**Самсонов Виктор Петрович. Самопроизвольные вихревые структуры в пламени при малых числах Рейнольдса : Дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.02.05 : Сургут, 2003 206 c. РГБ ОД, 71:05-1/12**

**ИЗ ФОНДОВ РОССИЙСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ БИБЛИОТЕКИ**

**Самсонов, Виктор Петрович**

1. **Самопроизвольные винревые структуры в пламени при малык числан Рейнольдса**

**1.1. Российская государственная Библиотека**

**diss.rsl.ru 2005**

**Самсонов, Виктор Петрович**

**Самопроизвольные винревые структуры в пламени при малык числан Рейнольдса [Электронный ресурс]: Дис. ... д-ра**

**физ.-мат. наук : 01.02.ОБ .-М.: РГБ, 200Б (Из фондов Российской Государственной Библиотеки)**

**Паровые котлы — Топки — Винревые топки — Расчет, проектирование — Аэродинамика в топкан — Экспериментальные методы.**

**Менаника жидкости, газа и плазмы**

**Полный текст:**

**http:^diss.rsl.ru^diss^05^0148^050148050.pdf**

**Текст воспроизводится по экземпляру, находящемуся В фонде РГБ:**

**Самсонов, Виктор Петрович**

**Самопроизвольные винревые структуры в пламени при малык числан Рейнольдса**

**Сургут 2003**

**Российская государственная Библиотека, 2005 год (электронный текст).**

*Ч1--05-1/І&*

Сургутский государственный университет

На правах рукописи

Самсонов Виктор Петрович

САМОПРОИЗВОЛЬНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ПЛАМЕНИ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

1. - механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

**Президиум ВАК России !**



**(решениеот"i2-■ ЙЙЙг., № *щ/ws* |**

присудил ученую степень ДОКТОРА ’•

***У*—наук! 'Начальник управления ВАК России 1**

Сургут - 2003

ВВЕДЕНИЕ 5

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. САМООРГАНИЗАЦИЯ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПЛАМЕНИ

ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА 11

* 1. Эффекты и механизмы закрутки потока в пламени 11
  2. Классификация самопроизвольных вихревых структур

в пламени 15

* 1. Программа исследований 31

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА 34
   1. Объекты исследований 34
   2. Экспериментальная установка для исследования влияния гравитационных условий 43
   3. Системы и методы визуализации вихревых течений,

контроля и измерения параметров среды 46

* + 1. Метод осаждения продуктов горения на контрольную поверхность 50
    2. Поляризационно-оптический метод исследования теплоотдачи в пограничном слое 64
    3. Метод измерения тепловых потоков при теплообмене «опрокинутого» пламени с поверхностью 68
    4. Метод раздельной визуализации температурного

поля и поля скоростей в ячейке Хил-Шоу 73

* + 1. Метод измерения энергии вихревого движения газа 78

1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ПРИ ГОРЕНИИ . ... 82
   1. Горение газа в «опрокинутом» пламени 82
      1. Критические условия самопроизвольного образования

вихревых структур 84

* + 1. Горение и тепло- массообмен в пограничном слое

при наличии вихревой структуры в пламени 93

* 1. Распространение пламени в плоской, полуоткрытой трубе . ... 110
     1. Критические условия вихреобразования 110
     2. Влияние вихревой структуры на устойчивость

и нормальную скорость пламени 123

* 1. Вихреобразование при автоколебательном и

релаксационном горении 127

* + 1. «Поющее» пламя 128
    2. Автоколебательное распространение пламени

по поверхности конденсированного топлива 134

* + 1. Релаксационное горение газа в камере сгорания типа акустического резонатора Гельмгольца 136
    2. Влияние граничных условий на формирование

импульсного кольцевого вихря 144

1. ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР 151
   1. Роль свободной конвекции 151
   2. Сопутствующие факторы в развитии диссипативных

вихревых структур 159

* 1. Механизмы и модели вихреобразования в пламени 161

1. ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ

КОГЕРЕНТНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР 168

* 1. Генерация аукстических течений пламенем при

«

автоколебательном горении 168

* 1. Формирование вихревых структур при колебаниях свободно-конвективного течения в пламени 174
  2. Механизмы образования вихревых цугов при

