

М 497897

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ
Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени Государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи
УДК 533.952:621.373

ЛЮБЧЕНКО ФЕДОР НИКОЛАЕВИЧ

РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН
В ГАЗОВО-ПЛАЗМЕННЫХ СМЕСЯХ

(01.04.14 - теплофизика и молекулярная физика)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1990

Работа выполнена в ордена Ленина и ордена Октябрьской
Революции Центральном Научно-Исследовательском Институте
Машиностроения

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
профессор ПРОТАСОВ Ю. С.

Официальные оппоненты - доктор технических наук
КОЗИНЦЕВ В.И.

кандидат технических наук
АЛЕКСЕЕВ В.А.

Ведущее предприятие - Филиал Института Атомной Энергии

Защита состоится "20 июня 1991 года в 15³⁰ часов
на заседании специализированного Совета по энергетическим
установкам К.053.15.08 Московского Государственного Технического
Университета имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва,
"Энергомашиностроение".
... в библиотеке

_____ 1991г.
заверенные печатью, просьба
2-я Баумановская улица,
К.053.15.08.



КУТУКОВ Д.Н.

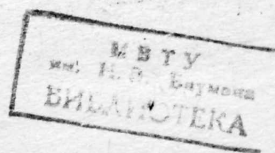
... 01. 91г. Тир. 100экз.
ГТУ им. Н.Э. Баумана.

Актуальность проблемы. Одним из перспективных направлений развития источников излучения видимого-ультрафиолетового областей спектра является разработка технического облика и исследование физических процессов в световых источниках на основе излучающих плазменных образований. Практический интерес к ним обусловлен тем, что их излучение отличается широким динамическим диапазоном спектральных характеристик (от широкополосных до селективных спектров излучения), большими яркостными температурами и высокими пиковыми мощностями излучения. Источники имеют также высокие значения световых КПД.

Такое сочетание характеристик обусловлено ударно-волновым механизмом нагрева плазмы, не имеющим прямых ограничений сверху на уровень достигаемых температур вещества. Устройства на основе излучения ударно-нагретых плазменных образований могут быть использованы при решении ряда актуальных задач квантовой электроники, в экспериментах по комбинированному-плазменному, ударно-волновому и радиационному воздействию на конденсированные среды, в фотохимии и фотолитографии.

В практических применениях наиболее часто используется электрический способ ввода в газовую среду в основном у устройствах типа магнитоплазодинамический компрессор. Несмотря на высокие излучательные характеристики различного рода электроразрядных плазодинамических источников (ЭПДИ) излучения они имеют ряд недостатков. В первую очередь к недостаткам ЭПДИ надо отнести их большую суммарную с блоком питания сложность и малый полный КПД преобразования энергии химической связи в световое излучение по циклу: энергия химической связи — тепловая машина — электрогенератор — линии электропередачи — блок питания электроплазодинамического источника света — плазодинамический источник — световой КПД излучающего газа. Суммарный КПД такого цикла не превышает 1...3%.

В отличие от электроразрядных плазодинамических источников излучения детонационные источники излучения обладают предельной простотой конструкции и независимостью от внешних источников энергопитания. Детонационные излучатели характеризуются высокими



76876414

достигнутыми яркостными температурами до $T \sim 1,5 \cdot 10^5$ К и малостадийностью преобразования энергии химической связи в световое излучение и, следовательно, высоким полным КПД преобразования энергии химической связи в световое излучение (до 30%). Такие параметры реализуются при детонации конденсированных взрывчатых веществ. Принципиальным недостатком таких источников составляет то, что они являются источниками одноразового пользования, и то, что при их эксплуатации необходимо использовать специальные средства защиты. Этих недостатков лишены детонационные излучатели на основе взрыва в газовых детонирующих смесях. В таких ДИ взрыв происходит внутри упрочненного корпуса ДИ, рассчитанного на предельные ударные нагрузки. Это позволяет без специальных мер безопасности эксплуатировать такие ДИ в любых условиях. Недостатком ДИ на основе детонации газовых взрывчатых смесей являются ограниченные яркостные температуры излучения, лишенные сверху полной энергией химической связи в газовой среде. Температура процесса газовой детонации не превышает в стандартных условиях $T = 3,5 \cdot 10^3$ К.

