

На правах рукописи

Работа выполнена в Институте химической кинетики и горения СО РАН и в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова

**АБДУЛЛИН Руслан Хаernasович**

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор  
Бабкин Вячеслав Степанович  
доктор технических наук, профессор  
Сеначин Павел Кондратьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ  
ГОРЕНИИ ГАЗА В ВЕНТИЛИРУЕМЫХ СИСТЕМАХ**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Терехов Виктор Иванович  
доктор физико-математических наук, профессор  
Сагалаков Анатолий Михайлович

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Ведущая организация: Институт теоретической и прикладной  
механики СО РАН (г. Новосибирск)

Защита состоится «04» апреля 2008 г. в «12:30» часов на заседании  
Диссертационного совета Д212.004.03 при Алтайском государственном  
техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу:  
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46.  
E-mail: [D21200403@mail.ru](mailto:D21200403@mail.ru), тел/факс (3852)260516.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АлтГТУ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью Вашего  
учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя  
ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «03» марта 2008 г.

Барнаул - 2008

Ученый секретарь  
диссертационного совета

А.Е. Свистула

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Моделирование процессов тепломассообмена при горении и взрыве газовых смесей в ограниченных объемах сложной геометрии представляет собой научно-прикладную задачу, решение которой имеет теоретическое и практическое значение для пожаровзрывобезопасности шахтных объектов и оборудования, сосудов и реакторов химической и газовой промышленности, объектов энергетики и транспортных систем. Аварийное воспламенение и взрывы газовых смесей в промышленности наносят материальный ущерб обществу и приводят к человеческим жертвам. Современные методы расчета и соответствующие профилактические мероприятия еще не позволяют полностью исключить условия, при которых возможны воспламенения и взрывы газовых смесей в неконтролируемых условиях.

Известны случаи аварийных ситуаций, вызванных случайным образованием и воспламенением горючих смесей в системах, подобных сообщающимся сосудам, например, эффект Байлинга (Beuiling E., 1906). Известные в этой области работы носят исключительно экспериментальный характер. Математические модели, описывающие процессы горения газа в двухкамерных и многокамерных системах, отсутствуют. В практике встречаются объекты, подобные линейным многокамерным системам, которых может возникать неконтролируемое горение газа. Процессы тепломассообмена, играющие в этих системах ключевую роль, практически не изучены.

Системы, заполненные пористыми средами, также являются вентилируемыми. В отличие от гомогенного газового горения, где процесс горения определяется главным образом термодинамическими (давление, температура, теплопроводность, тепловой эффект реакции), кинетическими (нормальная скорость пламени) и гидродинамическими (турбулентность) параметрами, горение газов в пористой среде дополнительно должно определяться характеристиками пористой среды (материалом пористой среды, структурой, удельной поверхностью, пористостью, проницаемостью и др.).

**Целью работы** является развитие существующих представлений о процессах тепломассообмена при горении газа в вентилируемых системах – пористых средах, сообщающихся сосудах и линейных многокамерных системах и получение новой достоверной информации для разработки рекомендаций по предотвращению неконтролируемых взрывов в промышленности и повышению пожаровзрывобезопасности проектируемых объектов и систем.

*Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:*

- Экспериментальное исследование процессов горения газов и тепломассообмена в инертной пористой среде, установление режимов стационарного распространения пламени, структуры тепловой зоны пламени и их зависимости от критериев подобия ( $Re$ ,  $Nu$ ,  $Pe$ ).
- Проведение систематических экспериментальных исследований и объяснение эффекта аномально высокого давления при горении газа в двухкамерной системе, построение математической модели процесса и на основе

моделирования получение данных о коэффициентах турбулизации пламени, максимальных давлениях взрыва и их зависимости от параметров процесса (геометрических, термодинамических, газодинамических, химических и др.).

- Проведение систематических экспериментальных исследований закономерностей горения газов и тепломассообмена в линейных системах сообщающихся сосудов с большими блокадными отношениями  $BR$ , построение математических моделей процесса и на основе моделирования получение данных о режимах горения, скоростных и динамических характеристиках процесса.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- Впервые проведено экспериментальное исследование структуры волны горения газа в инертной пористой среде.
- В систематических экспериментальных исследованиях, разработке математической модели и объяснении эффекта аномально высокого давления при взрыве газа в сообщающихся сосудах как следствия взаимодействия различных режимов тепломассообмена между ними.
- В экспериментальном исследовании горения газа в линейных системах сообщающихся сосудов при больших блокадных отношениях, обнаружении стационарных режимов распространения переднего фронта волны горения, разработке математических моделей и результатах численного моделирования процессов тепломассообмена.

**Практическая значимость работы.**

Разработаны физические и математические методы моделирования процессов горения и массообмена в вентилируемых системах (двухкамерных, линейных многокамерных и с инертной пористой средой). Полученные экспериментальные и расчетные данные о режимах горения, величинах критериев подобия, скоростей и давлений, реализуемых в вентилируемых системах, могут быть использованы при разработке нормативов, ГОСТов и при проектировании различных объектов, в которых возможны аварийные ситуации с воспламенением и взрывом газа. По результатам исследования издана монография.

**Достоверность и обоснованность** научных положений определяется теоретическим анализом и обобщением достоверных результатов и современных мировых достижений по всем рассматриваемым задачам. Применением современных аналитических и численных методов реализации разработанных при участии автора математических моделей. Проведением широких экспериментальных исследований, использованием и обобщением достоверных результатов других авторов. Выполнением работы в коллективе высококвалифицированных специалистов.

**Апробация работы.**

Результаты исследований докладывались на Объединенном семинаре по горению и аэрозолям Института химической кинетики и горения СО АН

СССР и СО РАН (Новосибирск, 1980-1997), Научной конференции посвященной 10-летию Алтайского университета (Барнаул, 1983), Международном семинаре «Атомно-водородная энергетика и технология» (Москва, 1984), VIII Всесоюзном симпозиуме по горению и взрыву (Ташкент, 1986), XXI Международном симпозиуме по горению (Мюнхен, ФРГ, 1986), XIII Международном коллоквиуме по динамике взрывов и реагирующим системам (Нагойя, Япония, 1991), XI Симпозиуме по горению и взрыву (Черноголовка, 1996), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» (Барнаул, 2007).

**Публикация результатов.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, включая 5 статей в рекомендованных ВАК изданиях и 1 монографию.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Содержит 134 страницы, 32 рисунка, 9 таблиц и 162 цитированных источника.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, рассмотрены последние достижения в исследуемой области, сформулированы цель и задача диссертационной работы, показаны ее научное и практическое значения, изложены основные положения, выносимые на защиту.

#### 1 Взрывы газов в пористых и вентилируемых системах

Линейными вентилируемыми системами являются, в частности, шероховатые трубы, трубы с внутренними перегородками или диафрагмами, каналы с переменным поперечным сечением и трубы, заполненные инертной пористой средой с открытой пористостью. Внутренние полости этих труб, заполненные горючим газом, могут быть как полностью изолированными от атмосферы, так и открытыми с одного или двух концов.