релаксационном горении 178

• 6. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИХРЕВЫХ

СТРУКТУР НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН 182

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 186

ЛИТЕРАТУРА 189

*т*

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Принудительная закрутка газа в пламени широко используется в камерах сгорания энергетических установок. Техни­ческая и экономическая целесообразность принудительной закрутки связана с влиянием вихревых течений на интенсивность тепло-массообмена и устой­чивость горения. Эффект влияния определяется интенсивностью закрутки. Принудительная закрутка потока технически осуществляется при тангенци­альном подводе топлива в камеру сгорания под высоким давлением, с помо­щью турбин или в рециркуляционных зонах. Получение необходимых ин­тенсивностей закрутки требует усложнения конструкций закручивающих устройств и увеличения расхода топлива.

Известно, что в диссипативных вихревых структурах Рэлей-Бенара, Марангони и др. интенсивность вращательного движения того же порядка величины, что и в течениях с принудительной закруткой. Физические про­цессы и механизмы вихреобразования в пламени при малых скоростях горе­ния те же, что и при формировании диссипативных вихревых структур. Од­ной из причин самопроизвольного формирования стационарных вихревых структур в пламени является ускорение потока во фронте пламени, как и на любой другой поверхности разрыва. Другими причинами являются ускорен­ное движение газа, вызываемое свободной конвекцией и растяжение фронта пламени («стретч-эффект»). Пламя является звеном обратной связи между колебаниями скорости тепловыделения и колебаниями температуры, давле­ния и скорости потока. Автоколебательные режимы горения порождают ко­герентные вихревые структуры в пламени. Когерентность вихревых структур проявляется в согласованном периодическом изменении размеров отдельных вихревых ячеек и скорости движения газа в них. Влияние физических про­цессов, приводящих к образованию самопроизвольных вихревых структур в пламени до настоящего времени в научной литературе не рассматривалось.

Стационарные и когерентные вихревые структуры порождают специ­фический механизм тепло- массопереноса. Он заключается во взаимодейст­вии отдельных вихревых ячеек, передающих по цепочке кинетическую энер­гию вращательного движения в соседние слои газа. В зависимости от типа развивающейся вихревой структуры размеры вихревых ячеек изменяются от михельсоновской толщины зоны горения до размеров пламени. Глубина проникновения вихревого движения может превышать толщину динамиче­ского и температурного пограничного слоев. Этим объясняется существен­ное влияние вихревой структуры на кинетику химических реакций в пламени и выбор преимущественных направлений теплового потока из зоны пламени в окружающую среду. Сведения о влиянии самопроизвольных вихревых структур на полноту сгорания топлива и интенсивность теплопередачи в ка­мерах сгорания в научной литературе отсутствуют.

Возможность формирования вихревых структур в пламени, обеспечи­вающих высокую полноту сгорания топлива и эффективную теплоотдачу, привлекательна с точки зрения технических приложений. До настоящего времени теоретические и экспериментальные исследования в этом направле­нии не проводились.

**Цель диссертационной работы** состоит в разработке метода, указы­вающего основные принципы построения гидродинамических ситуаций, при которых происходит самопроизвольное формирование вихревых структур в пламени; создании комплексной методики экспериментального исследова­ния вихревых течений в пламени; разработке основных теоретических поло­жений, объясняющих физические механизмы, управляющие явлениями вих­реобразования; нахождении новых, научно-обоснованных технологических решений, использующих влияние вихревых структур на горение и теплооб­мен для разработки высокоэкономичных камер сгорания;

