

УДК 541.126.2

## Газодинамические явления при воспламенении и горении гомогенных смесей вблизи неплоских поверхностей

**Б. Е. Гельфанд, А. М. Бартенев, С. П. Медведев,  
А. Н. Поленов, С. В. Хомик**

*БОРИС ЕФИМОВИЧ ГЕЛЬФАНД — доктор физико-математических наук, профессор, действительный член РАН, заведующий лабораторией гетерогенного горения Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ИХФ РАН). Область научных интересов: химическая физика горения и взрыва в многофазных средах.*

*АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ БАРТЕНЕВ — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИХФ РАН. Область научных интересов: физика быстропротекающих процессов.*

*СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ МЕДВЕДЕВ — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИХФ РАН. Область научных интересов: механика жидкости и газа.*

*АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПОЛЕНОВ — научный сотрудник ИХФ РАН. Область научных интересов: физическая газодинамика.*

*СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ ХОМИК — кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИХФ РАН. Область научных интересов: физика горения и взрыва газовых систем.*

117977 Москва, В-334, ул. Косыгина, 4, ИХФ РАН, тел. (095)939-73-02, факс (095)938-21-56,  
E-mail gelfand @podwal.msk.ru

Фундаментальные исследования процессов горения, перехода горения в детонацию и самой детонации обычно проводятся в условиях, когда давление и температура горючей среды однородны по пространству. Такие наблюдения позволяют измерить основные характеристики взрывных процессов, изучить химико-кинетические свойства горючих смесей и прогнозировать развитие горения в условиях отсутствия локальных зон поджата и разогрева энергоносителя. Однако в результате преднамеренного соблюдения однородности полей давления и температуры получается некоторый отрыв фундаментальных исследований от их практических приложений. Такая ситуация, например, реализуется при описании выделения тепловой энергии в натурных условиях. В частности, в двигателях внутреннего сгорания за счет специального подбора формы камер сгорания создаются структуры течения рабочей смеси, обеспечивающие наивысшую эффективность воспламенения и последующего сжигания топлива. В камерах сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей течение горючей газовой или двухфазной смеси, как правило, осложнено возникновением и распространением присоединенных и отраженных волн давления, формирующих сложную пространственно-временную структуру распределения температуры и давления.

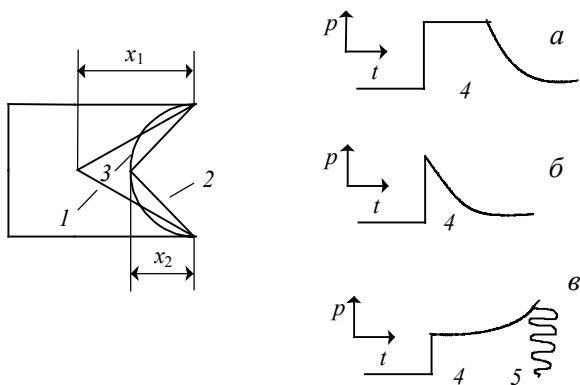
Описание газодинамических явлений в химических системах с неоднородным распределением температуры и давления по пространству возможно с использованием многомерных моделей, но безусловно требует опытной верификации на достаточно простых примерах, допускающих подробное измерение основных парамет-

ров в сопоставимых начальных условиях как в нейтральной газовой смеси, так и в ее горючем аналоге.

### Постановка задачи исследования и подход к ее решению

На основе обобщения опыта изучения газодинамических явлений в горючих и негорючих газовых смесях представляется удобным провести соответствующего рода исследования явления фокусировки ударных (или взрывных) волн при их взаимодействии с неплоскими вогнутыми отражающими поверхностями. К настоящему времени создана достаточная теоретическая и экспериментальная база для описания взаимодействия ударных волн с двумерными и трехмерными вогнутыми отражателями в негорючих газах.

Введем основные понятия. Ударными волнами здесь мы называем возмущения давления с конечным временем существования зон постоянного давления и постоянной температуры ударно-сжатого газа. Взрывными волнами будут считаться возмущения с непрерывным изменением давления и температуры за передним фронтом волны. Интенсивность ударных (и взрывных) волн характеризуется числом Маха  $M$  — отношением скорости потока к местной скорости звука. Примером двумерных отражателей, которые обычно используются в газодинамических исследованиях, являются угловые (клиновидные), цилиндрические и параболические полости. Трехмерными отражателями служат полости в виде разнообразных тел вращения: сфера, эллипсоид или параболоид, конус. К трехмер-



**Рис. 1. Основные типы отражателей и типичные профили давление—время, формируемые при взаимодействии отражателей с возмущениями давления:**

1, 2 — клин, конус; 3 — цилиндр, сфера; а — ударная волна; б — взрывная волна; в — комплекс «ударный фронт (4)—волна горения (5)»

ным отражателям относятся также углубления в виде пирамид или угловых элементов многогранных призм.

На рис. 1 схематично представлены очертания горения некоторых типов отражателей и профиль изменения давления  $p$  со временем  $t$  в ударной и взрывной волнах, а также в комплексе «волна сжатия—фронт горения».

Имеется ряд наглядных свидетельств [1—4] заметного влияния газодинамических процессов на взрывные явления, зарождаемые возмущениями давления, проникающими в искривленные каналы или отражающимися на неплоских концевых элементах. К сожалению, эти наблюдения ограничены тем, что соответствующие эксперименты выполнены на высокорекреационных смесях стехиометрического состава, когда характерное время химических реакций и пространственные масштабы их реализации намного меньше, чем для газодинамических процессов. Это не дает возможности получить полную картину вероятных режимов взаимодействия и не позволяет выделить влияния структуры неоднородного поля давление—температура на динамику переходных режимов горения и взрыва. В частности, пока не выявлены различия в распространении взрывных явлений в горючей среде при фокусировке ударных волн на концевых отражателях различной геометрической формы. По отношению к отражателям одинаковой формы не классифицированы основные типы переходных явлений, сопровождающих горение газов в пространстве, содержащем меняющиеся со временем зоны локального повышения температуры и давления при встрече ударной волны с двумерной или трехмерной полостью.

Применение оптических методов наблюдения позволяет уточнить картину физико-химических процессов, сопровождающих взрывные превращения. В ряде случаев удается даже исправить возможные ошибки, появившиеся вследствие неполноты информации, получаемой с помощью других методов измерения (спектроскопические, температурные, барические и т.д.). В этом отношении весьма полезна визуализация внешних газодинамических проявлений, обусловленных влиянием физико-химических процессов при самовоспламенении газообразного или распыленного горючего в потоке газообразного окислителя (чаще всего воздуха или кислорода).