Является необходимым рассмотрение горения и тепломассообмена в вентилируемых системах с единой точки зрения. Во-первых, такие системы могут быть классифицированы по отношению характерных размеров  $d/D$ . В литературе по горению газов в трубах с периодическими препятствиями часто используется параметр - блокадное отношение  $BR=1-(d/D)^2$ . Во-вторых, классификация возможна по отношению объемов сосудов  $V_1/V_2$ , по их конфигурации, по типу соединений сосудов, по числу сосудов и т.д.

Джон Ли с сотрудниками (Канада) исследовали горение газов в трубах с периодическими препятствиями, характеризуемых малым блокадным отношением  $BR < 0,5$  в системах с высокорекреакционными смесями. Системы, использованные нами, относятся к линейным с большим блокадным отношением  $BR > 0,9$ .

При зажигании смеси точечным источником в сосуде с отверстием пламя первоначально распространяется сферически-симметрично, давление в сосуде поднимается. В результате этого начинается истечение газа из сосуда.

Пламя вытягивается в сторону отверстия. Из-за наличия тангенциальных скоростей на границе свежий газ – продукты горения вблизи отверстия возможно появление неустойчивости пламени и генерации турбулентности. Оба эти фактора приводят к увеличению массовой скорости горения. Появлению турбулентности способствуют различного рода препятствия внутри сосуда. Истечение и горение являются не только конкурирующими, но и взаимосвязанными, взаимообуславливающими процессами. Это обстоятельство мы учли, введя уточняющие параметры турбулентности и энергетики смеси в предложенный Бредли и Митчесоном критерий, который теперь представляет собой комплекс  $B = (gF/V_1^{2/3}) A_{ui} / (\chi_1 S_{ui}) Z / J_e$ , где  $g$ - коэффициент расхода,  $F$ - площадь сечения канала,  $A_{ui}$ - скорость звука,  $\chi_1$  - коэффициентах турбулизации пламени,  $S_{ui}$  - нормальная скорость пламени,  $J_e = \pi_e - 1$  (энергетический параметр),  $\pi_e$  - максимальное термодинамическое давление взрыва в одиночном закрытом сосуде,  $Z = (2/(\gamma - 1))^{(\gamma+1)/(\gamma-1)/2}$ ,  $\gamma$  - показатель адиабаты.

Специфика горения газов в инертных пористых средах состоит в тепловом и газодинамическом взаимодействии между газом и пористой средой.

В настоящее время известны пять стационарных режимов распространения волны горения газов в инертных пористых средах: режим низких скоростей (РНС) с характерными скоростями волн горения  $S \cong 10^{-4}$  м/с; режим высоких скоростей (РВС) с  $S = 0,1 - 10$  м/с; режим звуковых скоростей (РЗС) с  $S \cong 10^2$  м/с; режим низкоскоростной детонации (РНД) с  $D \cong 800-1500$  м/с и нормальной детонации с потерями тепла и импульса (НД) с  $D = 1500-2500$  м/с. Эти режимы различаются не только диапазонами реализуемых скоростей волн горения, но и другими особенностями.

Важной характеристикой является пористость среды - относительная доля свободного объема  $\varepsilon = V/V_0$ , характерные значения которой: для засыпок одинаковыми элементами типа шаров или цилиндров  $\varepsilon = 0,4 \div 0,5$ , в высокопористых средах, используемых для взрывозащиты  $\varepsilon = 0,97 \div 0,99$ .

Эксперименты по исследованию РВС и РЗС проводились на линейной установке длиной 2,8 м. В качестве пористых сред использовались засыпки из стальных полированных шаров (СШ), пенополиуретан с открытой пористостью (ППУ), пористый материал из фольги (ПМФ) и алюминиевые клееные соты (АС). Смесь поджигалась единичной искрой у верхнего торца трубы в свободном пространстве объемом  $100 \text{ см}^3$ . Использовались предварительно приготовленные метано-воздушные, пропано-воздушные и водородо-воздушные смеси. Точность приготовления смеси 0,1% об. Начальное давление варьировалось в пределах  $0,1 \div 1,5$  МПа.

В РВС горение имеет турбулентный характер и протекает в условиях существенно неоднородных гидродинамических, концентрационных и температурных полей без образования ощутимой барической волны. Протяженность зоны горения составляет 3÷5 см. Время тепловой релаксации ( $t_c < 10^{-3}$  с) меньше времени турбулентного горения ( $t_b \sim 10^{-2}$  с), то есть тепловая зона определяется не тепловой релаксацией, а химической реакцией, идущей при наличии интенсивных флуктуаций потока. Скорость пламени весьма чувствительна к изменению нормальной скорости  $S_u$ , размера порового пространства  $d_p$  и начального давления  $p_0$ . При уменьшении этих параметров до критических значений наступает срыв горения.

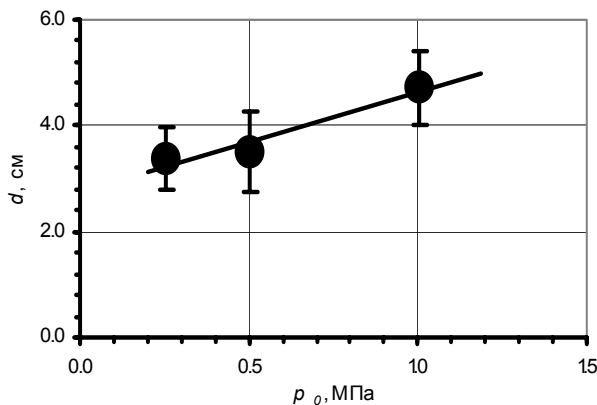


Рис. 1 Зависимость протяженности зоны горения  $d$  от начального давления стехиометрической метано-воздушной смеси в пористой среде из стальных шаров диаметром 6 мм.

При горении газа в инертной пористой среде перед фронтом волны горения существует зона фильтрации, где движение газа, обусловленное расширением продуктов сгорания, тормозится трением между газом и твердым каркасом. В РВС из-за низкого уровня скоростей пламени зона фильтрации велика по сравнению с зоной горения и процесс сгорания можно считать квазиизобарическим,  $Nu \approx 10 \ll Pe_w^2 \approx 10^4$ . Для пористых сред при  $Re = 30 \div 5 \cdot 10^5$ ,  $Nu = 0,395 Re^{0,64} Pr^{1/3} \approx 0,35 Re^{2/3}$ ,  $Re_w = 0,6 \beta^{3/2} Pe^3$ , (1)

Иная ситуация возникает в РЗС. В этом случае зона фильтрации сравнима с зоной горения и химическая реакция протекает в барической волне при повышенных давлениях и температурах. Вследствие этого скорости в РЗС существенно выше, чем в РВС. В РЗС параметрические зависимости качественно такие же, как в РВС, т.е. скорость волны горения растет при увеличении  $S_u$ ,  $p_0$ . Это дает основание анализировать РЗС в дальнейшем в тех же безразмерных параметрах, как и РВС –  $Re$  и  $Pe$ .