**Научная новизна.** В диссертационной работе впервые:

1. Предложен новый подход в получении вихревых пламён, основанный на создании условий для постоянного или периодического ускорения потока. В рамках этого подхода обнаружены новые формы стационарных и неста­ционарных вихревых структур, присущие только течениям с фронтальными химическими реакциями. Взаимодействие нестационарной, когерентной вихревой структуры с фронтом пламени обеспечивает обратную связь между изменением скорости горения и параметров потока, что приводит к устойчи­вым автоколебаниям процесса горения.
2. Экспериментальным путем найдены условия спонтанного образова­ния вихревых структур в пламени в виде областей, ограниченных зависимо­стями критериев Рэлея и Рейнольдса. Особенностью вихревого течения про­дуктов горения является существование гистерезиса интенсивности тепло­обмена и числа вихревых ячеек по критерию Рейнольдса при формировании сложной структуры, состоящей из большого числа вихревых ячеек. При об­ратном обходе гистерезисной кривой обнаружены бифуркации числа вихре­вых ячеек.
3. Предложены новые экспериментальные методы исследования полей скорости, температуры и концентрации в вихревых структурах: метод раз­дельной визуализации температурного поля и поля скоростей в камере Хил- Шоу; метод осаждения продуктов горения на поверхности теплообмена; экс­периментальный способ анализа интегральной интерференционной картины в поляризационно-оптическом методе исследования теплоотдачи в погра­ничном слое; метод вставной гильзы для измерения энергии вихревого дви­жения газа; метод измерения профиля скорости в импульсной струе при формировании кольцевого вихря.
4. Установлено соответствие между динамической перестройкой поля скоростей и поля температур в вихревой структуре. При распространении фронта пламени в трубе и по поверхности конденсированного топлива вих­ревая структура является причиной автоколебательного режима горения.
5. Обнаружено изменение скорости теплоотдачи из пламени на поверх­ность теплообмена при переходе от потенциального течения к спонтанной вихревой структуре. Измерениями локальных тепловых потоков установле­но, что тепловой поток увеличивается в 1,2 -г 1,3 раза.
6. Предложены физические механизмы вихреобразования в эксперимен­тально изученных гидродинамических ситуациях. Показано, что самооргани­зация вихревой структуры происходит при ускорении потока под влиянием: а) тепловой гравитационной конвекции, б) растяжения фронта пламени, при­водящего к аналогу поверхностных, капиллярных явлений и эффекту Маран- гони; в) автоколебаний пламени и релаксационного горения.
7. Предложены новые технологические решения, реализующие способы нагрева жидких и газообразных сред и горелочные устройства для их осуще­ствления.

**На защиту выносятся:**

1. Разработка нового подхода в гидродинамике пламени, указывающего основные принципы создания граничных условий в камере сгорания, при ко­торых самопроизвольно формируются стационарные и нестационарные вих­ревые структуры в пламени при малых скоростях потока (Re < 300).
2. Экспериментальные результаты, подтверждающие спонтанное обра­зование вихревых структур при: а) распространении пламени в вертикальном полуоткрытом канале сверху вниз; б) горении газа, вдуваемого на нижнюю плоскость горизонтальной или наклоненной поверхности пластины- теплообменника; в) распространении фронта пламени по поверхности горю­чего материала; г) автоколебательном горении в трубе-резонаторе с акусти­ческой обратной связью; д) экспериментальные результаты, согласно кото­рым перестройка течения в вихревое сопровождается изменением скорости, полноты сгорания топлива и интенсивности теплопередачи на поверхность теплообмена.
3. Комплексная методика экспериментального исследования вихревых течений, позволившая визуализировать поля скоростей, произвести измере­ния полей температур и концентраций в вихревой структуре, измерить вели­чину тепловых потоков из зоны горения на поверхность теплообмена, уста­новить физические процессы, приводящие к вихреобразованию.
4. Экспериментальное и теоретическое обоснование предлагаемых фи­зических механизмов самоорганизации стационарных и нестационарных вихревых структур в пламени, согласно которому спонтанная самоорганиза­ция вихревых течений вызвана: а) фронтом пламени, создающим стационар­ные и периодические ускорения потока; б) свободно-конвективной неустой­чивостью, в зависимости от ориентации фронта пламени и направления его распространения относительно вектора свободного падения; в) релаксацион­ными процессами подготовки и воспламенения горючей смеси в камере сго­рания.

