

На правах рукописи

Серещенко Евгений Викторович

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН ГОРЕНИЯ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В
МАЛОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук С.С. Минаев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук О.В. Шарыпов
доктор физико-математических наук А.Г.Князева

Ведущая организация: Институт автоматизации и процессов управления
ДО РАН

Защита состоится 21 октября 2011 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д003.035.02 при Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

Отзывы на автореферат, в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д003.035.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Автореферат разослан 19 сентября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор технических наук



И.М. Засыпкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Интерес исследователей к изучению нестационарных волн горения газовых смесей в микросистемах обусловлен появившейся в последнее время тенденцией к созданию малоразмерных горелочных устройств. В настоящее время знания о динамическом поведении фронтов химических реакций в микроканалах недостаточны, чтобы удовлетворить требованиям, возникающим в микро-технологиях, где может использоваться, например, комбинация экзотермических и эндотермических реакций, как в случае процесса с горением и катализом. В этих устройствах горение используется в качестве источника тепловой энергии. С уменьшением размера камеры сгорания возрастает отношение поверхности камеры к ее объему, что приводит к увеличению теплотерь из пламени и трудностям организации устойчивого горения. Основным механизмом для поддержания горения в малоразмерных системах является подогрев свежей смеси, поступающей в камеру сгорания за счет тепла отходящих продуктов горения. Такой режим горения может быть реализован в специальных горелках с регенерацией тепла, в которых тепло от продуктов горения передается свежей смеси через теплопроводящие стенки. Аналогичный механизм реализуется в пористых средах, где пламя может стабилизироваться в микроканалах между твердой фазой, даже если размеры микроканалов существенно меньше критического диаметра, определенного по начальной температуре. Горение в этом случае возможно при условии, что газовая фаза окружена стенками с температурой превышающей температуру окружающей среды. Поэтому, исследования горения газа в микроканалах с градиентом температуры необходимы для понимания процессов горения и теплообмена как в микросистемах с регенерацией тепла, так и для развития новых технологий, в которых используется горение газов в пористых средах.

Поскольку в микрогорелках с регенерацией тепла стенки камеры сгорания имеют повышенную температуру, возникает необходимость исследовать

особенности горения газа в микроканалах с нагретыми стенками. Недавно выполненные эксперименты по горению газа в прямых и радиальных микроканалах с контролируемой температурой в стенках обнаружили интересные нестационарные режимы горения, а также формирование разнообразных пространственных структур пламени. Один из таких процессов наблюдался в нагретом микроканале и был назван FREI (flame repetitive extinction ignition) или пламя с периодическим воспламенением и затуханием. В связи с этим возник интерес в создании математической модели, которая описывала бы наблюдаемые явления.

В диссертационной работе изложены исследования автора, посвященные моделированию нестационарных волн горения газовых смесей в микросистемах.

Цель работы

Разработка математических моделей горения газовых смесей в микросистемах; создание и реализация на РС разностных схем для моделирования нестационарных режимов горения, исследование их устойчивости и пределов существования; понимание физических механизмов образования различных нестационарных режимов горения, наблюдаемых в экспериментах по горению газа в микроканалах с контролируемой температурой стенок.

Научная новизна

Экспериментально и теоретически получена диаграмма устойчивости, при горении предварительно перемешанной смеси газов в малоразмерной системе с противоточным теплообменом.

Впервые показана возможность одновременного образования двух фронтов химической реакции при нестационарном горении газа в прямом и радиальном микроканалах с продольным по потоку газа градиентом температуры в стенках. В обоих случаях характерный поперечный размер канала был меньше

критического диаметра, и горение газа происходило в области, где температура стенок была выше температуры окружающей среды. На основе данного исследования предложен новый механизм воспламенения и неполного сгорания горючей смеси в микросистемах.

В рамках диффузионно-тепловой модели получены стационарные решения уравнений, описывающих волны горения в прямом и радиальном микроканалах с неоднородным распределением температуры в стенках, исследована их устойчивость и построены диаграммы существования различных режимов горения.

Дано объяснение механизма формирования вращающихся структур пламени в виде лопаток турбины при горении газа в радиальном канале и спирального пламени. Показано, что скорость вращения спирального пламени и пламени в форме лопаток турбины в 3-4 раза превышает нормальную скорость распространения пламени, выделены физические механизмы формирования таких структур, и найдены области их существования. Показано, что пламя в виде лопаток турбины наблюдается в диапазоне скоростей потока свежей смеси от 1.3 до 3 нормальных скоростей распространения пламени, соответствующем средней неустойчивой ветке S-образной зависимости положения фронта пламени от скорости подачи топлива. Спиральное пламя наблюдается в диапазоне от 6 до 9 нормальных скоростей распространения пламени, расположенном на верхней, устойчивой относительно одномерных возмущений, ветки S-образной кривой.

Результаты моделирования позволили объяснить недогорание смеси, наблюдавшееся в экспериментах.

