

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Носовой Татьяны Александровны «Вычислительные модели фильтрационного горения газа в режиме низких скоростей», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация Т.А. Носовой посвящена разработке математических моделей, численных методов и программ для исследования процесса фильтрационного горения газа. При этом основное внимание уделяется конструированию дискретных моделей, воспроизводящих решения соответствующих систем дифференциальных уравнений не только качественно, но и количественно. Сложность этого конструирования связана с существенной пространственно-временной разномасштабностью физических процессов, определяющих фильтрационное горение газа в целом. Также важное место в данном исследовании занимают вопросы повышения производительности разрабатываемых вычислительных моделей посредством применения технологий распараллеливания на современных многоядерных вычислительных системах.

Актуальность темы диссертации обусловлена с одной стороны обилием практических приложений процесса фильтрационного горения газа, например, в таких областях как пожаро-взрывобезопасность, экология, нефтедобыча, энергосбережение и др., и с другой стороны – большим интересом к построению вычислительных моделей, допускающих эффективную реализацию на многоядерных кластерах.

Диссертация Т.А. Носовой состоит из Введения, трех глав и списка литературы. Введение содержит общую характеристику работы и обстоятельный обзор литературы, посвященной исследованиям процесса фильтрационного горения газа. Данный обзор позволяет даже не специалистам в конкретной предметной области получить общее

представление о фильтрационном горении газа, как о физическом явлении со своими специфическими свойствами. В главе 1 рассматриваются одномерные вычислительные алгоритмы, основанные на математической модели в энтальпийной постановке. Основу всех рассмотренных в диссертации моделей составляет двухтемпературное описание системы газ-каркас с использованием в качестве искомой функции полной газовой энтальпии, включающей термодинамическую и химическую составляющие, вместо температуры газовой смеси. Это позволяет автоматически обеспечить балансные аппроксимации функции скорости реакции – уравнение для полной газовой энтальпии не содержит химический источник. В основе всех рассмотренных в 1-й главе алгоритмов лежат явные и явно- неявные разностные схемы в различных модификациях. В частности, рассмотрен явный алгоритм на подвижной адаптивной сетке и явно-неявные алгоритмы с расщеплением по физическим процессам. В последнем случае имеется в виду явная реализация уравнения для концентрации горючего на мелкой пространственно-временной сетке, и вычисление температуры каркаса и газовой энтальпии на грубой сетке. Приводится сравнение результатов расчетов по различным алгоритмам с указанием характерных сеточных параметров, при которых достигается нужная точность решения. В главе 2 задача рассмотрена в смешанной постановке в виде системы законов сохранения, представляющей собой систему уравнений первого порядка, с последующей пространственной аппроксимацией смешанным методом конечных элементов. Такой подход обеспечивает автоматическое выполнение сеточных законов сохранения при любом способе аппроксимации функции реакции. Для реализации данного подхода потребовалось переписать задачу в виде системы интегральных тождеств. В диссертации даны подробные пояснения этой процедуры для исходной и дискретной постановки, как в одномерном, так и в многомерном случае.

Для многомерной задачи предложен безусловно устойчивый алгоритм, основанный на расщеплении по координатным направлениям, который в двумерном случае сводит задачу к решению шести седловых систем для пар функций «компонента диффузионного потока – концентрация горючего», «компонента теплового потока каркаса – температура каркаса», «компонента потока полной газовой энтальпии – полная газовая энтальпия». Решение этих седловых систем осуществляется специально разработанной формой потоковой прогонки. Также важным результатом 2-й главы является устойчивый способ вычисления скорости распространения фронта горения. Фактически речь идет об использовании балансного соотношения, полученного из одномерной стационарной задачи на бесконечном интервале, инвариантной относительно сдвига. Данный подход применен к расчетам скорости горения при различных значениях теплофизических параметров. В частности, при некотором наборе параметров удалось получить пульсационный режим горения. И, наконец, глава 3 полностью посвящена программным реализациям с использованием OpenMP и MPI технологий распараллеливания. Приведены результаты по масштабированию и производительности вычислений.