Невозможность индукционного воспламенения смеси является достаточным аргументом считать механизм передачи реакции в волне РЗС кондуктивно-конвективным. Следовательно, для РЗС можно принять механизм стабилизации скорости пламени (ограничения сверху) идентичным механизму в

РВС, но действующему в условиях повышенных давлений и температур. Учитывая высокую интенсивность турбулентности в РЗС можно предположить, что в этом случае гашение пламени в контролирующей скорости максимальных пульсациях происходит не по кондуктивно-конвективному механизму теплопотерь в стенке поровых каналов, а в результате гидродинамического гашения в свободном пространстве пор.

При  $Re_L > 300$  гидродинамическое гашение начинается при  $K > 1,5$ , где  $K = 0,157 (u'/S_u)^2 Re_L^{-0,5}$ ,  $Re_L = u'L/\nu$ ,  $u'$  – среднеквадратичная турбулентная скорость,  $L$  – лагранжев масштаб турбулентности. Полагая  $u' = \psi w$ ,  $L = d_c$ , где  $w = S - S_u$  скорость свежего газа в поре относительно твердой фазы,  $\psi$  – степень турбулентности (для труб  $\psi \approx 0,05$ ),  $d_c$  – характерный размер, условие гашения  $K = 1,5$  можно записать в виде  $Re = 4,5 (Pe/Pr)^{4/3} / \psi \approx 120 Pe^{4/3}$  (2)

## 2 Моделирование взрыва газа в сообщающихся сосудах

В экспериментах использовались стехиометрические метано-воздушные смеси при  $p_i = 0,2$  МПа. Точка зажигания располагалась в 1-м сосуде на расстоянии 130 мм от входного отверстия канала, а в ряде отдельных экспериментов – в центре 1-го сосуда. Диаметр соединительного канала между сообщающимися сосудами также варьировался. Давление в обоих сосудах регистрировалось тензодатчиками мембранного типа.

На рис. 2 приведен характерный пример взрыва газа в сообщающихся сосудах при инициировании пламени в одном из них. Видно, что нестационарный процесс взрыва характеризуется неоднородностью давления в сосудах, хотя в каждом из них давление однородно. Перепад давлений, обусловленный горением, вызывает соответствующее перетекание газов из одного сосуда в другой. Перетекание происходит как в докритическом, так и в критическом режимах.

**На первой стадии** горение происходит только в первом сосуде, свежий газ перетекает во второй. Очаг пламени деформируется, вытягивается в сторону отверстия. В некоторый момент времени (точка 1) пламя проскакивает во второй сосуд. Этот момент отчетливо фиксируется в виде излома на записи давления во втором сосуде.

**На второй стадии** горение идет в обоих сосудах одновременно, но более интенсивно во втором. В результате этого давление во втором сосуде быстро нарастает, проходит момент равенства давлений (точка 2) и в точке 3 достигает максимальной величины  $\pi_{2m}$ , превышающей термодинамическое давление взрыва в одиночном закрытом сосуде  $\pi_e$ . Очевидно, что в точке 2 направление истечения изменяется на обратное.

Далее, вследствие завершения горения во втором сосуде (точка 4) и продолжающегося перетекания газа в первый, давление снова выравнивается

(точка 5). Завершение горения в первом сосуде (точка 6) и дальнейший релаксационный процесс истечения приводит к окончательному выравниванию давления в системе  $\pi_1 = \pi_2 = \pi_e$  в точке 7.

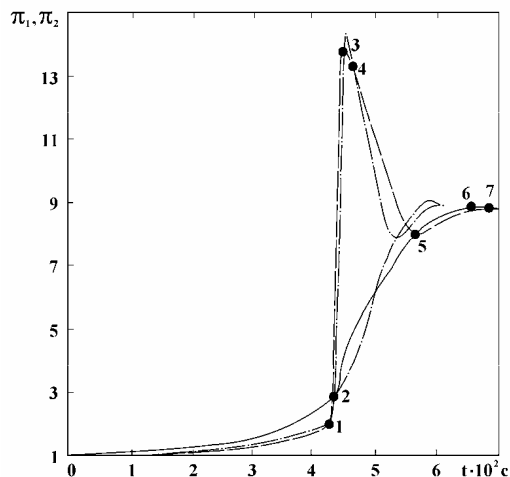


Рис. 2. Динамика давления при взрыве газа в сообщающихся сосудах при  $p_i = 0,2$  МПа,  $B = 0,439$ ,  $\Omega = 0,25$ : сплошная линия - первый сосуд; пунктирная линия - второй сосуд; штрих-пунктирная линия - расчет; 1- проскок пламени во второй сосуд; 2- максимальное давление во втором сосуде; 3- завершение горения во втором сосуде; 4- завершение горения в первом сосуде; 5, 6, 7- первое, второе и третье равенства давлений в сосудах.

Математическая модель горения газа при наличии истечения в приближении  $\gamma_b = \gamma_u = \gamma$  может быть записана на основе уравнения энергии, уравнения массовой доли продуктов и уравнений адиабатического истечения свежего газа и продуктов горения.

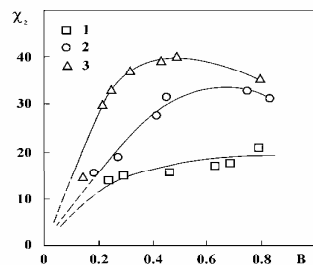


Рис. 3. Расчетная зависимость  $\chi_2(B)$  при  $\Omega = 0,05(3), 0,25(2), 1(1)$ . Пунктирная линия - экстраполяция.

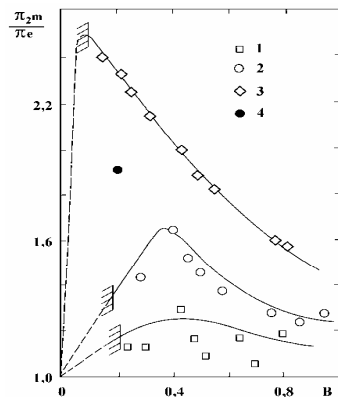


Рис. 4. Зависимость  $\pi_{2m}/\pi_e$  от  $B$  при  $\Omega = 1$  (1), 0,25 (2), 0,05 (3) и 0,25 (4) - (опыт с задержкой воспламенения в сосуде 2). Сплошная линия - расчет, пунктирная - экстраполяция. Точки - эксперимент. Вертикальными штрихами отмечена гра-

ница зажигания в сосуде 2.