Научная и практическая ценность работы

Результаты исследования разделяющихся пламен позволяют расширить рамки теории диффузионно-тепловой неустойчивости пламени и способствуют развитию фундаментальной теории горения.

Теоретически и экспериментально показано, что малоразмерные горелочные устройства с конвективным способом регенерации тепла, могут найти применение в автономных источниках электроэнергии с термо-фотоэлектрическими, термоэлектрическими, термоэмиссионными или другими методами конверсии тепла.

На основе исследования процессов горения в микроканалах с контролируемым распределением температуры в стенках возможна разработка эффективных методов для фундаментального изучения структуры пламен, и проверки существующих моделей с детальной кинетикой химических реакций.

На защиту выносятся:

- результаты моделирования процессов горения в горелке с противоточным теплообменом и сопоставление их с экспериментом;
- результаты моделирования нестационарных режимов горения газа в микро каналах с контролируемым распределением температуры в стенках. Рассмотрены случаи, когда горение происходило в прямой трубке и в зазоре между двумя дисками с радиальной подачей топлива;
- результаты моделирования вращающихся автоволн горения в зазоре между двумя дисками с радиальной подачей топлива.

Личный вклад автора заключался в анализе литературных данных, написании и отладке программ, численном исследовании сформулированных частных задач, обсуждении полученных результатов, формулировании основных научных положений и выводов, и проведении экспериментов по горению в микроканалах с противоточным теплообменом. Все работы, опубликованные в соавторстве, выполнены при личном участии автора. Результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия соавторов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью применяемых математических моделей, строгой постановкой задач, тщательным тестированием программ, сравнением численных результатов с точными аналитическими решениями в различных предельных случаях, непротиворечивостью получаемых результатов и сравнением выводов теории с данными эксперимента.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на XII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-12 (Новосибирск, 2006); Asia-Pacific Conference on Combustion (Нагоя, Япония, 2007; Тайбэй, Тайвань, 2009); Международной конференции по методам аэрофизических исследований ICMAR (Новосибирск, 2007, 2008); 32nd Symposium on Combustion (Монреаль, Канада, 2008); 6th Int. Conference on Flow Dynamics (Сендай, Япония, 2009).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 75 наименований. Объем диссертации составляет 118 страниц, включая 47 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность работы, отмечены ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели и задачи. Здесь же излагается краткое содержание диссертации.

В первой главе кратко описано современное состояние теории ламинарного пламени, особенности горения в микроканалах и приведен обзор литературы по теме диссертации.

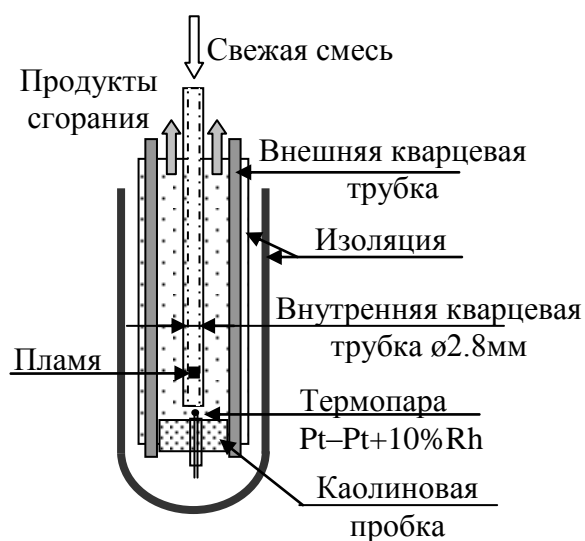


Рис. 1. Схема установки

Во второй главе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования горения предварительно перемешанной смеси газов в системе с противоточным теплообменом (рис. 1). Показано, что данная система может быть использована для организации стабильного горения в канале с диаметром меньшим, чем критический диаметр. Экспериментальные

результаты продемонстрировали, что стабилизация пламени происходит внутри гладкого канала без использования стабилизаторов, за счет теплообмена между продуктами горения и свежей смесью.

Приведено описание математической модели, результатов численного моделирования, а также аналитическое решение, полученное в рамках упрощенной модели. Численные и аналитические результаты, дают качественное объяснение полученным экспериментальным зависимостям координаты фронта пламени и температуры газа в точке поворота потока газа от скорости подачи газа. Эксперименты и численное моделирование подтвердили гипотезу, что пламя может стабилизироваться только в точке, расположенной вверх по потоку относительно точки поворота потока газа. Другая возможная конфигурация,

когда пламя стабилизируется за поворотной точкой вниз по потоку, является абсолютно неустойчивой. На рис. 2 показаны типичные распределения температуры газа и стенок канала в единицах адиабатической температуры T_b , а также распределение концентрации в единицах концентрации недостающего компонента свежей смеси C_0 , полученные с помощью численного моделирования. Важной характеристикой волн горения в системе с противоточным теплообменом является то, что существование стационарных волн горения возможно в широком диапазоне скоростей подачи газа (от 1.5 до 4 нормальных скоростей распространения плоского адиабатического пламени) и различных составах смеси (стехиометрическое соотношение от 0.7 до 1.2) при фиксированной скорости подачи газа. Следовательно, микрогорелка с противоточным теплообменом может найти применение в устройствах, где необходимо стабильное горение при изменении скорости потока и состава газа.