Практическая ценность и внедрение результатов диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Обнаруженные типы вихревых структур в пламени дополняют пред­ставления о возможных причинах и условиях спонтанного вихреобразования при малых числах Рейнольдса, влиянии вихревой структуры на неустойчи­вость горения, скорость и полноту сгорания топлива, величину и направле­ние теплового потока из зоны горения. Обнаруженные закономерности фор­мирования и поведения вихревых структур в пламени могут быть использо­ваны для оценки пожаро-взрывоопасности в технологических процессах, режимов устойчивого горения в камерах сгорания топок и двигателей, а так­же для повышения экономичности камер сгорания.
2. Диссертационная работа выполнялась на кафедре теплофизики Чу­вашского государственного университета (1975-1988 г.г.), кафедре теорети­ческой физики Чувашского государственного педагогического университета (1988-2000 г.г.), на кафедре экспериментальной физики Сургутского госу­дарственного университета (2000-2003 г.г.). Предложенные физические ме­ханизмы образования нестационарных вихревых структур применялись в экспериментальных исследованиях горения в невесомости и неустойчивого горения в камерах сгорания, выполнявшихся по хоздоговорной тематике ка­федры теплофизики ЧТУ (г. Чебоксары), кафедры теоретической физики ЧГПУ (г. Чебоксары), проблемной лаборатории кафедры теплоэнергетики ЧТУ и госбюджетной тематике кафедры экспериментальной физики СурГУ (г. Сургут). Выполнение работы поддержано грантами Международного На­учного Фонда (1994 г.) и Российского Фонда Фундаментальных Исследова­ний (1996 г.).

**Апробация работы.** Основные результаты работы, изложенные в дис­сертации, опубликованы в работах [1-28] и докладывались на 2 Всесоюзном семинаре по гидромеханике и тепло- массообмену в невесомости (Пермь 1981 г.), 5 Всесоюзном семинаре по электрофизике горения (Караганда 1982 г.), 5 Всесоюзной школе-семинаре по механике реагирующих сред (Томск 1984 г.), Международной конференции по горению (Мемориал Зельдовича, Москва 1994 г.), Международной конференции «Физика и техника плазмы» (Минск 1994 г.), 26-32 Международных конференциях по энергетическим материалам (ФРГ, Карлсруэ 1995-2001 г.), 3 Международном Симпозиуме по пиротехнике и взрывчатым веществам (Китай, Пекин 1995 г.), 11 Научно- техническом семинаре «Внутрикамерные процессы в энергетических уста­новках, акустика, диагностика» (Казань, 1999 г.), Международной конферен­ции по математике и механике (Томск, 2003 г.).