Важнейшей характеристикой, определяющей динамику рабочих процессов в камерах сгорания, является запаздывание самовоспламенения  $\tau$  после поступления порции гетерогенной или гомогенной горючей смеси в область повышенной температуры  $T$ . От этого параметра зависят эксплуатационные характеристики различных технических устройств (дизели, ракетные двигатели на жидком топливе, прямоточные воздушно-реактивные двигатели, пульсирующие детонационные устройства для технологической обработки). Зависимость запаздывания самовоспламенения от параметров окружающей среды (давления  $p$ , температуры  $T$ , состава  $c$ )  $\tau = \tau(p, T, c)$  определяет вероятность перехода горения в детонацию. По этой причине число публикаций, посвященных теоретическому и экспериментальному определению характеристик самовоспламенения, весьма велико. Но, к сожалению, при этом встречаются серьезные противоречия в приводимых опытных данных для одних и тех же систем при близких уровнях начальных условий (в основном, давления и температуры).

Детальный анализ методик наблюдения взрывных процессов и измерения их характеристик [5—9] показал, что стандартный подход к определению зависимости  $\tau = \tau(p, T)$  по диаграммам давление—время  $p = p(t)$ , концентрация—время  $c = c(t)$ , излучение—время  $I = I(t)$  несет в себе возможность ошибки. Вероятность ошибки увеличивается и неточность измерений становится заметной, когда нарастание контрольного параметра со временем представляет собой плавно меняющийся сигнал, что свойственно для процессов с разбавленными горючими смесями. Так, при плавно нарастающей зависимости  $p = p(t)$  [5, 6] трудно определить место зарождения взрывного процесса. При плавно меняющейся диаграмме  $I = I(t)$  [7, 8] не ясна роль паразитных сигналов от рассеянного света, кроме того существует ряд проблем, связанных с определением угла зрения оптических датчиков. Дополнительные методические трудности возникают в случае измерения задержек самовоспламенения в системах с усложненной геометрией, а именно такие системы и представляют наибольший практический интерес. Ввиду всевозможных фигурных очертаний камер сгорания (криволинейные стенки, неплоское огневое днище, перфорация стенок или наличие специальных приспособлений [4, 9] для подвода компонентов смеси) необходим тщательный контроль пространственного размещения очагов зарождения взрывных процессов.

Во всех упомянутых ситуациях неоценимую значимость приобретает возможность прицельной, строго синхронизированной со взрывным процессом оптической регистрации газодинамических последствий теплоподвода в реагирующую среду. Здесь наибольший интерес имеют сведения о фиксации пространственного положения и о перемещении разрывных (скачки давления) или контактных (безударные разрывы температуры и плотности) поверхностей [10]. Только таким методом можно проследить пространственную ориентацию и смещение фронтов тепловыделения (горение, дефлорация, детонация) и их взаимное превращение (переход горения в детонацию, гашение детонации). Для решения поставленных задач эффективным может оказаться сочетание оптической регистрации с известными способами измерения.

Все явления взрыва, горения, детонации скоротечны и сопровождаются зарождением и движением акустических, ударных и взрывных волн. Поэтому для четкой фиксации ударных фронтов время экспозиции отдель-

ных кадров не должно быть более  $10^{-5}$  с. Для корректного описания динамики волновых движений и перемещения контактных разрывов необходимое число кадров должно приближаться к 10. Дополнительные трудности оптической регистрации связаны со свечением продуктов взрывного превращения. Так, для просвечивания очагов продуктов сгорания большинства углеводородсодержащих смесей требуются мощные импульсные источники подсветки. В противном случае необходим переход к системам с прозрачными продуктами горения.

Среди известных систем скоростной фоторегистрации указанным требованиям по быстродействию и скважности удовлетворяют камера Кранца—Шардина с искровой подсветкой при длительности экспозиции отдельного кадра  $10^{-6}$  с с числом кадров 12—24 [6] и барабанная камера [11, 12] с лазерным импульсным источником подсветки при длительности экспозиции отдельного кадра менее  $10^{-6}$  с с числом кадров до 100.

С точки зрения фактора свечения продуктов сгорания для данных исследований наиболее удобны газовые смеси водород—воздух или водород—кислород, продукты взрывного превращения которых отличаются наибольшей прозрачностью. При выборе методик визуализации следует принимать во внимание также возможность синхронной фиксации иных внешних проявлений взрывного превращения, например путем регистрации волн давления [6, 13]. Подобные комбинации оптической визуализации с барическими измерениями лучше всего реализовать применительно к неразбавленным горючим смесям, где повышение давления при горении намного превосходит уровень паразитных шумовых возмущений. В таком варианте показания датчиков давления будут полезны для синхронизации работы визуализирующих приборов [8, 14].

### Основные результаты исследований

С помощью методов визуализации и регистрации возмущений давления удалось надежно дифференци-

ровать три основных режима самовоспламенения горючих смесей. Эти режимы выявлены при фотографировании взрывных процессов в водород-кислородных [5] и водород-воздушных [6, 7, 13] смесях во взрывных камерах простейшей геометрии.

На серии фотоснимков (рис. 2), полученных с помощью камеры Кранца—Шардина [6], и типовых индикаторных диаграмм [13], зафиксированы границы существования мягкого, жесткого и переходного режимов самовоспламенения.

Ранее в [7] без специальных методов визуализации четко фиксировались только параметры жесткого режима самовоспламенения, когда с помощью системы датчиков давления еще удается определить направление движения взрывного процесса 3 (см. рис. 2) и место его зарождения (торец 1 ударной трубы 2). При мягком самовоспламенении по [7] не удается однозначно установить по диаграмме  $p = p(t)$  момент и место зарождения химических реакций, так что найденные зависимости  $\tau = \tau(T, p)$  содержат заметные ошибки в сторону увеличения запаздывания воспламенения. В итоге многие измерения при  $T < 1000$  К следует признать неточными. Кроме того, неточным оказалось и представление о фронтальном распространении волны горения при мягком режиме самовоспламенения, стартующем из нескольких спонтанных очагов. Только визуализация состояния смеси за ударными волнами показала очаговый характер мягкого режима самовоспламенения в спонтанной системе горячих точек 4 (см. рис. 2). При переходном режиме самовоспламенения визуализация выявила дистанционное появление вторичной взрывной волны 3 в пространстве между очагами первичного горения 4. Именно для переходных режимов самовоспламенения характерны наибольшие уровни барических нагрузок на элементы камеры сгорания или иные ограничивающие поверхности. Только при совместном анализе диаграмм  $p = p(t)$  и фотоснимков удалось построить карту перемещений взрывных волн 3 (в том числе и