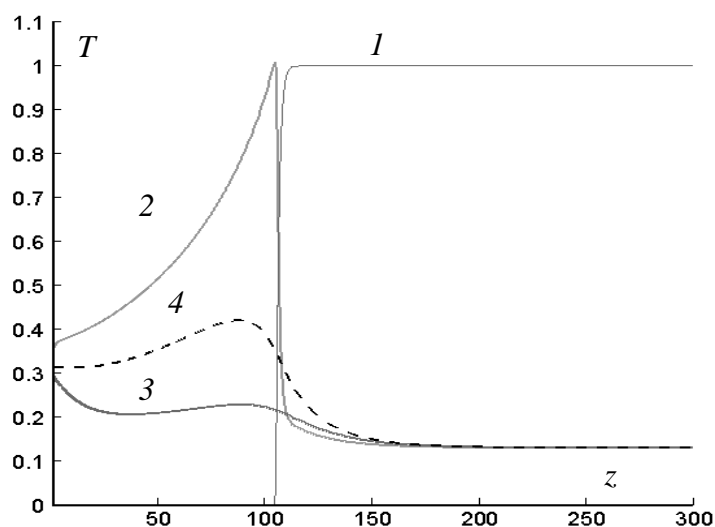


Рис. 2. Распределение безразмерных температуры газа и концентрации в стенках трубки вдоль оси z .

1 – концентрация недостающего компонента, 2 – температура во внутренней трубке, 3 – температура в зазоре между трубками, 4 – температура стенок канала.

В третьей главе представлены результаты одномерного моделирования процессов горения в прямой трубке и в радиальном канале с контролируемой температурой в стенках (рис. 3). Расчеты в рамках двухкомпонентной диффузионно-тепловой модели показали, что в процессе воспламенения появляются два максимума скорости химической реакции, которые соответствуют двум фронтам реакции, распространяющимся в противоположных направлениях (рис. 4). Направление движения потока газа совпадает с направлением оси x на

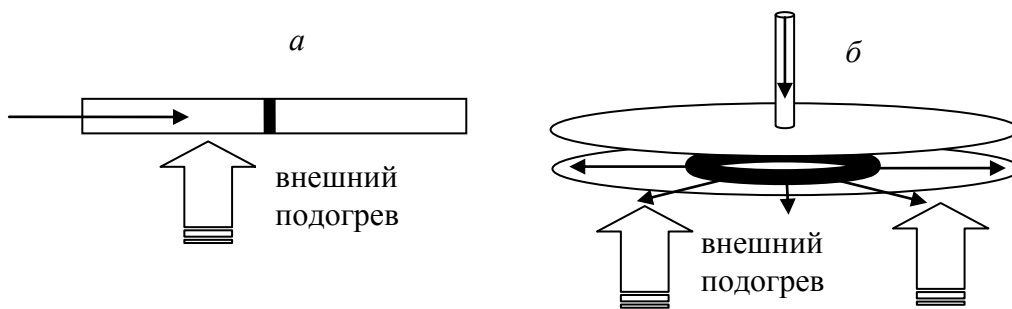


Рис. 3. Схема горения в прямой трубке (а) и в радиальном канале (б). Жирной линией обозначено пламя, а стрелки обозначают направление движения потока газа

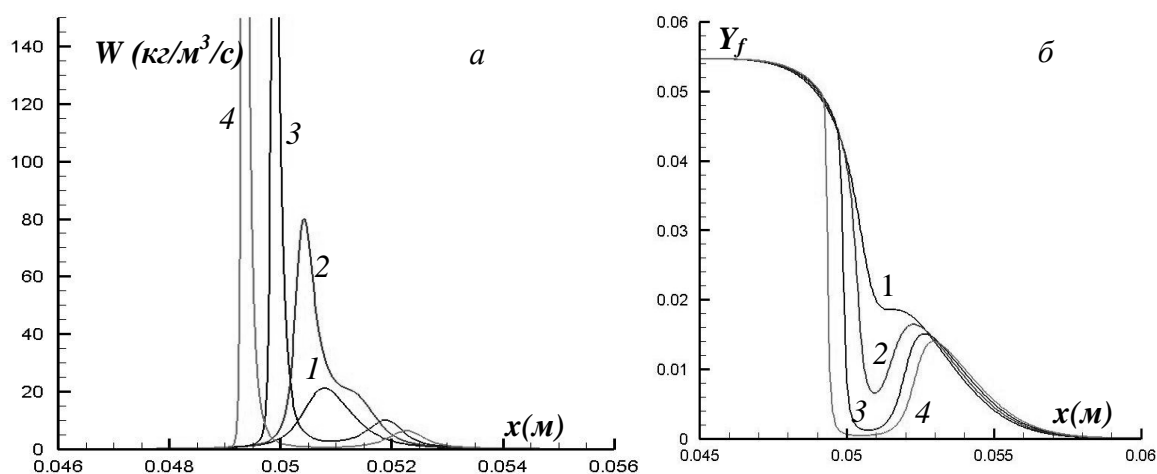


Рис. 4. Последовательное изменение профиля скорости химической реакции (а) и массовой доли топлива (б) после воспламенения в прямой