В уравнения, описывающие вторую и третью стадии процесса, входит степень турбулизации свежего газа во втором сосуде  $\chi_2$ . В данной работе величина  $\chi_2$  определяется из расчета с привлечением независимых экспериментальных данных, а именно: накладывается требование совпадения расчетных и экспериментальных временных моментов достижения  $\pi_{2m}$ . Найденные таким образом значения коэффициента турбулизации  $\chi_2$  в зависимости от определяющих параметров  $B$  и  $\Omega$  могут быть использованы при дальнейших теоретических расчетах систем, подобных сообщающимся сосудам.

### 3 Моделирование горения газа в линейных системах вентилируемых сосудов

Многокамерные системы представляют собой последовательные соединения ряда одинаковых цилиндрических камер длиной 130 мм и диаметром 115 мм (рис. 5). Две соседние камеры разделены плоской перегородкой толщиной 30 мм, имеющей сменную вставку с отверстием диаметром  $d$ , расположенном на оси системы. В опытах использовались вставки с  $d=17, 24$  и 34 мм ( $BR=0,982; 0,956; 0,913$ ). Каждый сосуд снабжался датчиком давления тензометрического типа, а каждая перегородка фотодиодом для регистрации момента появления пламени в очередном сосуде. В опытах использовались пропано-воздушные смеси, которые заранее приготавливались в отдельном смесителе и затем перепускались в вакуумированную систему. Опыты проводились при комнатной температуре и начальных давлениях  $p_i = 0,02 - 0,40$  МПа. Смеси поджигались электрической искрой в геометрическом центре первого сосуда. Сигналы от датчиков давления и фотодиодов регистрировались на шлейфовом осциллографе и обрабатывались на компьютере.

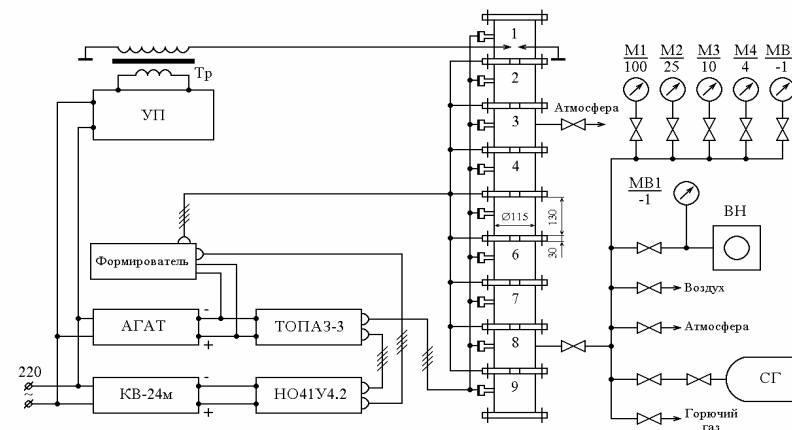


Рис. 5. Пульт управления газовыми сосудами, экспериментальная установка с устройством поджига и измерительный тракт со шлейфовым осциллографом. Цифры обозначают номера сосудов.

На рис. 6 приведены средние значения скоростей  $W$ . Каждая точка представляет результат осреднения скоростей в фиксированном сосуде, полученный в 3 – 5 опытах. Четко видны две характерные стадии процесса: сначала фронт непрерывно ускоряется ( $k = 1-8$ ), а затем движется стационарно ( $k = 8-17$ ). Под "стационарностью" здесь понимается процесс распространения пламени с практически постоянной средней скоростью. При этом отсутствуют устойчивые тенденции к ускорению или замедлению фронта пламени.

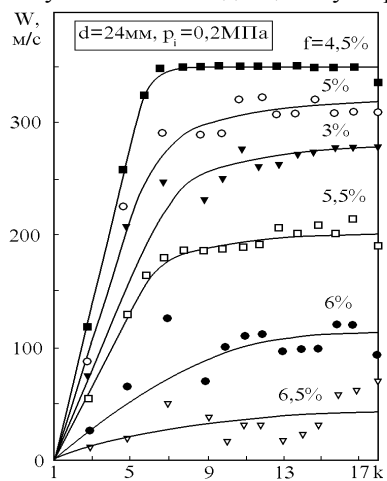


Рис. 6. Средняя скорость распространения пламени в 19-ти камерной системе в пропано-воздушных смесях.

Наличие стационарного состояния процесса горения позволяет рассмотреть вопрос о независимых от времени скоростных и структурных характеристиках волны горения. На рис. 7 приведены зависимости скорости фронта от концентрации пропана в смеси  $f$ . Видно, что для рассматриваемой системы сосудов зависимость  $W(f)$  имеет куполообразную форму, характерную для ламинарных и турбулентных пламен

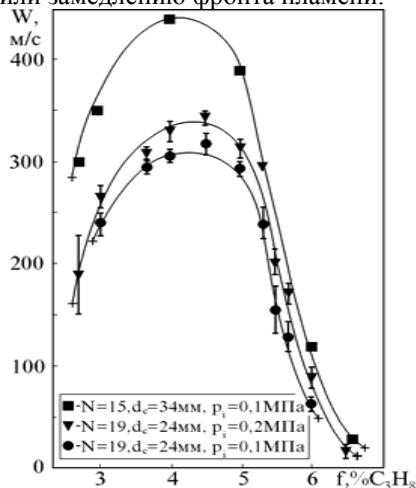


Рис. 7. Зависимости средней скорости пламени от состава смеси. Крестом отмечены пределы распространения пламени.

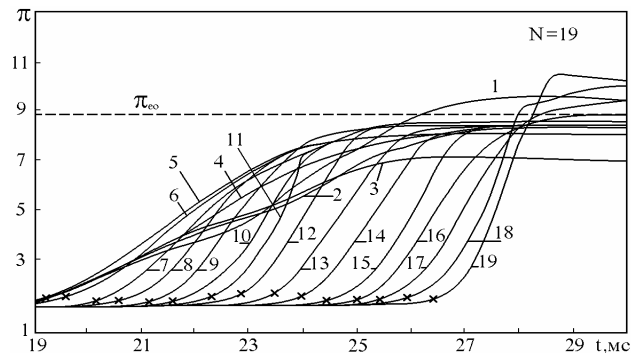


Рис. 8. Зависимости  $p(t)$ . Цифры на кривых обозначают номер сосуда. Пунктирная линия соответствует максимальному давлению при сгорании смеси в одиночном закрытом сосуде. Кресты – моменты проскока пламени.

В сильных смесях и длинных системах (рис. 8) эпюры давления  $p(t)$  в начальных сосудах существенно изменяются от сосуда к сосуду. В последующих сосудах ( $k = 7-16$ ) они практически подобны, инвариантны. Остаются неизменными уровень и время достижения максимального давления.