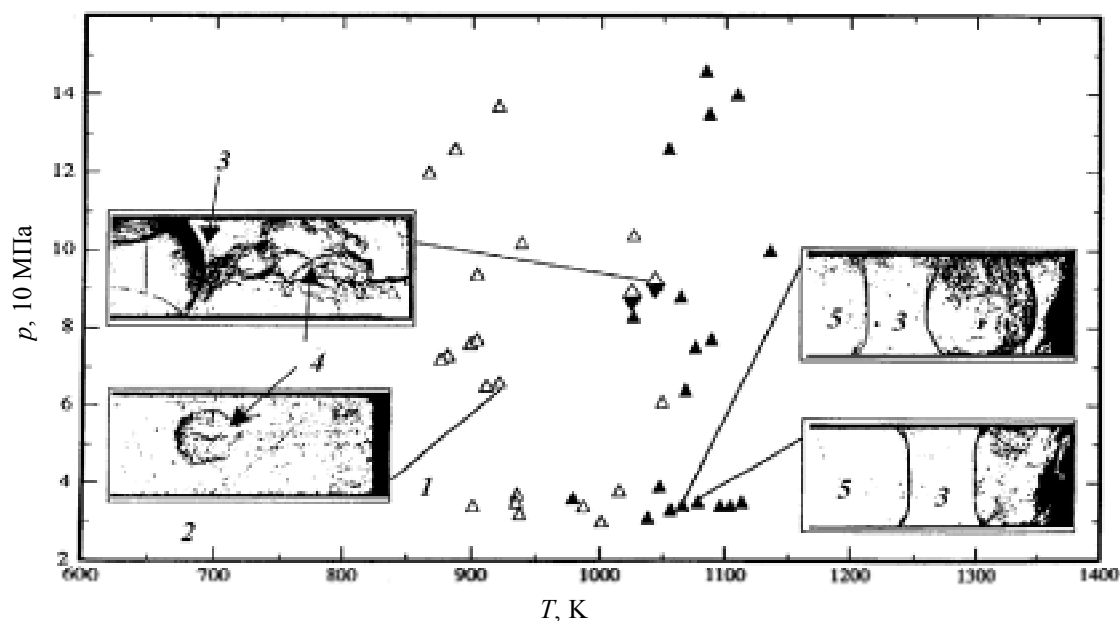


Рис. 2. Границы существования (давление—температура) различных режимов самовоспламенения смесей 15%  $H_2$  + 85% воздуха.

△ — мягкий режим, ■ — переходный режим, ▲ — жесткий режим. 1 — торец канала; 2 — стенка канала; 3 — фронт реакции; 4 — первичные очаги самовоспламенения; 5 — фронт отраженной ударной волны

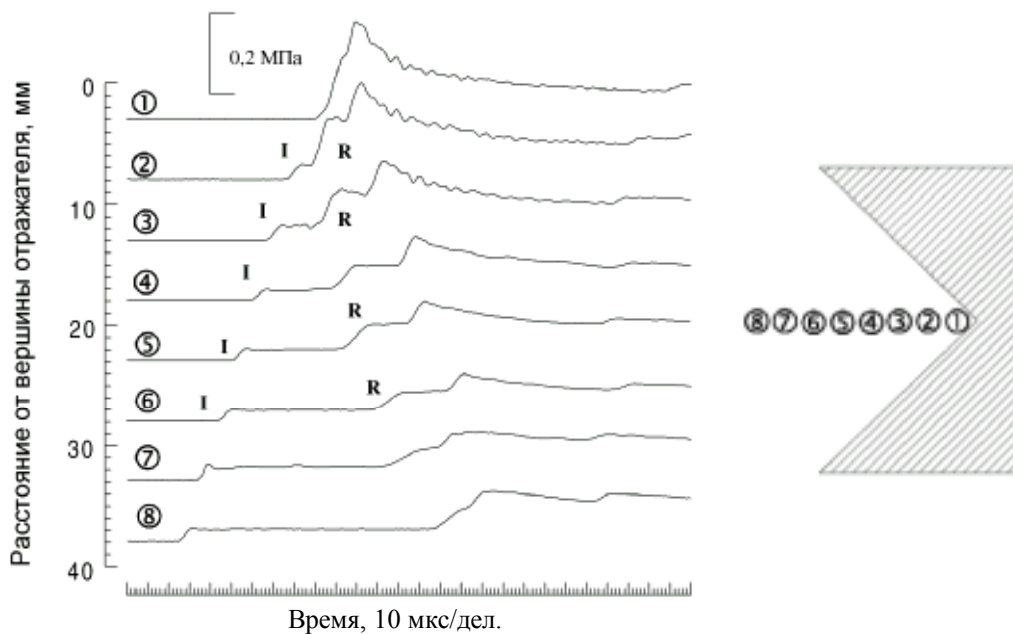


Рис. 3. Изменение давления со временем за фронтом падающей волны с числом Маха  $M = 1,8$  и отраженной волны в воздухе на разном расстоянии от вершины отражателя (клин с углом раскрытия  $90^\circ$ ):

I — фронт падающей волны, R — фронт отраженной волны

в направлении против исходного возмущения в виде отраженной волны 5). Обращаем внимание на то, что все перечисленные сведения были получены в опытах с водородсодержащими смесями. В опытах с углеводородсодержащими смесями многие детали процессов не удается различить из-за собственного свечения продуктов горения и сажевых частиц, как, например, это имеет место при горении гептана или октана [6]. Переход к наблюдениям процесса самовоспламенения газовых смесей вблизи неплоских поверхностей без визуализации происходящих явлений часто лишен смысла. Дело в том, что взаимодействие ударных или взрывных волн с неплоскими отражающими элементами определяют как фокусировку ударных волн, а изучение фокусировки ударных волн на двумерных (клин, цилиндр и т.п.) или трехмерных (конус, сфера, призма и т.д.) отражателях даже в негорючей газовой среде [12] показало на необходимость визуализации этого процесса в дополнение к стандартной фиксации диаграммы  $p = p(t)$ . Измерение только зависимости  $p = p(t)$ , проявляемой вблизи неплоских поверхностей, недостаточно для описания процесса самовоспламенения ни при каких режимах его реализации. На рис. 3 приведен набор диаграмм  $p = p(t)$ , полученных на разном удалении от вершины клина с углом раскрытия  $90^\circ$  в негорючей смеси  $15\% \text{ H}_2 + 85\% \text{ N}_2$  (эта система является газодинамическим аналогом горючей смеси  $15\% \text{ H}_2 + 85\% \text{ воздуха}$ ). Видно, что уже на расстоянии более 30 мм трудно обнаружить присутствие фокусирующего элемента. Возникновение взрывного процесса обнаруживается только при сопоставлении индикаторных диаграмм для горючей и негорючей сред с сохранением всех исходных газодинамических величин.

Накопленный опыт наблюдений [4—6, 9, 15, 16] показал, что практически любые изменения геометрии торцевых и боковых стенок камеры, где происходит самовоспламенение, отражаются на динамике взрывного превращения. Так, перфорация стенок приводит к

появлению присоединенных очагов воспламенения и качественно изменяет характер зависимости  $\tau = \tau(T)$  [4, 9]. В случае исследования самовоспламенения в каналах с фокусирующими или перфорированными элементами вообще нельзя измерить стандартные зависимости типа  $\tau = \tau(T)$ , поскольку температура газа за отраженной волной неизвестна. В таких условиях единственно возможным остается определение зависимости задержки воспламенения от числа Маха проходящей волны  $\tau = \tau(M)$ . Отметим, что такая зависимость не является общей и отражает лишь частные особенности избранной методики наблюдений.