рис. 4, а горячая часть трубки расположена справа. На рис. 4 представлена временная эволюция профиля скорости химической реакции и массовой доли топлива после воспламенения. Профили представлены в одни и те же моменты времени. Большой пик скорости реакции соответствует обычному пламени, которое распространяется против потока, тогда как более слабый пик соответствует фронту химической реакции, распространяющемуся по потоку. Спустя некоторое время оба фронта химической реакции затухают, но по разным причинам. Пламя, распространяющееся навстречу потоку, достигало области, где температура стенок была низкой, и пламя затухало из-за теплопотерь на холодном конце трубки. Фронт реакции, распространяющийся по потоку, погасал из-за выгорания топлива в горячей области трубки. Численное моделирование

показывает, что уменьшение концентрации горючего начинается не на передней кромке диффузионного профиля, где имеется наибольшая температура газа, а в средней части профиля концентрации, где температура смеси ниже. Такая особенность воспламенения связана с тем, что скорость реакции является функцией как температуры, так и концентрации реактантов, поэтому положение максимума скорости химической реакции зависит не только от температурного поля, но и от распределения концентраций окислителя и горючего. Показано, что модель с бесконечно узкой зоной химической реакции, не учитывающая явную зависимость скорости реакции от концентрации, не описывает данное явление. В обоих случаях характерный поперечный размер канала был меньше критического диаметра, и равнялся 2 мм, горение газа происходило в области, где температура стенок была выше температуры окружающей среды. Эта особенность инициирования горения в каналах с градиентом температуры может вызывать существенное недогорание топлива в том случае, если размер горячей части канала недостаточен, чтобы произошло полное выгорание топлива. В двухмерном случае это явление может, по-видимому, сопровождаться образованием волн давления.

Теоретические результаты о формировании двух фронтов пламени получили подтверждение в специально поставленных экспериментах японских исследователей (проф. К. Марута, Тохоку Университет, Сендай).

В **четвертой главе** приведены результаты двухмерного моделирования процессов горения в радиальном канале в случаях поперечного и продольного сечений канала и в прямой трубке с градиентом температуры в стенках (см. рис. 3). Рассмотрены случаи плоского и Пуазейлевского профилей скорости потока газа. Для случая с Пуазейлевским профилем скорости потока газа представлены результаты трехмерного численного моделирования процессов горения в радиальном и прямоугольном каналах.

Получена S-образная зависимость положения фронта пламени от скорости подачи газа. На рис. 5 представлен типичный вид S-образной кривой, ха-

ракторный как для радиального канала, так и для прямого. Показано, что нижняя часть кривой соответствует низкоскоростному режиму горения, и граница существования этого режима располагается вблизи $V = 1.3U_b$, где V – это скорость свежей смеси на входе в канал, а U_b – адиабатическая скорость распространения плоского пламени. Средняя часть кривой соответствует нестационарному режиму периодического воспламенения и затухания пламени в канале,