В целом диссертация производит достаточно хорошее впечатление – по-видимому, впервые осуществлено количественно адекватное моделирование процесса фильтрационного горения газа в режиме низких скоростей на представительном промежутке времени в несколько десятков секунд за приемлемое расчетное время, составляющее не часы, а минуты. Все результаты обоснованы и прошли экспертизу в виде публикаций в научных журналах, процитированных в международных базах цитирования Web of Science Core Collection и Scopus, докладов на представительных международных конференциях, в виде экспертных



заклучений по проектам РФФИ и РНФ, в рамках которых частично проводились данные исследования.

По представленному тексту имеется ряд замечаний.

- 1) Для описания процесса фильтрационного горения в диссертации используется упрощенная модель, в которой как таковая модель фильтрации (на основе закона Дарси) фактически отсутствует. Градиентом давления пренебрегается на основании того, что «скорость газа много меньше скорости звука» (с. 20). Перенос газовой фазы моделируется уравнением конвекции-диффузии с некоторой постоянной скоростью («скорость подачи горючей смеси»). Насколько эта математическая модель адекватна реальному процессу горения газа в стесненных условиях в диссертации не обсуждается. В частности, пренебрежение градиентом давления только из-за малости числа Маха нелогично: несжимаемый поток как раз и движется из-за градиента давления.
- 2) В этой связи возникает вопрос о скорости подачи горючей смеси. Из работы не понятно, какой физический смысл несет этот параметр. По контексту ясно, что это некоторая скорость конвективного переноса, но почему она константа и почему ее надо брать 1 м/сек, как во всех расчетах, – не объясняется. Диссертация связана с вычислительным экспериментом, но при этом ее части, касающейся физической модели процесса, по сути, не уделено должного внимания. Какие пористые материалы, их характеристики (тот же размер пор), какие газы, как происходит формирование процесса горения в пористом материале и т.п. – все эти вопросы вынесены за скобки. Главным образом обсуждение ведется на уровне математической модели и численных методов.
- 3) Выбор параметров дискретизации по времени и пространству (шаг по пространству и по времени, (1.15) стр. 23, (1.19)-(1.20) стр.30)

делается на основании численных решений. Т.е., чтобы выбрать шаг дискретизации, надо посчитать задачу при различных значениях этих шагов. При этом возникает правомерный вопрос – насколько универсальна такая оценка? Изменится ли она, если это делать на другой задаче, с другими параметрами, начальными данными? Можно ли, например, данные Таблиц 1.1 -1.4 использовать для решения других задач ФГГ?

- 4) Как замечание следует отметить отсутствие в диссертации тестов по верификации разработанного численного метода и валидации математической модели. Ценность диссертационной работы была бы весомее, если автор привел сравнение своих численных результатов с альтернативными расчетами и/или экспериментальными данными.
- 5) И последнее касается терминологии, которая не вполне правильно используется автором. Например, «кондуктивно-диффузионный перенос» (с.13) скорее есть «конвективно-диффузионный перенос», «кондуктивный перенос» (с.60, 61) – «конвективный перенос», «предэкспонент» (с.20) – «предэкспонентный множитель», «отрыв температуры газа» (с.24) – «отклонение значений температуры», алгоритм «вложенных сеток» (разд.1.3) – известный в литературе метод химерных сеток (chimera grids).

Приведенные замечания не снижают общую положительную оценку научного уровня рецензируемой диссертации. Работа написана грамотным языком, принятым для публикаций научных исследований. Автореферат и опубликованные статьи в полной мере отражают содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Носовой Татьяны Александровны «Вычислительные модели фильтрационного горения газа в режиме низких скоростей» удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским

диссертациям по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а ее автор заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил:

Официальный оппонент,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша  
Российской академии наук,  
ведущий научный сотрудник отдела № 8,  
д.ф.-м.н. по специальности 05.13.18 – математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ  
125047 Москва Миусская пл.4 <http://www.keldysh.ru>  
e-mail: menshov@kiam.ru  
тел.: +7-499-2207942

Игорь Станиславович Меньшов

04 декабря 2018 г.

Подпись И.С. Меньшова удостоверяю  
Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,  
к.ф.-м.н.



А.И. Маслов  
М.П.