Визуализация взрывных процессов, порождаемых фокусировкой волн давления [17—21], подтвердила существование трех ранее описанных для каналов простейшей геометрии [6, 13] режимов самовоспламенения. На подборках фотографий (рис. 4, 5 и 6) можно видеть основные детали описываемых явлений. Жесткий режим самовоспламенения [11, 12, 21] всегда зарождается в вершине фокусирующего элемента, т.е. в самой «горячей» точке горючей смеси. Место появления мягкого самовоспламенения [11, 12, 21] также смещается к расположению самой горячей точки. Переходный режим самовоспламенения [11—13, 21] реализуется в месте столкновения отраженных волн и контактных разрывов в окрестности фокусирующих элементов. Удаление зоны вторичного взрыва от вершины фокусирующего элемента, как оказалось, зависит от состава смеси и интенсивности проходящей волны. По-прежнему, при переходном взрывном процессе (см. рис. 5) создаются наибольшие нагрузки на стенки конструкции из-за отражения вторичных взрывных волн.

Мягкий режим самовоспламенения в условиях фокусировки ударных или взрывных волн [11] отличается отсутствием первичных спонтанных очагов горения. После зарождения мягкий режим воспламенения развивается в форме очага горения с причудливой искривленной поверхностью.

Полуцилиндрический рефлектор,  $R = 27$  мм

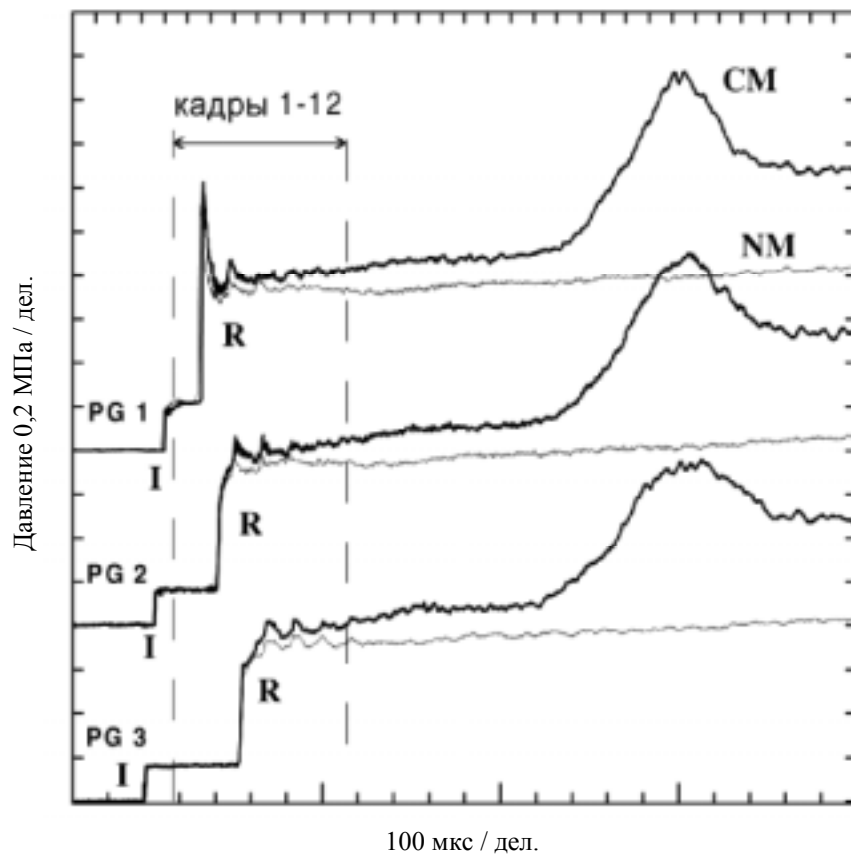
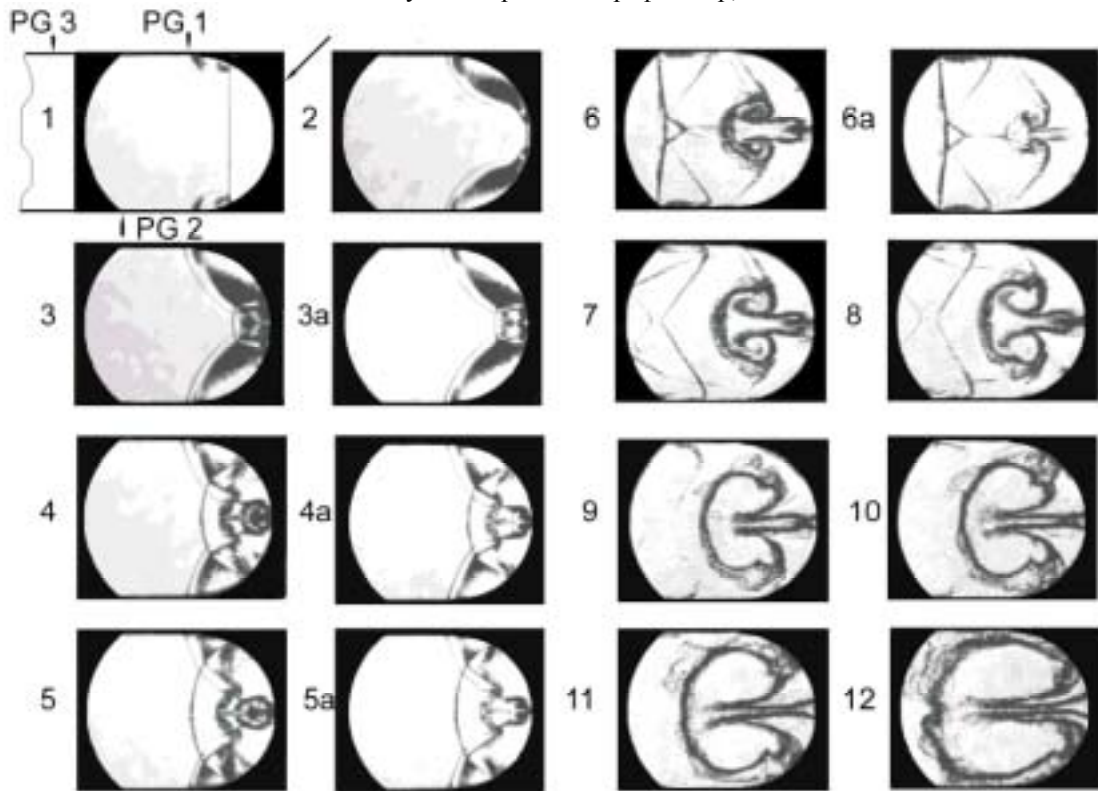


Рис. 4. Фотографии развития мягкого режима самовоспламенения и соответствующие ему индикаторные диаграммы при фокусировке ударной волны с числом Маха  $M = 2,34$  вблизи полуцилиндрического рефлектора (радиус 27 мм) в горючей смеси 15%  $H_2$  + 85% воздуха.