Цель работы. Целью данной работы является экспериментальные и теоретические исследования возможности создания высокояркостного и высокоэффективного источника светового излучения на основе детонации газовых смесей, экспериментальные исследования физических и технических способов увеличения яркостной температуры излучения в процессе газовой детонации, экспериментальные исследования спектральных свойств излучения газовой детонации, теоретический анализ радиационно-газодинамических процессов и разработка на этой основе источников излучения различной яркости и спектрального состава.

В диссертации решались следующие задачи:

1. Исследование возможности и перспектив создания высокоэффективного светового источника на основе излучения взаимодействующих цилиндрических детонационных волн в газовой-плазменных смесях.

2. Экспериментальные исследования газодинамических характеристик процессов при цилиндрическом столкновении последовательно движущихся двойных детонационных волн (каскадный тройной взрыв) в газовой-плазменных смесях различного состава и давления.

3. Теоретический анализ термодинамических параметров газовой смеси в последовательных фазах каскадного тройного взрыва.

4. Экспериментальные исследования радиационных свойств каскадного тройного взрыва в газовой-плазменной смеси различного состава: исследование селективных характеристик излучения каскадного тройного взрыва.

5. Определение технического облика и разработка источников излучения на основе цилиндрического столкновения детонационных волн в газах.

Научная новизна основных положений диссертации заключается в следующем:

1. Показана возможность создания высокоэффективного $\sim 8...17\%$ источника излучения при тройном взрыве в ацетилено-кислородной смеси с яркостной температурой $\sim 10^4$ К.

2. Экспериментально исследованы физические процессы при цилиндрическом столкновении двух последовательно движущихся в ацетилено-кислородных смесях детонационных волн.

3. Экспериментально исследованы радиационные и селективные характеристики излучения фокальных областей тройного взрыва в ацетилено-кислородных смесях различного состава, обнаружено отклонение интенсивности излучения молекулярной полосы ацетилена от термодинамически равновесного излучения.

4. Теоретически рассчитаны термодинамические параметры газовой среды в последовательных фазах тройного взрыва и проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами.

5. Разработаны, изготовлены и испытаны источники излучения на основе последовательного цилиндрического столкновения детонационных волн в газах.

Практическая ценность работы состоит в следующем.

1. Разработаны и практически отработаны устройства для реализации режима исследовательского цилиндрического столкновения двух детонационных волн в процессе газовой детонации (каскадный тройной взрыв) в ацетилено-кислородных смесях.

2. Разработана теоретическая аналитическая модель расчета термодинамических параметров газовой среды в последовательных фазах тройного взрыва, позволяющая по начальным давлению, температуре и составу исходной детонирующей газовой смеси определять термодинамические параметры продуктов детонации.

3. Разработан методический подход для создания на основе процесса цилиндрического столкновения детонационных волн генераторов узкополосного излучения с высоким (8...17%) КПД преобразования энергии химической связи в световое, в том числе и ультрафиолетовое излучение.

4. Разработаны конструкции детонационных излучателей, реализующие различные режимы цилиндрического столкновения детонационных волн в газах.

5. Определены основные факторы, определяющие ресурс работы детонационного излучателя.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты экспериментальных исследований характеристик детонационных источников излучения.

2. Результаты экспериментального исследования термодинамических и газодинамических параметров продуктов газовой детонации при последовательном цилиндрическом столкновении детонационных волн в газовой-плазменных смесях (каскадный тройной взрыв).

3. Результаты экспериментальных исследований энергетических и спектральных свойств излучения каскадного тройного взрыва в газовой-плазменных смесях.

4. Теоретическая аналитическая модель расчета термодинамических параметров продуктов детонации в каскадном тройном взрыве в газовой-плазменных смесях.

Достоверность и обоснованность основных научных положений заключается в том, что они являются результатами прямых измерений с использованием современных измерительных средств и аппаратуры и подтверждаются различными независимыми экспериментальными методами, а полученные теоретические выводы достаточно хорошо согласуются с имеющимися и полученными в данной работе экспериментальными результатами.

Реализация работы. Устройства детонационных излучателей, методы расчета термодинамических параметров газовой среды продуктов детонации в тройном взрыве используются на отраслевом предприятии. Конструкции детонационных излучателей защищены авторскими свидетельствами.

Апробация работы. Диссертационная работа заслушана на заседании кафедры "Плазменные энергетические установки" МГТУ имени Н.Э.Баумана 18.05.1990 года. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на I Всесоюзном Симпозиуме по радиационной плазмодинамике (Джан-Туган, 1989 год), Всесоюзной конференции "Современные проблемы физики и ее приложения" (Москва, 1990 год), конференции Физического общества ЦНИИМаш, а также на семинарах лаборатории "Прикладная синергетика" МГТУ им.Н.Э.Баумана.