Количество основных работ по диссертации - 28.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 143 наименований. Общий объём составляет 203 страниц, включая 53 рисунков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны основы и принципы метода создания физических усло­вий в камерах сгорания, при которых самопроизвольно формируются ста­ционарные или нестационарные вихревые структуры в пламени при лами­нарном течении горючего газа и продуктов горения. Метод построен на ос­нове кинематического истолкования вектора вихря, являющегося мгновен­ной угловой скоростью вращения главных осей тензора скоростей деформа­ции среды при ускоренном движении частиц в потоке. Метод указывает ос­новные физические явления и граничные условия, способствующие разви­тию постоянных и периодических во времени ускорений потока горючего газа и продуктов горения. Метод определяет роль фронта пламени, как ис­точника вихревых возмущений и главного элемента гидродинамической сис­темы, создающего сопутствующие физические явления и механизмы обрат­ной связи между колебаниями температуры, скорости и давления. При этом ускоренное движение газа является внутренним свойством системы.
2. Дано обоснование метода экспериментальными результатами и путем оценок параметров вихревых течений при аналитическом решении модель­ных задач. Показано, что вихреобразование происходит в областях макси­мального ускорения (торможения) потока.
3. В рамках данного метода экспериментально установлено, что основ­ными физическими явлениями, приводящими к самопроизвольному образо­ванию вихревых структур в пламени являются: естественная тепловая грави­тационная конвекция, растяжение пламени, автоколебательное и релаксаци­онное горение. Показано, что энергия вращательного движения газа в вихре­вой структуре складывается из потенциальной энергии продуктов горения в поле сил тяжести, кинетической энергии горючего газа в газоподводящем тракте и кинетической энергии вследствие теплового расширения.
4. Экспериментами по горению газовых и конденсированных систем в невесомости и нормальных гравитационных условиях показано, что влияние сил тяжести на: а) гидродинамику продуктов горения; б) устойчивость и форму пламени; определяется соотношениями Fr < 0,1 и Fr < 0,5. Области самопроизвольного формирования стационарных вихревых структур огра­ничены зависимостями чисел Рэлея и Рейнольдса. Экспериментально уста­новлено, что критическое условие самоорганизации вихревых структур при автоколебаниях горения определяется характерным временем свободной конвекции и основной частотой камеры сгорания. Формирование вихревых цугов при релаксационном горении определяется зависимостью безразмер­ной тепловой мощности от числа Струхаля.
5. Показано, что вихревые структуры в пламени консервативны к изме­нениям внешних условий. Это проявляется в гистерезисной зависимости числа вихревых ячеек в структуре при изменении скорости потока. Перестройка вихревой структуры сопровождается бифуркацией числа вихревых ячеек. Установлено, что релаксационные процессы в нестационарных вихревых структурах определяют амплитудно-фазовые соотношения между колебаниями скорости и давления.
6. Установлено, что вихревая структура является причиной увеличения интенсивности теплообмена между фронтом пламени, продуктами горения и стенками камеры сгорания в 1,2 + 1,3 раза. Обнаружена гистерезисная зави­симость теплового потока от величины расхода горючего газа.
7. Рассмотрены применения метода для разработки более экономичных технологий сжигания горючего газа в камерах сгорания. Представлены ре­зультаты экспериментов, с помощью которых можно осуществлять диагно­стику процессов импульсного выброса газа из технологических объемов.
8. Разработана комплексная методика экспериментального исследования вихревых структур в пламени в нормальных гравитационных условиях и в невесомости на лабораторном стенде. Разработаны новые методы исследо­вания полей температуры, скорости и концентрации и энергии вращательно­

го движения газа для измерения полноты сгорания топлива и теплового по­тока.

9. Сформулированы перспективы метода и направления дальнейших ис­следований самопроизвольного образования вихревых структур в пламени, представляющих научный интерес и имеющих прикладное значение: вихре- образование при горении газа в расширяющихся каналах, двухфазных пла­менах, «обращенном» пламени и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абруков С А., Давыдов А.Е., Данилкин В.А., Тямейкин В.Я., Самсо­нов В.П. Экспериментальное изучение стационарного распространения пла­мени в трубе // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 6. С. 45-48.
2. Абруков С.А., Самсонов В.П. Интерференционное исследование влияния гравитационных условий на термодинамическое состояние продук­тов горения и нормальную скорость пламени // Химическая физика. 1983. №9. С. 1255-1258.
3. Самсонов В.П. Структура диффузионного пламени в невесомости // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 2. С. 55-60.
4. Самсонов В.П. Влияние тепловой гравитационной конвекции на рас­пространение пламени по поверхности топлива // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, №5. С. 45-50.
5. Самсонов В.П. Распространение пламени в импульсном поле ускоре­ний // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 6. С. 58-61.
6. Абруков С.А., Кидин Н.И., Самсонов В.П. Закономерности распро­странения пламени в трубе в условиях невесомости, исследование его устой­чивости // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 6. С. 61-64.
7. Абруков С.А., Самсонов В.П. Закономерности конвективного вихре- образования за фронтом пламени при его распространении в трубе // Жур­нал прикладной механики и технической физики. 1985. № 6. С. 68-72.
8. Аввакумов А.М., Галкова Н.Ю., Измоденов Ю.А.,Самсонов В.П. Ис­следование механизма газоимпульсного пылеудаления из фильтрующего слоя. Депонировано в ВИНИТИ. 1988. № 8627.
9. Алексеев М.В., Фатеев И.Г., Самсонов В.П. Закономерности спонтан­ного образования вихревого диффузионного пламени // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 6. С. 47-50.
10. Самсонов В.П. Исследование структуры пламени в пограничном

* слое методом осаждения сажи на поверхность // Химическая физика. 1992. Т.

11, № 11. С. 1580-1587.