Кадры 1—12 и линии CM для горючей смеси. Кадры 3а—6а и линии NM для смеси 15%  $H_2$  + 85%  $N_2$ . Интервал времени между кадрами: 1-2-3-4 — 20 мкс; 4-5 — 10 мкс; 5-6 — 60 мкс; 6-7 — 30 мкс; 7-8 — 20 мкс; 8-9-10-11 — 60 мкс; 11-12 — 130 мкс. PG1, PG2, PG3 — места установки датчиков давления. I, R — см. рис. 2

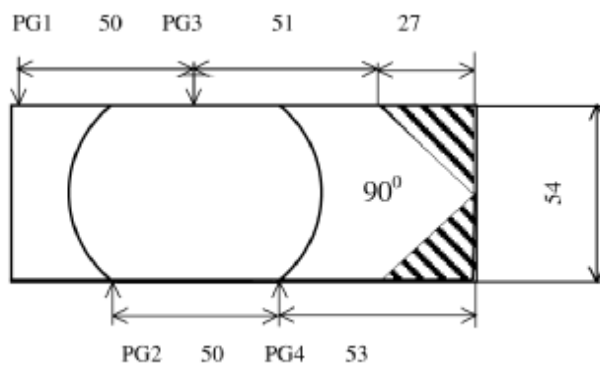
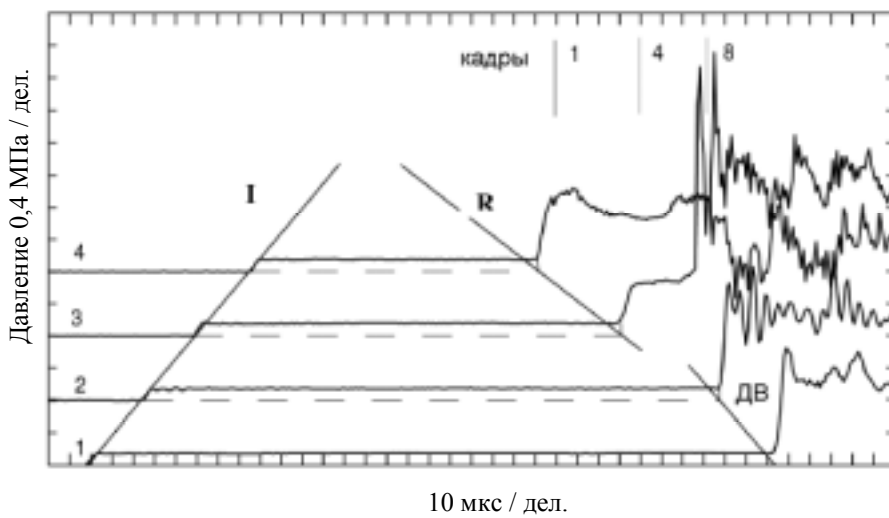
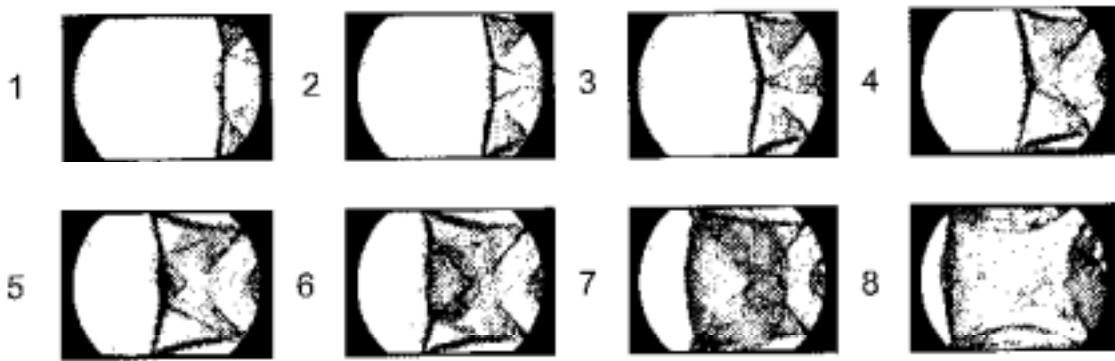
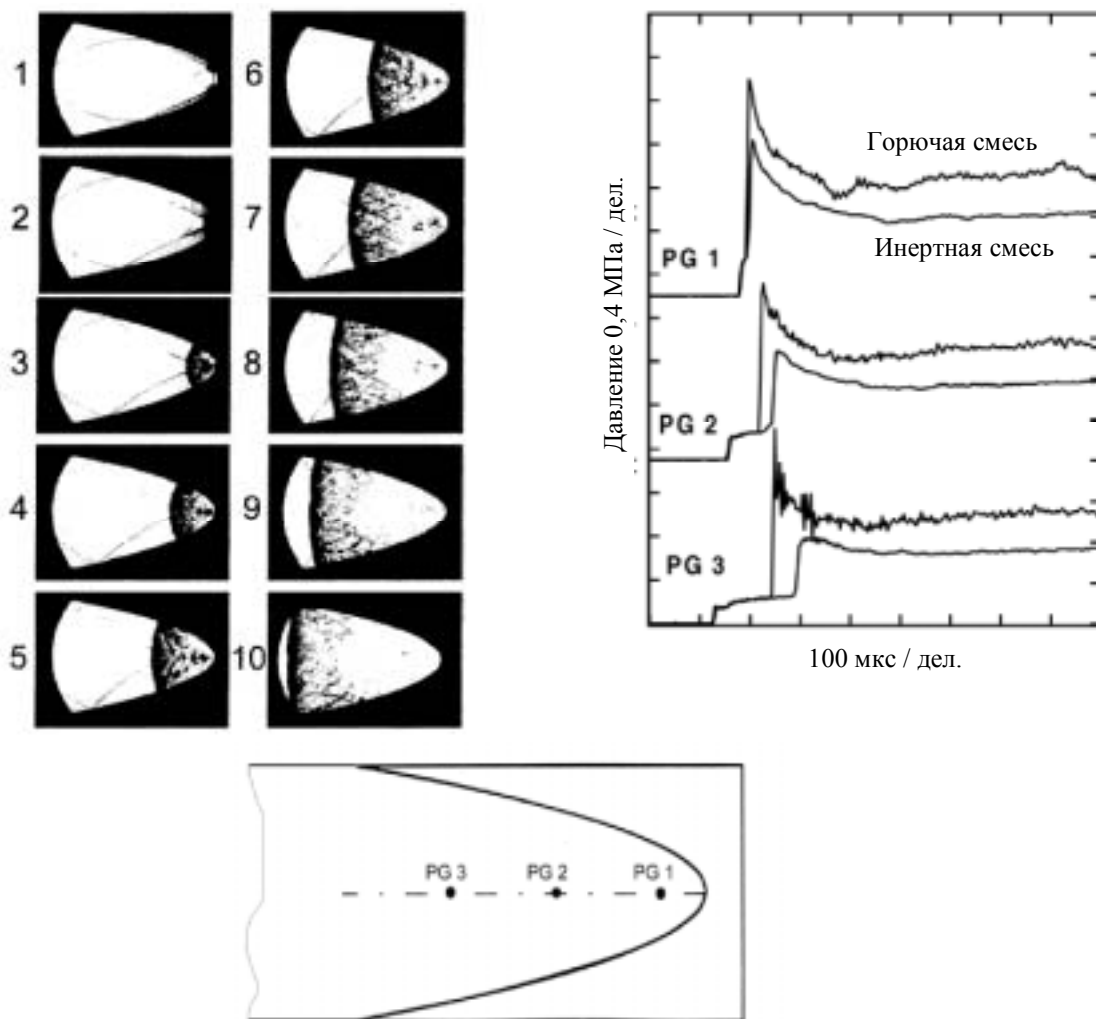