Публикации. Основные положения диссертации в 9 печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. В работе страниц основного текста , , страницы с иллюстрациями, 3 таблицы и список литературы, включающий 108 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность поставленной задачи. Дано изложение новизны в проведенных исследованиях и указаны основные положения, которые выносятся на защиту. Представлено краткое описание структуры работы.

В первой главе диссертации проведен анализ работ по наиболее распространенным способам получения излучающих плазмодинамических образований. Показаны преимущества и недостатки указанных способов.

Отмечено, что наиболее распространенный способ создания излучающих плазменных образований посредством различного рода магнитоплазменных компрессоров, сочетающий в себе электрический способ накопления и ввода энергии в среду и ударно-волновой механизм нагрева плазмы, обладает существенной технической громоздкостью и малым (1...2%) полным КПД преобразования энергии химической связи в световое излучение по циклу: энергия химической связи - горение - тепловая машина - электрогенератор - линии электропередачи - блок питания плазмодинамического источника света - плазмодинамический источник - световой КПД плазмодинамической структуры. Кроме того, с ростом вкладываемой в разряд энергии растет эрозия электродов электроразрядных плазмодинамических источников излучения, что также существенно уменьшает их ресурс работы.

Отмечено, что детонационные излучатели на основе взрыва конденсированных взрывчатых веществ, имеющие яркостные температуры излучения до $T \sim 1,5 \cdot 10^5 \text{ K}$, принципиально являются устройствами одноразового использования. В многоразовых детонационных излучателях на основе детонации газообразных компонентов яркостная температура процесса не превышает $T \approx 3,5 \cdot 10^3 \text{ K}$ для самой энергонасыщенной кислородно-водородной смеси.

Анализ ранее проведенных работ показал, что увеличение светимости продуктов газовой детонации без увеличения энерговклада в среду возможно при столкновениях детонационных волн, при последовательном (каскадном) воздействии скачков плотности на газовую среду продуктов детонации, а также в случае последовательных во времени энерговыделений в детонирующей среде многократный взрыв. Показано, что при цилиндрическом схождении двух последовательных скачков плотности (каскадный тройной взрыв) реализуются все три механизма увеличения яркостной температуры процесса (см. рис. I).

Сделан вывод, что оптимальной газовой смесью для моделирования режима тройного взрыва является ацетилено-кислородная смесь, где легко формируются последовательно распространяющиеся детонационные волны.

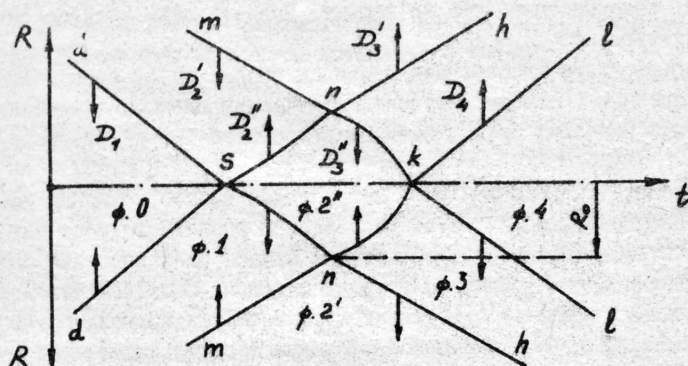


Рис. I Схема фотохронограммы каскадного тройного взрыва

Во второй главе диссертации рассмотрены экспериментальные условия по осуществлению цилиндрически сходящихся детонационных волн и регистрации их характеристик.

Эксперименты проводились с двумя основными ацетилено-кислородными смесями: стехиометрической и смеси в соотношении $C_2H_2/O_2 = 1/3$. Для каждой из смесей исследовалось влияние малых (до 5% от концентрации) добавок воды и аргона. Давление исходной смеси изменялось в диапазоне $P_0 = 100 \dots 2000$ Па. Шаг изменения давления составлял в различных экспериментах величину $\Delta P_0 = 25 \dots 100$ Па. Стабильность концентрационных соотношений в пределах одной серии экспериментов достигалась тем, что газовая смесь с требуемыми концентрационными соотношениями готовилась заранее, последовательно напуская в смеситель компонентов до требуемых парциальных давлений.