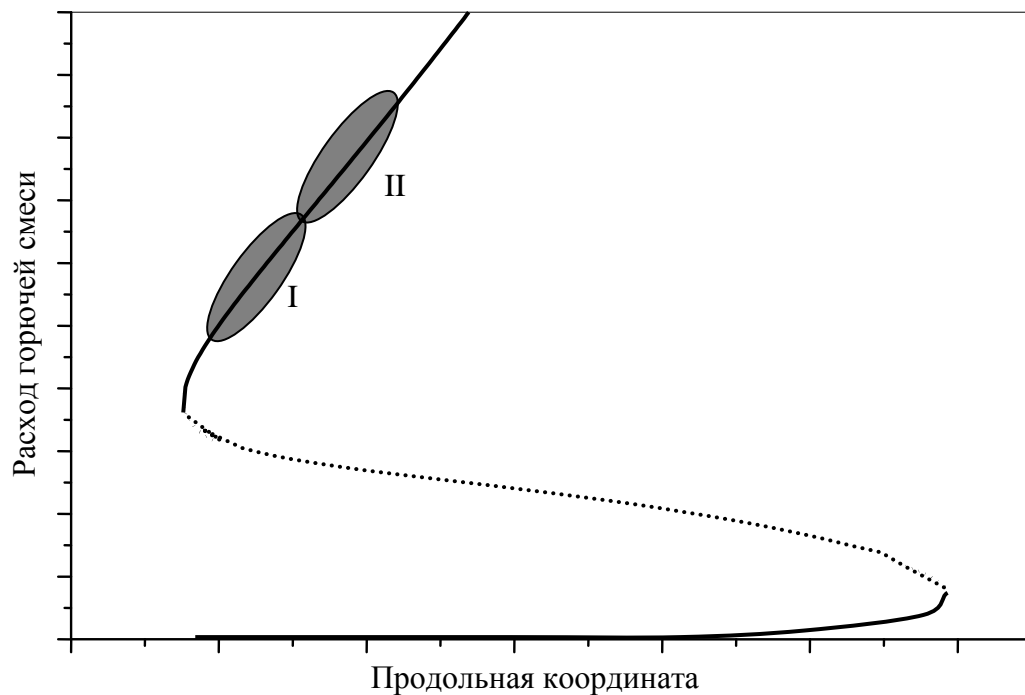


Рис. 5. Зависимость положения фронта пламени от расхода свежей смеси.

Сплошная линия – устойчивое горение, пунктирная линия – периодическое воспламенение/затухание. I – область симметричных колебаний, II – область несимметричных колебаний.

и находится в диапазоне скоростей потока свежей смеси от $V = 1.3U_b$ до $V = 3U_b$. Верхняя часть кривой характеризуется устойчивым горением в случае плоского профиля скорости потока газа, а в случае Пуазейлевского профиля скорости, появляются области симметричных и антисимметричных колебаний. Взаимное расположение этих областей показано на рис. 5. Симметричные колебания наблюдались в диапазоне $V = 4 - 6U_b$ (область I на рис. 5), а антисимметричные при $V = 6 - 9U_b$ (область II на рис. 5).

В рамках двухмерной диффузионно-тепловой модели распространения пламени в радиальном микроканале с плоским профилем скорости потока газа и заданным распределением температуры в стенках, показана возможность образования осциллирующих и вращающихся пространственных структур пламени описанных ранее в экспериментальных работах по микрогорению. На рис. 6 представлены профили температуры газа и концентрации топлива при скорости подачи газа в радиальный канал равной $V = 0.6$ м/с и отвечающей средней ветке S-образной кривой. С течением времени представленные профили вращаются

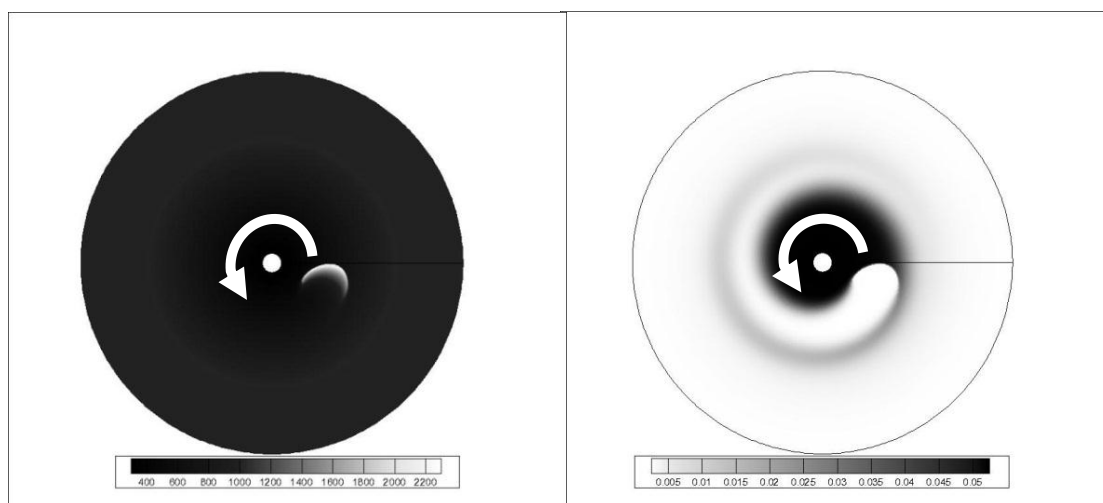


Рис. 6. Распределение температуры (справа) и концентрации топлива (слева) в радиальном канале.

Пламя вращается против часовой стрелки

против часовой стрелки со скоростью превышающей нормальную скорость распространения пламени в 3-4 раза. Как видно из рисунка пламя имеет форму лопатки турбины.

Такая форма пламени существовала в некотором диапазоне расходов газа, и при дальнейшем увеличении расхода пламя приобретало соответственно формы в виде двух и трех лопаток турбины. При достижении скорости подачи газа соответствующей верхней ветки S-образной кривой пламя превращалось в стационарное цилиндрическое пламя.