Рис. 5. Фотографии развития переходного режима самовоспламенения и соответствующие ему индикаторные диаграммы

при фокусировке ударной волны с числом Маха  $M = 2,42$  вблизи клиновидного рефлектора с углом раскрытия  $90^\circ$  в горючей смеси  $15\% \text{H}_2 + 85\% \text{воздуха}$ .

Интервал времени между кадрами 10 мкс. PG1, PG2, PG3, PG4 — места установки датчиков давления. I, R — см. рис. 2



**Рис. 6. Фотографии развития жесткого режима самовоспламенения и соответствующие ему индикаторные диаграммы при фокусировке ударной волны с числом Маха  $M = 2,47$  вблизи параболического рефлектора в горючей смеси 15%  $H_2$  + 85% воздуха.**

Интервал времени между кадрами 7 мкс. PG1, PG2, PG3 — места установки датчиков давления

Анализ результатов исследования процесса самовоспламенения при фокусировке ударных или взрывных волн вблизи двумерных или трехмерных отражателей показал полезность таких опытов для определения критических условий возникновения цилиндрической (двумерной) или сферической (трехмерной) детонации [22—26] при повышенной начальной температуре и повышенном давлении [18]. Зона повышенной температуры и повышенного давления, локализованная вблизи вершины фигурного отражателя [8, 28, 29], выполняет роль инициатора взрывного процесса в объеме горючей смеси.

Все описанные варианты визуализации самовоспламенения газовых смесей могут быть реализованы и по отношению к гетерогенным смесям типа «распыленное жидкое (пылевидное) горючее — газообразный окислитель» [9, 16]. Результаты визуализации процесса воспламенения распыленного углеводородного горючего в воздухе [16] показали, что такой процесс включает стадии распыления, испарения, смешения и химических реакций. В опытах с системами капель и струями не представляется возможным оптическими методами выделить роль отдельных стадий. Но в опытах с оди-

ночными каплями, размещение которых в пространстве зафиксировано, с помощью камеры Кранца—Шардина удается визуализировать возможные режимы взрывного превращения и описать последовательность промежуточных стадий [9].

#### **Математическое моделирование явлений фокусировки ударных волн в горючей среде**

Газодинамические аспекты рассматриваемой проблемы [22—26] описываются системой двумерных нестационарных уравнений Эйлера [10, 12]. Эта система решалась методом Лакса—Вендрова с использованием алгоритма коррекции потоков для выделения разрывных решений. Детальный механизм химических реакций включался в расчет по методу разделения по времени и с использованием пакета программ CHEMKIN-II. Расчетная область охватывала половину прямоугольной трубы и разделялась на  $324 \times 81$  ячеек. Пространственное разрешение по координатам составляло  $\Delta x = \Delta y = 0,3$  мм.

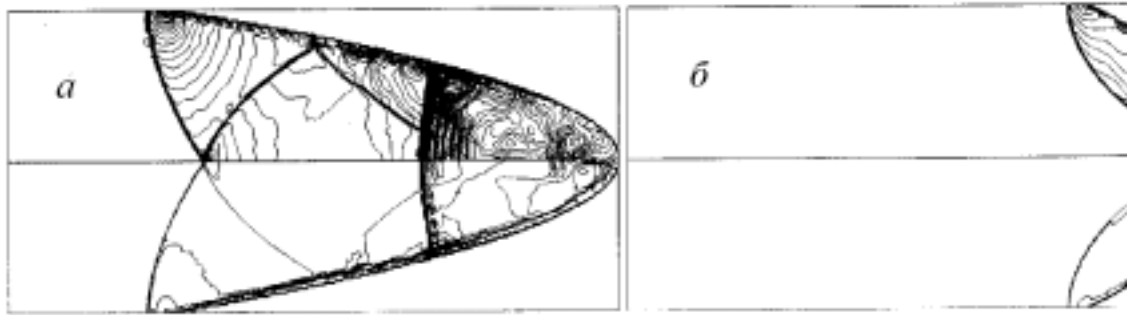


Рис. 7. Результаты расчета инициирования детонации в смеси 15%  $H_2$  + 85% воздуха при фокусировке ударной волны с числом Маха  $M = 2,4$  на «глубоком» (а) и «мелком» (б) параболических отражателях.

Верхняя половина рисунка — поле давления, нижняя половина — поле температуры

Примеры полей течения при возбуждении детонации в смеси 15%  $H_2$  + 85% воздуха вследствие фокусировки ударных волн на параболических отражателях в двух типичных случаях показаны на рис. 7. Поверхность отражателя аппроксимирована последовательной ступенчатой функцией с двойным измельчением в окрестности граничных точек. Левые граничные условия представляют втекающий конфузурный поток газа. Форма отражателя задана каноническим уравнением параболы  $y^2 = 2kx$  с фокальным параметром  $k = 0,45$  см («глубокая» парабола) и  $k = 1,35$  см («мелкая» парабола). Выбор значений параметра  $k$  отвечает двум типам отражения [12]: при  $k = 0,45$  см ударные волны, отраженные от стенок, пересекаются до момента столкновения тройных маховских конфигураций (рис. 7а), при  $k = 1,35$  см фокусировка происходит в отсутствие вторичных скачков давления (рис. 7б).

В случае глубокого параболического рефлектора воспламенение отмечается вблизи его газодинамического фокуса в точке столкновения тройных маховских конфигураций. Детонация распространяется от вершины рефлектора в диффузорном канале. Система ранее возникших отраженных волн практически не влияет на скорость детонации. Вблизи мелкого параболического рефлектора смесь воспламеняется на боковой стенке за маховской ножкой соответствующей тройной конфигурации. С уменьшением интенсивности исходной волны место зарождения детонации смещается к фокусу параболы.