Экспериментально, методами слеодографии и фотохронографии, определена область существования каскадного тройного взрыва. Такой взрыв реализуется при толщине дискообразной рабочей полости $T = 3$ мм и рабочих давлениях взрывчатой ацетилено-кислородной смеси $P_0 \geq 200$ Па.

Приведено описание измерительно-диагностического комплекса для исследования радиационных свойств фокальных областей цилиндрически сходящихся детонационных волн, в том числе для регистрации спектральных характеристик излучения при помощи цифровых измерительных систем. Дано описание методик автокалибровки измерительной системы по длинам волн излучения, определения спектральной чувствительности измерительного тракта и методик абсолютной энергетической калибровки измерительного тракта. Представлена схема цифровой обработки измерительной спектральной информации, а также схема временной синхронизации измерительного комплекса с реальным экспериментом.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований термодинамических параметров газовой среды продуктов детонации, каскадно сжатой в цилиндрических скачках плотности, а также теоретическая аналитическая модель расчетов этих термодинамических параметров.

Экспериментально измерены скорости скачков плотности в каскадном тройном взрыве при начальных давлениях $P_0 = (0,2 \dots 2,0) \cdot 10^5$ Па. Шаг измерения ΔP_0 в экспериментах составлял $\Delta P_0 = 10^4$ Па при $P_0 < 1,2 \cdot 10^5$ Па и $\Delta P_0 = 4 \cdot 10^4$ Па при $P_0 \geq 1,2 \cdot 10^5$ Па. Начальная температура процесса составляла $T_0 = 300$ К. Эксперименты проводи-

лись со стехиометрической ацетилено-кислородной смесью. Скорости скачков плотности регистрировались в двух координатных областях процесса: при $R = 0,2 R_0$ и $R = 2,0 R_0$, где R_0 — радиус кругового и фокуса процесса, составляющего в экспериментах величину $R_0 = 6,5 \dots 7,5$ мм. Регистрация скоростей скачков плотности производилась по фотохронограммам процесса усреднением 5...7 измерений, а также для первого скачка плотности прямыми зондовыми измерениями посредством ионизационных датчиков, расположенных по диаметру цилиндрической рабочей камеры через 1 мм.

Отметим, что скорость первого детонационного скачка плотности ds , меняющаяся в процессе экспериментов от 2150 м/с до 3350 м/с при изменении начального давления p_0 от $0,3 \cdot 10^5$ Па до $2,3 \cdot 10^5$ Па, превышает в среднем в 1,15 раза скорость свободной детонационной волны при тех же давлениях. Это указывает на то, что детонационная волна ds приобретает черты перескаковой детонационной волны.

Экспериментально исследовано также поведение скоростей скачков плотности во времени протекания процесса. Обнаружено, что при $p_0 > 0,3 \cdot 10^5$ Па в окрестности фокуса S процесса тройного взрыва, при $R < 0,15 R_0$, скорость скачка плотности нелинейно увеличивает свою скорость и достигает величины, превышающей в 2...3 раза скорость детонационного скачка плотности вдали от фокуса S . Это указывает на то, что в окрестности фокуса S детонационный скачок плотности ds становится сильно перескаковым, т.е. его можно рассматривать как ударную волну с энерговыведением во фронте волны.

Анализ временного поведения скоростей D_2' и D_2'' показал, что скорость D_2'' второго скачка плотности непостоянна во времени, а отраженный от фокуса S скачок плотности sn увеличивает свою скорость и к моменту $\dots$, когда скачки плотности sn и mn сталкиваются, они при всех исследованных давлениях $p_0 = (0,2 \dots 2,0) \cdot 10^5$ Па, имеют одинаковые скорости. Это говорит о том, что скачки плотности mn и sn имеют детонационную природу. Все остальные скачки плотности можно рассматривать как ударные волны со слабым энерговыведением в их фронтах.

Расчет термодинамических параметров p_i , p_e и T_i газовой среды в последовательных фазах тройного взрыва, а также чисел Маха — M_i — скачков плотности и c_i — скоростей звука в среде —

производился по мгновенным значениям D_i скачков плотности, определенных экспериментально. Расчеты производились в адиабатическом приближении без учета кривизны скачка плотности в расчетных областях.

