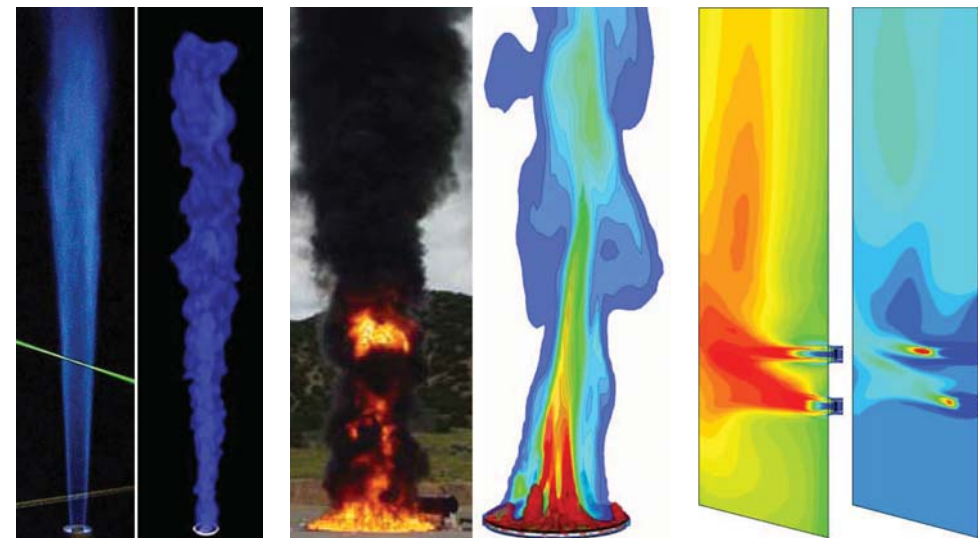


Рис. 1а.

Рис. 1б.

Рис. 1в.

В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете ведутся активные работы по численному моделированию турбулентного горения — как управляемого (в лабораторных пламенах и промышленных топках), так и неуправляемого — при пожарах (в помещениях и в открытом пространстве). В работах используется математическая модель и код собственной разработки

(Fire3D [3]), а также коммерческие гидродинамические коды Ansys Fluent и Ansys CFX. Вычисления выполняются на многопроцессорных кластерах Информационно-телекоммуникационного комплекса СПбГПУ, самый мощный из которых имеет в своем составе 256 процессорных ядер. Приведенный рисунок показывает, сколь разнообразными могут быть примеры турбулентного горения в исследовательской и инженерной практике.

Примеры численного моделирования турбулентного диффузионного горения: а) лабораторное пламя Sandia Flame D (слева — внешний вид пламени с лучом лазера (Barlow et al., 2007), справа — результат расчета (А.Фролов, А.Снегирев, 2008)); б) естественно-конвективное пламя над поверхностью жидкого горючего (слева — натурные испытания в неподвижной атмосфере, справа — результат расчета с помощью модели Fire3D [3]); в) горение природного газа в топке котла ГРЭС (слева — поле температуры, справа — концентрация оксида азота [4]).

Работы по численному моделированию турбулентного горения выполняются в рамках проекта FireEx-MicroTEST (2007–2009), поддержанного корпорацией Microsoft Research в рамках программы TCI (Technical Computing Initiative), а также при значительной поддержке ЗАО «Экотоп» (Санкт-Петербург) и Правительства Санкт-Петербурга (гранты 2008 и 2009 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Westbrook C.K.*, Computational combustion // Proceedings of the Combustion Institute. 2005. Vol. 30. P. 125–157.
2. *Снегирев А.Ю.* Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 143 с.
3. *Снегирев А.Ю., Талалов В.А.* Теоретические основы пожаро- и взрывобезопасности. Горение неперемешанных реагентов. СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 212 с.
4. *Соболев В.М., Снегирев А.Ю., Лупуляк С.В., Шиндер Ю.К.* Моделирование турбулентного диффузионного факела прямоточно-вихревой горелки // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-4 (Москва, 23—27 октября 2006 г.). Т. 3. М.: МЭИ, 2006. С. 316–319.