Достаточно сложное течение возникает вблизи рефлектора, когда прямого инициирования детонации нет. В этом случае в системе независимо существуют исходная отраженная волна и фронт горения (рис. 8). В ка-

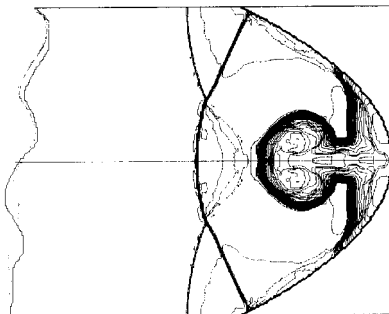


Рис. 8. Моделирование возникновения горения в смеси 15%  $H_2$  + 85% воздуха при фокусировке ударной волны с числом Маха  $M = 2,25$  на «мелком» параболическом отражателе

кой-то момент времени самовоспламенение прекращается и горение управляется мелкокомасштабным турбулентным течением и диффузией. Принципиально, что при этом не исключен переход горения в детонацию, но эти явления пока не обсуждались.

#### Практическое использование полученных результатов

В качестве одного из практически существенных результатов выполненных исследований может рассматриваться диаграмма критических условий развития взрывных процессов при фокусировке ударных волн (рис. 9). В зоне параметров 1 не наблюдается воспламенения смеси. В зоне параметров 2 реализуется мягкий режим самовоспламенения с появлением фронта быстрого горения внутри рефлектора. В зоне параметров 3 реализуется переходный режим самовоспламенения с зарождением взрывного процесса вне рефлектора и с появлением волн давления, излучаемых во всех направлениях, в том числе против фронта исходного возмущения. В зоне параметров 4 реализуется жесткий режим самовоспламенения с зарождением детонации в вершине фокусирующего элемента и движущегося с отраженной волной.

В отсутствие отражателей минимальное число Маха

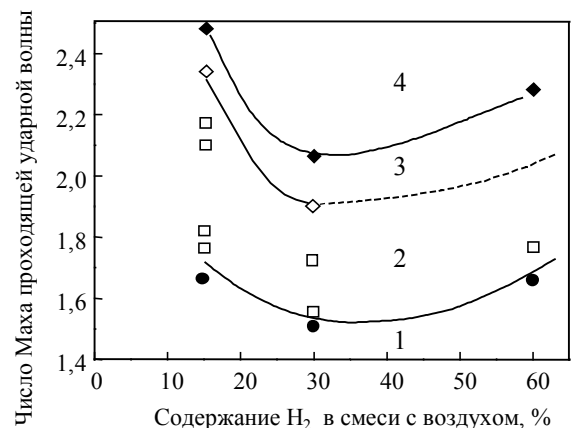


Рис. 9. Критические условия возникновения различных режимов самовоспламенения при фокусировке ударных волн:

- 1 — нет воспламенения; 2 — мягкий режим горения;
- 3 — переходный взрывной режим; 4 — жесткий режим воспламенения



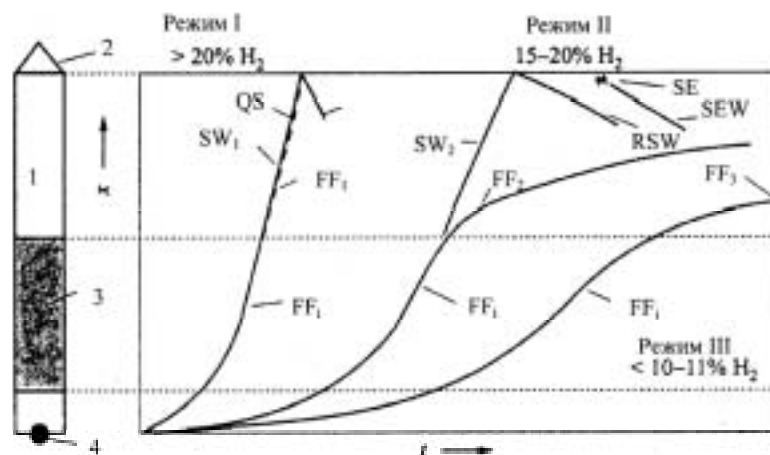


Рис. 10. Карта и схема основных взрывных процессов в загроможденном канале с неплоским концевым элементом:

1 — канал; 2 — неплоский рефлектор; 3 — загроможденный участок; 4 — воспламенитель

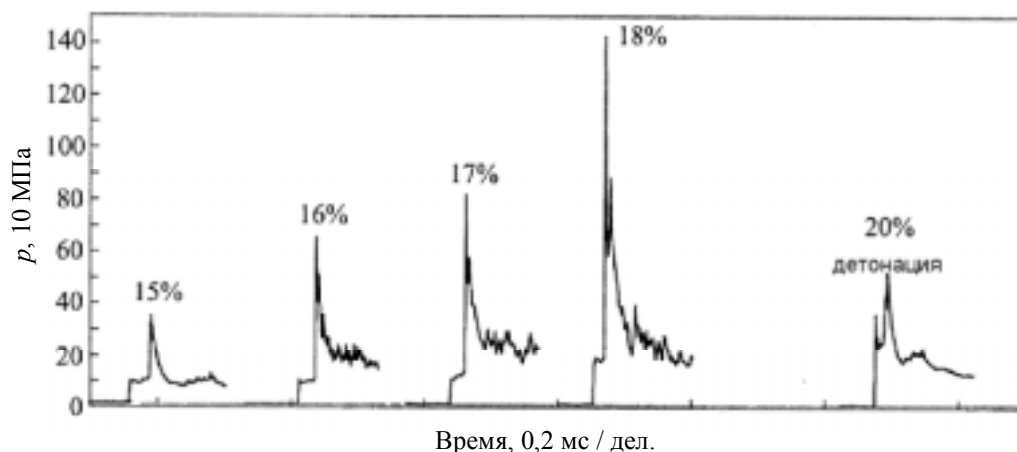


Рис. 11. Типичные разновидности взрывных нагрузок на неплоском концевом рефлекторе для водород-воздушных смесей в канале (см. рис. 10)

ударной волны, еще способной вызвать самовоспламенение, находится на уровне  $M \approx 2$ . Наличие неплоских поверхностей существенно расширяет область самовоспламенения и повышает взрывоопасность горючей смеси. Практическая демонстрация негативного влияния фокусирующих элементов на величину взрывных нагрузок показана в [30, 31]. Основной вывод из опытов [30, 31] проиллюстрирован на рис. 10 и 11.

Если в канале 1 (см. рис. 10) с неплоским концевым коническим отражателем 2, куда помещается горючая смесь, создаются условия для ускорения пламени в виде загроможденной зоны 3, то возможны три варианта развития взрывного процесса. При концентрации водорода в воздухе более 20% (режим I) после поджигания источником 4 из зоны 3 выходит незатухающая детонационная волна QS. Наличие неплоского торца никак не сказывается на величине нагрузки, воспринимаемой конструкцией. При концентрации водорода в воздухе

менее 11% при выходе из зоны 3 пламя  $FF_1$  замедляется (режим III), а интенсивность излучаемых волн давления попадает в область параметров 1 на рис. 9. В этом случае фигурный торец трубы также не оказывает влияния на величину взрывных нагрузок. Однако при содержании водорода в смеси с воздухом в пределах 15—20% из загроможденного участка 3 выходит распадающийся комплекс «ударная волна  $SW_2$ —фронт горения  $FF_2$ ». Интенсивность волны  $SW_2$  достаточна для самовоспламенения (SE) несгоревшей смеси перед фронтом пламени (режим II). При этом создаются аномально высокие нагрузки на конструкцию, что показано в наборе индикаторных диаграмм на рис. 11.