Расчет термодинамических параметров за фронтом скачков плотности производился последовательно по фазам i каскадного тройного взрыва:

$$\frac{T_{i+1}}{T_i} = \frac{4\beta_i - (\beta_i - 1)^2}{(\beta_i + 1)^2} - \frac{2(\beta_i - 1)}{(\beta_i + 1)^2 M_{i+1}^2} + \frac{2\beta_i(\beta_i - 1) M_{i+1}^2}{\beta_i + 1}$$

$$M_{i+1} = D_{i+1} / C_i$$

$$C_i = (\beta_i R T_i / \mu_i)^{1/2} = (\beta_i p_i / \rho_i)^{1/2}$$

$$\mu_i = (\sum_k g_k \mu_k) / \sum_k g_k$$

$$\frac{p_{i+1}}{p_i} = \frac{\beta_i M_{i+1}^2 + 1}{\beta_{i+1} + 1} + \left[\left(\frac{\beta_i M_{i+1}^2 + 1}{\beta_i + 1} \right)^2 + \frac{2\beta_i M_{i+1}^2 (\beta_i - \beta_{i+1})}{(\beta_{i+1} + 1)(\beta_i + 1)} - \frac{2\beta_i M_{i+1}^2 - (\beta_{i+1} - 1)}{\beta_{i+1} + 1} \right]^{1/2}$$

$$\frac{p_{i+1}}{p_i} = \frac{1 + \beta_{i+1}^2 [2\beta_i M_{i+1}^2 (\beta_i + 1)^{-1} + \beta_i]}{4\beta_i / (\beta_i^2 - 1) + 2\beta_i M_{i+1}^2 (\beta_i + 1)^{-1}}$$

$$\beta_i = [(\beta_i - 1) / (\beta_i + 1)]^{1/2}$$

где i - индекс фаз тройного взрыва ($i = 1, 2, 3, 4$); β_i - показатель адиабаты среды в фазе i ; M_i - число Маха скачка плотности; C_i - скорость звука в фазе i ; μ - молекулярный вес газовой смеси; R - универсальная газовая постоянная.

Также рассчитывалось абсолютное (химическое) энерговыделение в скачке плотности:

$$Q = \left(\frac{p_i}{p_i} \right)^2 \frac{(D_{i+1}^2 p_i / p_i - \beta_i)^2}{2(\beta_i + 1)(\beta_i - 1) D_{i+1}^2}$$

В расчетах принималось во внимание изменение химического состава смеси в процессе химической реакции окисления ацетилена и при начале диссоциации продуктов реакции с увеличением температуры в последних фазах каскадного тройного взрыва, а также изменение значений показателя адиабаты γ_i с изменением температуры, давления и химического состава смеси во всех фазах каскадного тройного взрыва.

Расчетные зависимости термодинамических параметров среды от начального давления для всех фаз каскадного тройного взрыва показали, что в последней фазе тройного взрыва можно ожидать увеличения давления среды до 10^3 раз, температуры до $(0,9...1,1) \cdot 10^4$ К, плотности среды в $8...10$ раз.

Экспериментальная проверка теоретических расчетов прямыми измерениями давления в скачках плотности, произведенными пьезоэлектрическими датчиками давления, показали хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Отмечено, что экспериментальные данные превышают расчетные на $20...30\%$, что, по-видимому, связано с тем, что в расчетах не учитывалась кривизна фронта взаимодействующих скачков плотности. Отмечено также, что существенное расчетное энерговыделение Q свойственно скачкам плотности ds , mn и sn , что подтверждает ранее сделанное утверждение о детонационной природе этих скачков плотности. Энерговыделение же во всех остальных скачках плотности в $15...20$ раз меньше.

Подробный теоретический анализ влияния фокусов столкновений на термодинамические параметры газовой среды продуктов детонации, произведенный при учете природы каждого из скачков плотности (детонационный или ударный в зависимости от фазы каскадного тройного взрыва) показал, что в фокусах давление P_f составляет величину, в $2...3$ раза превышающую давление за соответствующим скачком плотности, распространяющимся из этого фокуса. Область повышенного давления не превышает размер $R < 0,2 R_0 = 0,3...0,4$ мм, за пределами которой состояние газовой среды можно с большой точностью рассчитывать по мгновенным значениям скоростей D_i скачков плотности, измеренных экспериментально. Экс-

периментальные измерения давления в фокусах P_0^2 подтвердили этот вывод.

Отмечено также, что построенная модель расчетов термодинамических параметров среды является аналитической, что является наиболее приемлемым для практических применений. Расчетные зависимости аппроксимированы аналитическими формулами в виде степенных зависимостей параметра от начального давления, что удобно для инженерных применений.

В четвертой главе диссертации представлены экспериментальные результаты по исследованию свойств излучения каскадного тройного взрыва.