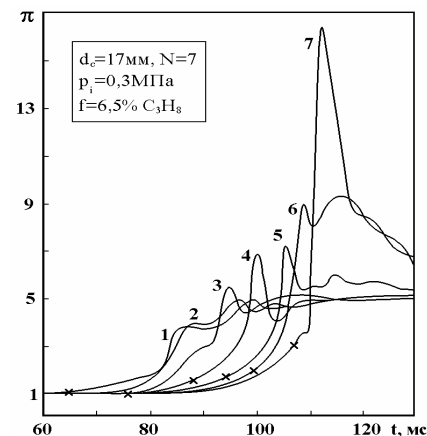


Рис. 9. Зависимости  $p(t)$ . Цифры на кривых обозначают номер сосуда. Кресты – моменты проскока пламени.

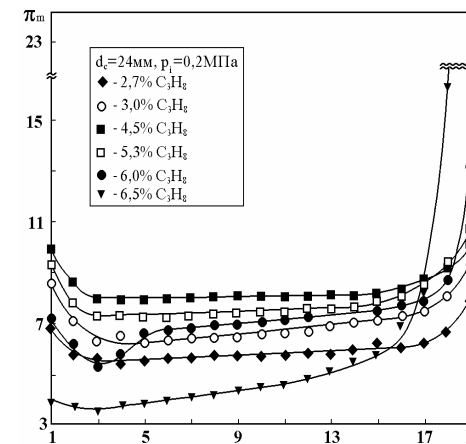


Рис. 10. Зависимости максимальных давлений от номера сосуда для пропано-воздушных смесей различного состава.

Эти эпюры давления соответствуют стационарной фазе распространения фронта горения. Наконец, в последних двух-трех сосудах эпюры давления снова деформируются с выходом на относительно высокое максимальное давление, превышающее максимальное давление в одиночном закрытом сосуде  $p_e$ . В слабых смесях и коротких системах (рис. 9) эпюры давления непрерывно изменяются от сосуда к сосуду. По ходу процесса увеличивается

максимальное давление в конкретном сосуде  $p_{mk}$ . Стационарное состояние не достигается.

На рис. 10 приведены значения максимальных давлений, достигаемые в разных сосудах при горении пропано-воздушных смесей в длинной системе сообщающихся сосудов. Видно, что повышенные давления развиваются, как правило, в первых и последних сосудах системы. Причем особенно высокие давления наблюдаются при горении богатых смесей в последних нескольких сосудах.

На основании изложенного выше подхода построены математические модели для стационарных режимов последовательного горения (Модель I) и одновременного горения (Модель II).

Для системы из  $N$  сообщающихся сосудов имеем следующую группу уравнений. Уравнения динамики давления (баланса энергии в сосудах):

$$\frac{d\pi_1}{d\tau} = J_e \frac{dn_{f1}}{d\tau} - \gamma\theta_{b1} \frac{dn_{bv1}}{d\tau} + \gamma\theta_{b2} \frac{dn_{br1}}{d\tau} - \gamma\theta_{u1} \frac{dn_{uv1}}{d\tau}; \quad (3)$$

$$\Omega_k \frac{d\pi_k}{d\tau} = J_e \frac{dn_{fk}}{d\tau} + \gamma\theta_{u(k-1)} \frac{dn_{uv(k-1)}}{d\tau} + \gamma\theta_{b(k-1)} \frac{dn_{bv(k-1)}}{d\tau} - \gamma\theta_{bk} \frac{dn_{br(k-1)}}{d\tau} - \gamma\theta_{uk} \frac{dn_{uvk}}{d\tau} - \gamma\theta_{bk} \frac{dn_{bv k}}{d\tau} + \gamma\pi\theta_{b(k+1)} \frac{dn_{brk}}{d\tau} \quad \text{для } k=2, \dots, (N-1)$$

$$\Omega_N \frac{d\pi_N}{d\tau} = J_e \frac{dn_{fN}}{d\tau} + \gamma\theta_{u(N-1)} \frac{dn_{uv(N-1)}}{d\tau} + \gamma\theta_{b(N-1)} \frac{dn_{bv(N-1)}}{d\tau} - \gamma\theta_{bN} \frac{dn_{br(N-1)}}{d\tau}.$$

Уравнения зависимости нормальной скорости пламени от давления и температуры:  $S_k = \pi_k^{S/2-1} \theta_{uk}^\delta$ , для  $k=1, \dots, N$ . (4)

Уравнения массовой скорости горения газа в сосудах:

$$\frac{dn_{f1}}{d\tau} = \frac{3}{J_e} \pi_1^{1/\gamma+\varepsilon} \omega_{b1}^{2/3}, \quad (5)$$

$$\frac{dn_{fk}}{d\tau} = \frac{\Omega_k^{2/3}}{J_e} \cdot \frac{\chi_k}{\chi_1} \pi_k^{S/2} \theta_{uk}^{\delta-1} \cdot \nu \cdot \omega_{bk}^{1-1/\gamma}, \quad \text{для } k=2, \dots, N, \text{ где } \nu=1,2,3 \text{ - для плоско-, цилиндрического и сферического пламени соответственно.}$$

Уравнения энергии свежей смеси:

$$\frac{d\theta_{u1}}{d\tau} = (1-1/\gamma) \frac{\theta_{u1}}{\pi_1} \cdot \frac{d\pi_1}{d\tau}, \quad \theta_{u1} = \pi_1^{1-1/\gamma}, \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_{uk}}{d\tau} = (1-1/\gamma) \frac{\theta_{uk}}{\pi_k} \cdot \frac{d\pi_k}{d\tau} + \frac{\theta_{u(k-1)} - \theta_{uk}}{n_{uk}} \cdot \frac{dn_{uv(k-1)}}{d\tau}, \quad \text{для } k=2, \dots, N.$$

$$\text{Уравнения истечения свежей смеси: } \frac{dn_{uv1}}{d\tau} = 0,62B_0 \pi_1^{(\gamma+1)/2\gamma} \Phi_{12}, \quad (7)$$

$$\frac{dn_{uvk}}{d\tau} = 0,62B_0 \frac{\pi_k}{\sqrt{\langle \theta_{uk} \rangle}} \Phi_{k(k+1)}, \quad \text{для } k=2, \dots, (N-1).$$

Уравнения прямого и обратного истечения продуктов горения:

$$\frac{dn_{bv k}}{d\tau} = 0,62B_0 \frac{\pi_k}{\sqrt{\theta_{bk}}} \Phi_{k(k+1)}, \quad \text{для } k=1, \dots, (N-1), \quad (8)$$

$$\frac{dn_{brk}}{d\tau} = 0,62B_0 \frac{\pi_{k+1}}{\sqrt{\theta_{b(k+1)}}} \Phi_{(k+1)k}, \quad \text{для } k=1, \dots, (N-1).$$

Уравнения безразмерной скорости истечения струи:

$$\Phi_{jk} = \begin{cases} Z^{-1} \sqrt{2 \left[ (\pi_k/\pi_j)^{2/\gamma} - (\pi_k/\pi_j)^{1+1/\gamma} \right] / (\gamma-1)}, & \text{при } \pi_k/\pi_j \geq Z^\alpha, \\ 1, & \text{при } \pi_k/\pi_j < Z^\alpha, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\alpha = 2\gamma/(\gamma+1)$ ,  $Z = \sqrt{(\alpha/\gamma)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}$ , для  $k \neq j$ ,  $k=1, \dots, N$ ;  $j=1, \dots, N$ .