Полученные результаты могут быть использованы как для оценки взрывобезопасности различных объектов, так и при создании энергетических установок (двигатели внутреннего сгорания и т.д.).

\*\*\*

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 97-03-32041, а также при финансовой и приборной поддержке со стороны фонда Фольксваген и Исследовательского ядерного центра Карлсруэ, ФРГ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Скачков Г.И. и др. Хим. физика, 1988, т. 7, № 10, с. 1387.
2. Borisov A.A., Gelfand B.E., Skatchkov G.I. e. a. Current topics in shock waves, Proc. 17-th ISSW. Ed. Y. Kim. AIP-208, N.Y., 1990, p. 696.
3. Chan C.K., Lau D., Thibault P.A., Penrose J.D. Ibid., p. 161.
4. Gelfand B.E., Frolov S.M., Medvedev S.P., Tsiganov S.A. Proc. of 18-th ISSW, 1992, v. 2, p. 837.
5. Зайцев С.Г., Солоухин Р.И. Докл. АН СССР, 1958, т. 112, № 6, с. 1039.
6. Blumental R., Fieweger K., Komp K.H., Adomeit G. Combust. Sci. and Technol., 1997, v. 113/114, p. 137.
7. Oppenheim A.K. Phil. Trans. Roy. Soc., London, 1985, A-315, p. 471.
8. Medvedev S.P., Zukov V.V., Khomik S.V. e. a. Proc. of 22 — ISSW, CD-ROM, 1999, paper № 4410, Heidelberg; Proc of 22-nd Intern. Symp. Shock waves, Southampton Univ. press, 2000, v. 1, p. 315.
9. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Цыганов С.А., Тимофеев Е.И. Докл. АН СССР, 1985, т. 281, № 2, с. 361.
10. Breitung W., Eder A., Chan C.K. e.a. SOAR on flame acceleration and DDT in nuclear safety, OECD/NEA/CSNI/R (2000) 7, 2000.
11. Gelfand B.E., Khomik S.V., Medvedev S.P. e. a. Proc. of 22-nd ISSW, CD-ROM, 1999, paper № 0080; Proc of 22-nd Intern. Symp. Shock waves, Southampton Univ. press, 2000, v. 1, p. 309.
12. Shock wave focusing phenomena in combustible mixtures: Ignition and transition to detonation of reactive media under geometrical constrains. Proc. of the int. Workshop. Eds. H. Grenig, B.E. Gelfand. Shaker Verlag, 2000, 101 p.
13. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Хомик С.В., Бартенева А.М. Физика горения и взрыва, 1997, т. 33, № 2, с. 1.
14. Гельфанд Б.Е., Хомик С.В., Медведев С.П. и др. Докл. АН, 1998, т. 359, № 4, с. 490.
15. Gelfand B.E., Khomik S.V., Bartenev A.M., Grenig H., Olivier H. Shock Waves, 2000, v. 10, № 3, p. 197.
16. Pfahl U., Fieweger K., Adomeit G., Gelfand B.E. Proc. 20-th Intern. Symp. on shock waves, Cal. Tech. Univ., 1995, p. 301; Shock waves, World Sci., 1996, v. 2, p. 1027.
17. Gelfand B.E., Khomik S.V., Bartenev A.M. e. a. Proc. of 17-ICDERS, CD-ROM, 1999, paper № 0050.
18. Medvedev S.P., Gelfand B.E., Khomik S.V., Olivier H., Grenig H. Proc. of 17-ICDERS, CD-ROM, 1999, paper № 0024, Heidelberg.
19. Gelfand B.E., Medvedev S.P., Khomik S.V. e. a. Proc. Collog. (Intern.): Advances in experimentation and computation of detonation, ENAS Publ., 1998, p. 28.
20. Хомик С.В., Бартенева А.М., Медведев С.П. и др. Химическая физика процессов горения и взрыва. 12-й симп. по горению и взрыву, ч. 3, 2000, Черноголовка, с. 20.
21. Gelfand B.E., Khomik S.V., Medvedev S.P., Grenig H., Olivier H. Proc. of 24-th Congress (Intern.) on high-speed photography and photonics, 2000, Sendai p. 59.
22. Bartenev A.M., Khomik S.V., Gelfand B.E. e. a. Shock Waves, 2000, v. 10, № 3, p. 205.
23. Bartenev A.M., Gelfand B.E., Grenig H., Olivier H. Proc. of 22 — ISSW, CD-ROM, 1999, paper № 0080; Proc. of 22-nd Intern. Symp. Shock waves, Southampton Univ. press, 2000, v. 1, p. 179.
24. Bartenev A.M., Gelfand B.E., Khomik S.V., Olivier H., Grenig H. Proc. of 17-ICDERS, CD-ROM, 1999, paper № 0056, Heidelberg.
25. Бартенева А.М., Хомик С.В., Гельфанд Б.Е., Грениг Г., Оливье Г. Химическая физика процессов горения и взрыва. 12-й симп. по горению и взрыву, ч. 2, 2000, Черноголовка, с. 80.
26. Bartenev A.M., Gelfand B.E., Medvedev S.P., Khomik S.V., Grenig H., Olivier H. Proc. of 7-th SIAM Conf. on numerical combustion, York, UK, 1999, p. 148.
27. Бартенева А.М., Гельфанд Б.Е., Грениг Г. и др. Изв. АН, Механика жидкости и газа, 1999, № 2, с. 120; Fluid dynamics, 1999, v. 34, № 2, p. 258.
28. Medvedev S.P., Polenov A.N., Gelfand B.E., Khomik S.V. Abstr. 20-th ISSW, 1995, Calif. Inst. of Technology, Pasadena, p. 131.
29. Gelfand B.E., Khomik S.V., Medvedev S.P. e. a. Abstr. 20-th ISSW, 1995, Calif. Inst. of Technology, Pasadena, p. 251.
30. Gelfand B.E., Medvedev S.P., Khomik S.V. e. a. Archivum combustionis, 1998, v. 18, № 1—4, p. 105.
31. Gelfand B.E., Medvedev S.P., Khomik S.V. e. a. Proc. Symp. (Intern.) on hazards, prevention and mitigation of industrial explosions, Safety Cons. Eng., 1998, v. 2, p. 434; In: Gaseous and heterogeneous detonations, Eds. G. Roy e. a., ENAS Publ., M., 1999, p. 213.