Показано, что при дальнейшем увеличении скорости подачи пламени в случае с Пуазейлевским профилем скорости, появляются области симметрич-

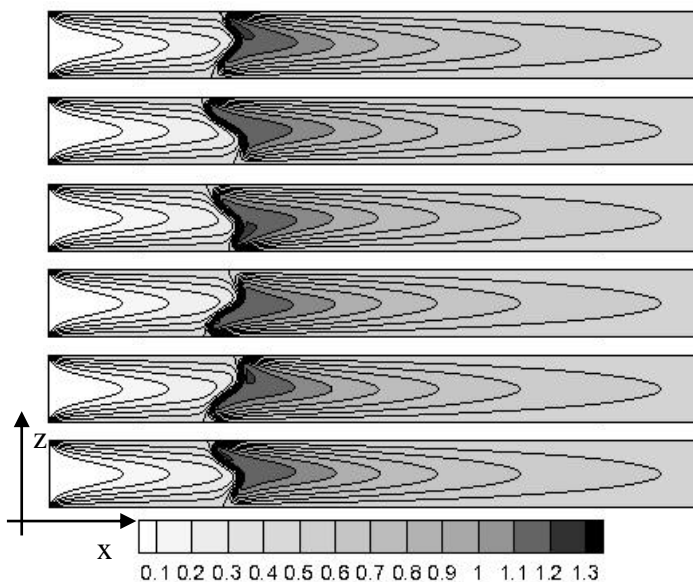


Рис. 7. Временная последовательность изменения распределения температуры в прямоугольном канале при $U_0 = 6$ с Пуазейлевским профилем скорости.

Эволюция температурного профиля с $\Delta t = 0.4$, соответствующая симметричным колебаниям в плоском канале показана на рис. 8 при значениях средней скорости $U_0 = 5$.

Описаны результаты трехмерного моделирования процессов горения в прямоугольном и радиальном каналах, которые продемонстрировали образование бегущих волн и вращающихся структур. На рис. 9 приведено последовательное изменение распределения температуры вблизи верхней границы в плоскости $z = 0.85$, через равные промежутки времени $\Delta t = 0.4$ для прямоугольного канала. Из рисунка видно, что пламя представляет собой бегущую волну. Расчеты показали, что волна рас-

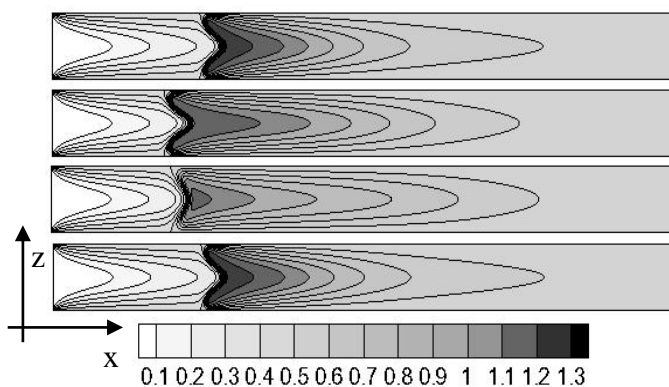


Рис. 8. Временная последовательность изменения распределения температуры в прямоугольном канале при $U_0 = 5$ с Пуазейлевским профилем скорости.

ных и антисимметричных колебаний пламени. Тогда, как для плоского профиля скорости в аналогичном диапазоне скоростей подачи топлива пламя стационарно. На рис. 7 показаны изменения распределения температуры газа в единицах адиабатической температуры в прямоугольном канале в последовательные моменты времени ($\Delta t = 0.3$) в случае Пуазейлевского течения со средним значением безразмерной скорости $U_0 = 6$.

пространяется со скоростью примерно в 5-7 раз превышающую нормальную скорость распространения пламени. На рис. 10 показаны типичные изоповерхность и центральный срез распределения концентрации в единицах концентрации недостающего компонента свежей смеси в прямоугольном канале при $U_0 = 6$. Структура волны представляет собой изгиб плоского фронта пламени, который распространяется в поперечном направлении к направлению потока газа.

В радиальном канале изгиб фронта пламени распространяется в тангенциальном направлении, вращаясь вокруг оси симметрии. На рис. 11 приведено последовательное изменение распределения температуры вблизи верхней и

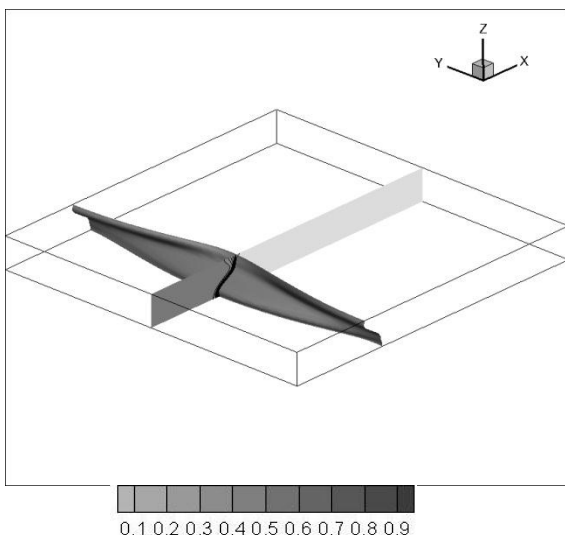


Рис 10. Изоповерхность $Y = 0.4$ и срез при $y = 5$ распределения концентрации в прямоугольном канале