Уравнение сохранения суммарного объема свежей смеси и продуктов горения:  $\omega_{bk} = \Omega_k - \omega_{uk}$ , для  $k=1, \dots, N$ . (10)

Уравнения сохранения массы свежей смеси и продуктов горения:

$$n_{u1} = 1 - n_{f1} - n_{uv1}, \quad (11)$$

$$n_{uk} = \Omega_k + n_{uv(k-1)} - n_{uvk} - n_{fk},$$

$$n_{uN} = \Omega_N - n_{fN} + n_{uv(N-1)}, \quad \text{для } k=2, \dots, (N-1),$$

$$n_{b1} = n_{f1} - n_{bv1} + n_{br1},$$

$$n_{bk} = n_{fk} + n_{bv(k-1)} - n_{bv k} - n_{br(k-1)} + n_{brk},$$

$$n_{bN} = n_{fN} + n_{bv(N-1)} - n_{br(N-1)}, \quad \text{для } k=2, \dots, (N-1).$$

Уравнения состояния свежей смеси и продуктов горения:

$$\omega_{uk} = n_{uk} \theta_{uk} / \pi_k, \quad (12)$$

$$\theta_{bk} = \pi_k \omega_{bk} / n_{bk}, \quad \text{для } k=1, \dots, N.$$

Уравнение сохранения энергии всей системы:

$$\sum_{k=1}^N (\pi_k - 1) \Omega_k = J_e \sum_{k=1}^N n_{fk}, \quad \text{где } \sum_{k=1}^N (n_{fk} - n_{bk}) = 0. \quad (13)$$

В систему уравнений (3)-(13) входят: безразмерные переменные  $\tau = t/t_0$  - время,  $\pi_k = p_k/p_i$  - давление,  $\theta = (T/M)/(T_i/M_u)$  - температура,  $\omega = V/V_1$  - объем,  $\gamma = C_p/C_v$ ,  $n = m/m_{u1i}$  - массовая доля и параметры процесса  $J_e = \pi_{e0} - 1 = (\gamma-1)Q/(RT_i)$ ,  $B_0$ ,  $\Omega_k$ , где  $t_0 = 0,62V_1^{1/3}/(S_{ui}J_e)$  - характерное время сгорания газа в первом сосуде,  $\varepsilon = s/2 - 1 + \delta(1-1/\gamma)$  - термо-

кинетический показатель,  $\delta$  - термический показатель,  $Q$  - тепловой эффект химической реакции на моль свежей смеси,  $s$  - порядок суммарной химической реакции. Индексы обозначают:  $i$  - начальное состояние,  $e$  - состояние на момент окончания горения в сосуде,  $k$  - номер сосуда,  $u$  - свежая смесь,  $b$  - продукты горения,  $v$  - прямое направление истечения,  $r$  - обратное направление истечения,  $f$  - фронтально сгоревший в сосуде газ.

Рассмотрим случай последовательного горения, который назовем - Модель I. Наиболее простым и естественным моментом проскока пламени в  $(k+1)$ -й сосуд можно считать момент завершения горения в  $k$ -м сосуде. Тогда  $dn_{fk}/d\tau = 0$  при  $\tau < \tau_{l(k-1)}$  и  $\tau > \tau_{ke}$ , для  $k=2, \dots, N$ , где момент проскока пламени из  $(k-1)$ -го в  $k$ -ый сосуд  $\tau_{l(k-1)}$ , а момент окончания горения в  $k$ -м сосуде  $\tau_{ke}$ . В рамках сделанного выше предположения о совпадении момента проскока с моментом завершения горения  $\tau_{lk} \equiv \tau_{ke}$ .

Для первого сосуда  $dn_{f1}/d\tau = 0$  при  $\tau > \tau_{1e} \equiv \tau_{l1}$ . В предположениях, сделанных в данной модели, свежая смесь может перетекать только в прямом направлении, и после момента проскока прекращается истечения свежей смеси и начинают истекать продукты горения:  $dn_{uvk}/d\tau = 0$  при  $\tau \geq \tau_{lk}$ , т.е. после проскока пламени в  $(k+1)$ -й сосуд. Тогда имеем  $dn_{bvk}/d\tau = 0$  и  $dn_{brk}/d\tau = 0$  при  $\tau < t_{lk}$ , причем при  $\tau \geq \tau_{lk}$  направление истечения продуктов между  $k$ -м и  $(k+1)$ -м сосудами может быть как прямым, так и обратным в зависимости от отношения давлений  $\pi_{k+1}/\pi_k$ . При  $\pi_{k+1}/\pi_k < 1$  направление истечения продуктов прямое и  $dn_{brk}/d\tau = 0$ , а при  $\pi_{k+1}/\pi_k > 1$  направление истечения обратное и  $dn_{bvk}/d\tau = 0$ . В случае равенства давлений  $\pi_k = \pi_{k+1}$  и при нулевой начальной скорости газа на входе в канал ( $W_k = 0$ ) имеем  $dn_{bvk}/d\tau = dn_{brk}/d\tau = 0$ .

Момент окончания горения в  $k$ -м сосуде вычисляется из уравнения баланса массы. В начальный момент времени  $\tau = 0$ ,  $n_{uk} = \Omega_k$ , до момента проскока пламени в  $k$ -й сосуд натекает доля свежей смеси  $n_{uv(k-1)}$ , а к моменту окончания горения истекает доля свежей смеси  $n_{uvk}$ . Таким образом, в течение всего процесса горения в  $k$ -м сосуде должна фронтально сгореть массовая доля  $n_{fk} = \Omega_k + n_{uv(k-1)} - n_{uvk}$ , где  $k=2, \dots, N-1$ . Для первого сосуда  $\Omega_1 = 1$ ,  $n_{f1} = 1 - n_{uv1}$ , а для последнего сосуда  $n_{fN} = \Omega_N + n_{uv(N-1)}$ .

В режиме одновременного горения газа в нескольких сосудах, обусловленного наличием высокоскоростной газовой струи, инициирующей воспламенение, описание в рамках Модели I становится некорректным. Необходимо

видоизменить граничные и начальные условия на каждой стадии процесса с учетом скорости передачи воспламенения вдоль оси системы.

Модель II описывает режим одновременного горения в нескольких сосудах.

Из рис. 6 и 8 можно видеть, что процесс высокоскоростного распространения воспламенения вдоль оси системы на определенном участке выходит на стационарный режим. Начиная с некоторой  $j$ -й камеры, когда струйное течение уже сформировано, условия инициирования на начальном участке не оказывают влияние на дальнейшее распространение пламени по системе.

Если струя движется с большой скоростью, порядка звуковой, в момент проскока в  $k$ -й сосуд доля перетекшей свежей смеси пренебрежимо мала и давление  $\pi_{l(k-1)} \approx \pi_{ki} = 1$ , а следовательно, в момент  $\tau_{l(k-1)}$  имеем  $\pi_k \approx 1$ .

Как видно из опытов, время прохождения струи по сосуду  $\Delta\tau_k = \tau_{lk} - \tau_{l(k-1)}$ , существенно меньше времени горения газа в сосуде:  $\Delta\tau_k \ll \tau_{te} - \tau_{l(k-1)}$ .

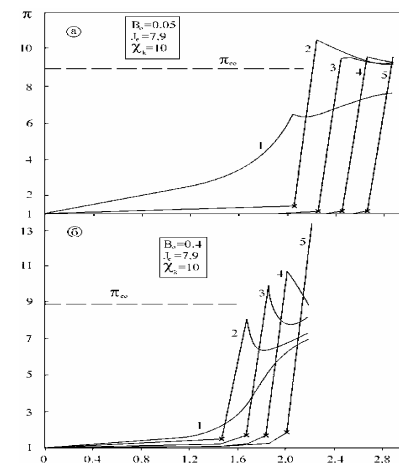


Рис. 11. Расчет динамики давлений в сосудах в 5-ти камерной системе

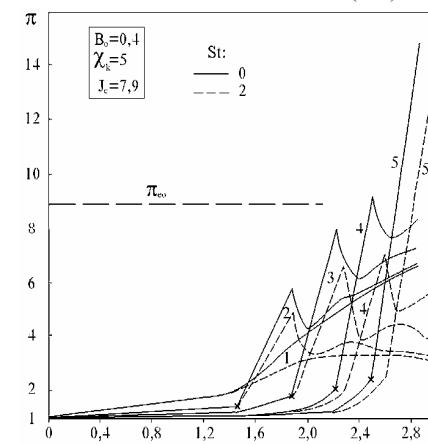


Рис. 12. Расчет динамики давлений в сосудах в 5-ти камерной системе при наличии теплоотдачи

На основе экспериментальных данных разных авторов по скоростям распространения пламени в различных вентилируемых системах получена критериальная зависимость  $Re(Pe)$ , (рис.13), которая объединяет такие явления, как низкоскоростная детонация в пористых средах ( $D \sim 400 \div 800$  м/с), стационарное распространение волн горения в трубах с периодическими препятствиями со скоростями несколько сотен м/с, режимы РВС и РЗС в инертных пористых средах, а также стационарное распространение волны горения в линейной многокамерной системе сообщающихся сосудов ( $S \sim 150 \div 450$  м/с).



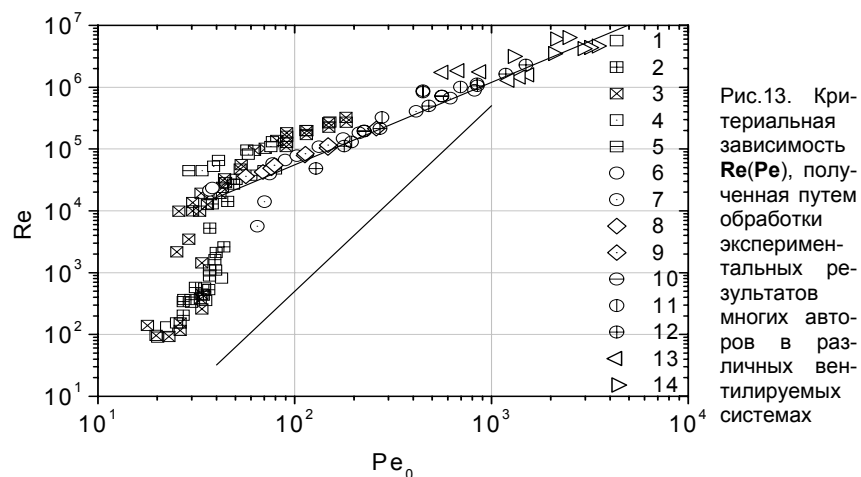


Рис.13. Критериальная зависимость  $Re(Pe)$ , полученная путем обработки экспериментальных результатов многих авторов в различных вентилируемых системах

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Впервые проведено экспериментальное исследование структуры волны горения газа в инертной пористой среде и получены следующие результаты.
  - Установлено, что протяженность зоны горения составляет величину порядка размера пор (или диаметра сферической засыпки) и лимитируется не

процессами охлаждения продуктов горения, а процессом турбулентного горения и гашения газа в порах.

- Эксперименты показали, что в режиме высоких скоростей (РВС) в закрытой пористой системе горение протекает без повышения и даже с понижением давления (при этом значения числа  $Nu = 10-150$ ).

2. Проведено систематическое экспериментальных исследований взрыва газа в системе из двух сосудов. Обнаружены режимы с высокими скоростями горения (с фактором турбулизации  $\chi_2 \sim 40$ ) и установлено, что природа эффекта аномально высокого давления во втором сосуде (с фактором 2,4 по отношению к  $\pi_e$ ) обусловлена изменением температуры истекающих газов (свежий газ и продукты горения) и сменой режимов массообмена между сосудами (докритического и критического с эффектом «запирания» потока в канале). Предложен новый параметр, названный нами параметром Брэдли. Установлена зависимость эффекта от параметров процесса  $\Omega = V_1/V_2$  (отношения объемов) и  $B$  (критерия Брэдли). В зависимости от величины параметра  $B$  выявлены три возможных режима горения:

- Режим быстрого горения ( $B \ll 1$ ), в котором общий процесс лимитируется истечением. Поэтому горение происходит, как в изолированных сосудах, но с эстафетной передачей химической реакции на открытой границе сосудов.

- Переходный режим ( $B \approx 1$ ), в котором характерные времена горения и истечения соизмеримы и наиболее ярко проявляются эффекты взаимодействия: аккумуляция массы газа во втором сосуде, максимальные скорости турбулентного горения, аномально высокое давление и другие.

- Режим медленного горения ( $B \gg 1$ ), в котором все закономерно определяются самим процессом горения, протекающим как в одиночном сосуде суммарного объема  $\Omega + 1$ .

3. Разработана математическая модель, описывающая процессы горения и массообмена в сообщающихся сосудах. Путем численного моделирования установлены зависимости факторов турбулизации пламени в сосудах  $\chi_1, \chi_2$  от параметров процесса  $\Omega$  и  $B$ .

4. Проведены экспериментальные исследования горения газа в линейных системах сообщающихся сосудов при больших блокадных отношениях ( $BR = 0,91-0,98$ ) с числом камер от 5 до 19 и обнаружены три режима распространения переднего фронта волны горения:

- стационарный режим быстрого горения (для стехиометрической пропано-воздушной смеси со скоростями  $S = 300-440$  м/с). В последних сосудах отмечено незначительное превышение максимального давления над термодинамическим давлением взрыва  $\pi_{e0}$  до 1,2 раза.