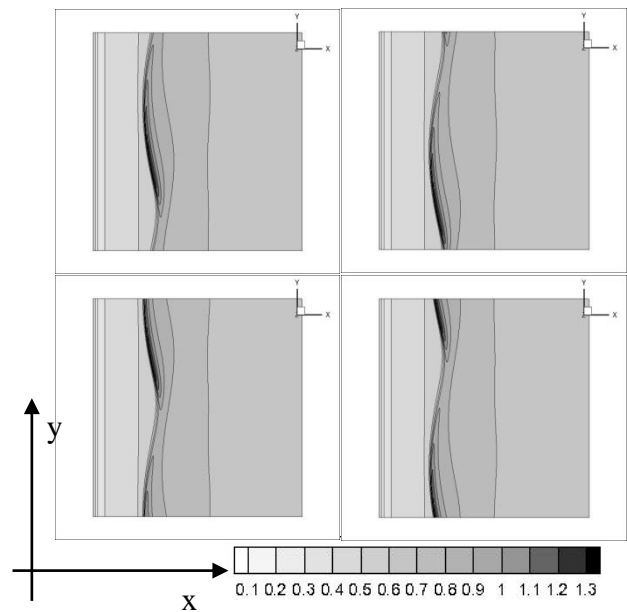


Рис. 9. Изменение распределения температуры вблизи верхней границы в плоскости $z = 0.85$, через равные промежутки времени $\Delta t = 0.4$ для прямоугольного канала.

нижней границы радиального канала в сечениях при $z = 0.15h$ и $z = 0.85h$ через равные промежутки времени $\Delta t = 0.06$.

Эти результаты позволяют предположить, что данная “изгибная” неустойчивость фронта пламени может быть связана с образованием вращающегося спирального пламени, которое наблюдалось в экспериментах в ограниченном диапазоне высоких значений расхода газа. Отметим, что данная неустойчивость может усилиться за счет

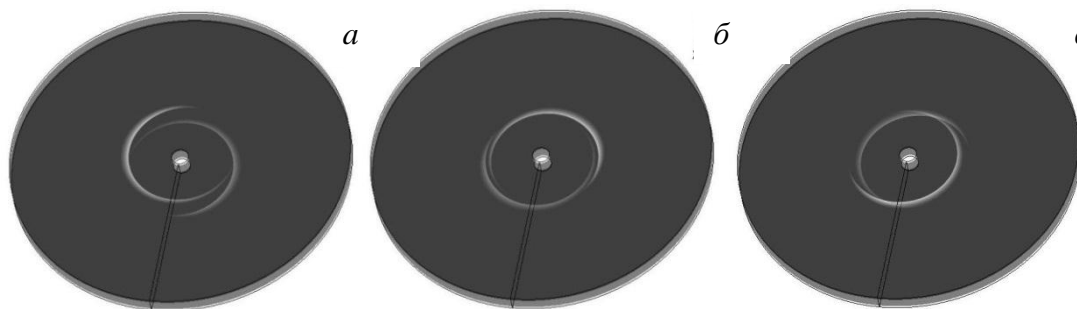


Рис. 11. Последовательное изменение сечений распределения температуры вблизи верхней и нижней границы радиального канала ($z = 0.15h$ и $z = 0.85h$). Профили представлены через равные промежутки времени

$$\Delta t = 0.06 \text{ с.}$$

искажения поля скоростей газа, вызванных искривлением пламени. В используемой диффузионно-тепловой постановке поле скоростей считалось заданным, что, по-видимому, не позволяет воспроизвести в полной мере структуру вращающегося спирального пламени, наблюдаемого в экспериментах.

В главе описан также метод распараллеливания разностной схемы на графическом процессоре (GPU), указаны основные преимущества и недостатки расчетов с использованием GPU.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований процессов горения в системе с конвективной рециркуляцией тепла было показано, что в данной системе

а) возможно устойчивое горение в трубке с диаметром меньше критического

б) возможно горение со скоростями большими, чем нормальная скорость свободного пламени и температура газа может превышать адиабатическую температуру свободного пламени.

в) пламя устойчиво к внешним воздействиям, вызванным изменением окружающей температуры, изменениями скорости потока газа и другими факторами.

Показана возможность стабилизации пламени в прямом канале с градиентом температуры в стенках, который создается продуктами сгорания. Эти результаты позволяют сделать вывод, о том, что данная система перспективна для создания микрогорелок.