- стационарный режим (последовательного горения со скоростями  $S = 10-100$  м/с). В этом режиме наблюдается рост максимальных давлений от сосуда к сосуду, а в последних сосудах – аномально высокие (относитель-

но  $\pi_{e0}$  до 2,0-2,5 раза) давления, связанные с эффектом гидродинамического «запирания» потока в канале.

- квазистационарный режим горения с затуханием и последующим реиницированием пламени в очередном сосуде. В этом режиме также наблюдается рост максимальных давлений от сосуда к сосуду и аномально высокие давления в последних сосудах (относительно  $\pi_{e0}$  до 1,5 раза).

Разработаны математические модели для трех названных режимов горения. Численным моделированием установлены зависимости для коэффициентов турбулизации пламени в сосудах  $\chi_k$  (изменяются в пределах 10-30 для стационарных режимов), максимальных давлений в каждом сосуде  $\pi_k$  от параметра Бредли **B** и количества сосудов в системе *N*.

Показано влияние теплообмена со стенками системы при охлаждении продуктов сгорания, характеризуемого критерием Стентона **St** (при численном моделировании изменялся в пределах 0-2,0), на динамику процесса распространения пламени в системе, а именно, уменьшение скорости распространения переднего фронта пламени и уменьшение максимальных значений давлений в каждом сосуде системы.

Таким образом, в работе установлено, что в вентилируемых системах наблюдаемые явления определяются **процессами тепломас-сообмена**, то есть взаимодействием процессов горения, гашения, истечения и охлаждения.

**Использование результатов.** Экспериментальные и расчетные данные о режимах горения, величинах критериев подобия, скоростей и давлений, реализуемых в вентилируемых системах получены для использования соответствующими организациями при проектировании различных объектов, в которых возможны аварийные ситуации с воспламенением и взрывом газа, а также при разработке нормативов и ГОСТов. Результаты исследования легли в основу написания монографии.

**Основные результаты опубликованы в работах:**  
*статьи в изданиях, рекомендованных ВАК -*

1. Коржавин А.А. О зоне пламени при горении газа в инертной пористой среде / А.А. Коржавин, В.А. Бунев, **Р.Х. Абдуллин**, В.С. Бабкин // *Физика горения и взрыва*, 1982. Т.18, № 6. С. 20-23.

2. Сеначин П.К. К теории стука в поршневых двигателях, работающих на водороде / П.К. Сеначин, **Р.Х. Абдуллин**, В.С. Бабкин // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология*. 1985. № 2. С. 51-53.

3. **Абдуллин Р.Х.** Горение газа в сообщающихся сосудах / **Р.Х. Абдуллин**, В.С. Бабкин, П.К. Сеначин // *Физика горения и взрыва*, 1988. Т.24, № 2. С. 3-12.

4. **Абдуллин Р.Х.** Dynamics of Flame Propagation in Multichamber Systems. Dynamic Aspects of Explosion Phenomena / R.H. Abdullin, A.V. Borisenko, V.S. Babkin // *AIAA Journal. Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1993. Vol. 154. P. 31-50.

5. **Абдуллин Р.Х.** Численное моделирование горения газа в линейных системах сообщающихся сосудов / **Р.Х. Абдуллин**, А.В. Борисенко, П.К. Сеначин // *Ползуновский вестник*, 2007. № 4. - С. 9-17.

*монография -*

6. **Абдуллин Р.Х.** Внутренний взрыв в вентилируемых системах: Монография / **Р.Х. Абдуллин**, В.С. Бабкин, П.К. Сеначин / Под ред. П.К. Сеначина. Барнаул: ОАО «Алтайский Дом печати», 2007. – 104 с.

*статьи, отражающие основное содержание работы -*

7. Сеначин П.К. Теория стука в газовых поршневых двигателях / П.К. Сеначин, **Р.Х. Абдуллин** // *Труды научной конференции, посвященной 10-летию Алтайского гос. ун-та / Алтайский гос. ун-т. Барнаул*, 1984. С. 33-36. Деп. ВИНТИ 18.06.84 № 4022-84.

8. Сеначин П.К. Экспериментальное исследование и моделирование горения газа в линейных многокамерных системах / П.К. Сеначин, В.С. Бабкин, **Р.Х. Абдуллин**, А.В. Борисенко // *Химическая физика процессов горения и взрыва. XI Симпозиум по горению и взрыву. Том 1. Часть первая. Черноголовка: Изд-во ИХФЧ РАН*, 1996. С. 112-114.

9. Сеначин П.К. Моделирование горения газа в линейных системах сообщающихся сосудов / П.К. Сеначин, В.С. Бабкин, **Р.Х. Абдуллин**, А.В. Борисенко // *Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова*, 1999. № 1. С. 94-105.

10. **Абдуллин Р.Х.** Причина эффекта мультипликации давления при взрыве газа в сообщающихся сосудах / **Р.Х. Абдуллин**, П.К. Сеначин, В.С. Бабкин // *Приоритетные направления науки и техники, прорывные и критические технологии «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» (ЭЭТПЭ-2007): Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Барнаул, 17-20 октября 2007 г. – Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2007. – С. 85-87.*

*тезисы докладов и прочие издания -*

11. **Абдуллин Р.Х.** Combustion of Gases in Connected Vessels / R.H. Abdullin, V.S. Babkin, P.K. Senachin // *Abstracts / Twenty-First Symposium (Intern.) on Combustion. Pittsburg, Penn. / US. The Combustion Inst., Wash., 1986. P.207.*

12. **Абдуллин Р.Х.** Dynamics of Flame Propagation in Multichamber Systems / R.H. Abdullin, A.V. Borisenko, V.S. Babkin // *Abstracts. - 13-th ICDERS, Nagoya, Japan, 1991. P. 75.*

13. **Абдуллин Р.Х.** Combustion Wave Structure and the Mechanism of Reaction Transfer in Gas-phase Combustion Wave Propagating in Tube with Obstacles / R.H. Abdullin, A.V. Borisenko, V.S. Babkin // *Abstracts. – IV International Seminar on Flame Structure, Novosibirsk, 1992. P.138-139.*

14. **Абдуллин Р.Х.** Горение газа в линейных системах сообщающихся сосудов / Р.Х. Абдуллин, В.С. Бабкин, А.В. Борисенко, П.К. Сеначин // Пре-принт. – Ин-т хим. кинетики и горения СО РАН, Алт. гос. техн. ун-т. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1997. – 56 с.

Подписано в печать 03.03.2008. Формат 60×84 1/16.

Печать – ризография.

Усл.п.л. 1,16 Тираж 120 экз. Заказ \_\_\_\_\_ / 2008.

**Издательство Алтайского государственного технического  
университета им. И.И. Ползунова,  
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46.**

Лицензии: ЛР № 020822 от 21.09.98, ПЛД № 28-35 от 15.07.97.  
Отпечатано в ЦОП АлтГТУ, 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46