2. В работе показана возможность одновременного образования двух фронтов химической реакции при нестационарном горении газа в прямой трубке и в зазоре между двумя дисками с радиальной подачей топлива. Обнаружено, что процесс периодического воспламенения и затухания пламени происходит в диапазоне скоростей подачи топлива от $V = 1.5U_b$ до $V = 3U_b$, соответствующем средней ветки S-образной кривой. На основе данного исследования предложен новый механизм воспламенения и неполного сгорания горючей смеси в микросистемах.

3. Показано, что процесс периодического воспламенения/затухания пламени в радиальном канале в двумерном случае связан с образованием бегущих волн и вращающихся структур в форме лопаток турбины.

4. Обнаружен новый тип неустойчивости при горении газа в микроканалах с продольным по потоку градиентом температуры в стенках канала. Особенностью данного типа неустойчивости пламени является наличие неоднородного профиля скорости газа в канале и теплообмен с горячими стенками. Найдена область значений скорости потока газа, при которых проявляется данный тип неустойчивости. Показано, что в радиальном канале данный тип неустойчивости приводит к образованию вращающихся структур пламени, в частности, спирального пламени, обнаруженного в экспериментах.

Автор благодарен проф. д.т.н. В.К. Баеву, к.ф.-м.н. Р.В. Фурсенко и сотрудникам лаборатории №17 за ценные замечания и обсуждения работ.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях.

1. Minaev S.S., Fursenko R.V., Baev V.K., Sereshchenko E.V., Maruta K. Theoretical Aspect of the Gas Combustion in Narrow Thermo-Electric Tube // 5th International Seminar on Flame Structure, Novosibirsk, Russia, 2005, P. 34.
2. Minaev S.S., Baev V.K., Fursenko R.V., Sereshchenko E.V. New Problems of Combustion Theory in the Context of Development of Microcombustors // ITAM SB RAS – ASTRIC NCKU Collaboration in Aerospace Sciences. Results and prospects. Novosibirsk, 2005. P. 43–45.
3. Серещенко Е.В. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов горения в системе с конвективной регенерацией тепла // XII Всероссийская научная конференция студентов физиков ВНКСФ-12: Тезисы докладов. Новосибирск, 2006. С. 330-331.
4. Sereshchenko E., Minaev S. and Fursenko R. Theoretical and Experimental Investigation of Premixed Flame Stabilization in Single Pass Counterflow Microcombustor // Proceeding of 6th Asia-Pacific Conference on Combustion, Nagoya, Japan, 2007, P. 567-570.
5. Sereshchenko E.V., Fursenko R.V., and Minaev S.S. Theoretical and experimental investigations of gas combustion in a counterflow system // International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Proceedings. Pt V. Novosibirsk, 2007. P. 150-155.
6. Minaev S., Maruta K., Fan A., Sereshchenko E. and Fursenko R. Ignition characteristics of gas mixtures in micro channels with a wall temperature gradient // International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Abstracts. Pt. 2. Novosibirsk, 2008. P. 240.
7. Fan A., Minaev S., Sereshchenko E., Fursenko R., Kumar S., Liu W., Maruta K. Experimental and numerical investigations of flame pattern formations in a radial microchannel // 32nd Symposium on Combustion: Abstracts of Symposium papers of Combustion Institute, 2008. P.99.
8. Fan Aiwu, Minaev Sergey, Sereshchenko Evgeniy, Fursenko Roman, Kumar Sudarshan, Liu Wei, Maruta Kaoru Experimental and numerical investigations of flame pattern formations in a radial microchannel // Proceedings of the Combustion Institute. 2009. V. 32, Issue 2. P. 3059-3066.
9. Sereshchenko E., Minaev S., Fursenko R., Fan A., Maruta K. Formation of Multiple Flame Fronts in Heated Micro Channel // Proceeding of 7th Asia-Pacific Conference on Combustion, Taipei, Taiwan, 2009, 10094.

10. Минаев С. С., Серещенко Е. В., Фурсенко Р.В., Фан Айву, Марута Каору Разделяющиеся пламена в узком канале с температурным градиентом в стенках // ФГВ. 2009. Т.45, № 2. С.12-19.
11. Фан А., Минаев С.С., Серещенко Е.В., Цубой Ю., Особе Х., Накамура Х., Марута К. Динамическое поведение разделяющихся пламен в нагретом канале // ФГВ. 2009. Т.45, №3. С.12-18.
12. Lutsenko N.A., Sereschenko E.V., Minaev S.S. Gas Flow through Self-Heating Porous Media: Theory and Experiment // Proceedings of 6th Int. Conference on Flow Dynamics (ICFD), Sendai, Japan, 2009, P.200-201.
13. Серещенко Е.В., Фурсенко Р.В., Минаев С.С., Курдюмов В.Н., Формирование нестационарных пространственных структур пламени при горении газа в микроканалах с температурным градиентом в стенках // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 2. С.305-316.

Ответственный за выпуск Е.В. Серещенко

Подписано в печать 13.09.2011
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 1.0
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 14

Отпечатано в ЗАО «ДокументСервис»
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1