Экспериментально исследовано пространственное распределение интегрального во времени энергетического потока излучения E из фокальных областей каскадного тройного взрыва в спектральном диапазоне 350...850 нм. Выявлено, что несмотря на существенную пространственно-временную неоднородность процесса каскадного тройного взрыва пространственное распределение энергетического потока из дискообразной полости интегрально во времени однородно. Область свечения ограничена размерами $R_c < 2,2 R_0$, где R_0 - радиус кругового фокуса процесса. За пределами R_c интенсивность свечения резко падает и энергия, излучаемая из области $R > R_c$, не превышает 10% от всей излученной энергии при всех исследованных давлениях $P_0 = (0,2...2,0) \cdot 10^5$ Па.

Регистрация оптических спектров излучения из присоевой области каскадного тройного взрыва, проведенная в спектральном диапазоне 200...1000 нм показала, что спектр излучения каскадного тройного взрыва является суперпозицией непрерывного излучения низкотемпературной плазмы продуктов детонации ацетилено-кислородной смеси, нагретой в процессе химической реакции и при каскадном воздействии скачков плотности на газовую среду, а также из линейчатого излучения электродно-возбужденных компонентов (молекул, радикалов, примесных атомов и др.), возбуждаемых в газовой среде как за счет столкновений, так и в процессе химических реакций. В спектре излучения фиксируются линии радикала OH - 308 нм, молекулы C_2^+ (центр полосы 550 нм) и молекулы C_2H_2 (максимум полосы свечения - 623 нм). Заметна слабая полоса радикала (CH - 431,5 нм) и свечение примесных атомов (Na - 589 нм и 590 нм) и (K - 766 нм и 770 нм) на дублетах.

Сравнение экспериментально зарегистрированных спектров свечения каскадного тройного взрыва в ацетилено-кислородных смесях и спектра свободной детонации в трубах для одних и тех же давлений и составов газовой смеси показало, что в первом случае излучение радикала OH^- в 6...7 раз сильнее, чем в режиме свободной детонации, что позволяет сделать вывод о применимости режима тройного взрыва для создания источников селективного ультрафиолетового излучения. Отмечено, что излучение атомов Na и K связано в основном с эрозией выходного окна цилиндрической рабочей камеры и свечение дублета Na растет на порядок после 7...8 пусков экспериментальной модели.

Экспериментально исследовано поведение интенсивности свечения молекулярных полос радикала $\lambda = 308 \text{ нм}$ и молекулы ацетилена - 623 нм , расположенных в ультрафиолетовом и видимом участках спектра соответственно от начального давления газовой смеси. Отмечено, что интенсивность свечения радикала OH^- находится в равновесии с химическим энерговыделением Q в среде. Интенсивность свечения полосы 623 нм молекулы C_2H_2 растет более быстро, чем энерговыделение Q в среде и дополнительно имеет ярко выраженный максимум свечения в диапазоне давлений $p_0 = (0,3...0,45) \cdot 10^5 \text{ Па}$, как для стехиометрической ацетилено-кислородной смеси, так и для смеси $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2$. Сделан вывод о том, что основным механизмом возбуждения электронных состояний молекулы C_2H_2 по крайней мере вне области аномальной светимости ($300...450 \text{ ГПа}$) является столкновительный механизм возбуждения и интенсивность свечения C_2H_2 на полосе $\lambda = 623 \text{ нм}$ находится в равновесии с мгновенной температурой T_2 фазы процесса. Обнаружено, что форма пика аномальной светимости полосы $\lambda = 623 \text{ нм}$ C_2H_2 сильно зависит от наличия паров воды в исходной смеси. Так, для чистой смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{ O}_2$ в зависимости $I_\lambda(p_0)$ при $p_0 = 350...400 \text{ ГПа}$ фиксируется резкий спад интенсивности свечения, не наблюдаемый в смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{ O}_2 + 5\% \text{ H}_2\text{O}$. Сделан вывод о том, что провал в зависимости $I_\lambda(p_0)$ может быть связан с самоэкранировкой излучения на полосе излучения $\lambda = 623 \text{ нм}$ молекулы C_2H_2 .

Экспериментально регистрировались временные зависимости интенсивности свечения фокальных областей тройного взрыва. Выявлено, что молекулярные полосы молекул и радикалов излучают в

основном в начальных фазах каскадного тройного взрыва, согласно теоретическим расчетам наблюдается минимальная температура процесса.

Экспериментально зависимости интегральной излученной энергии E в спектральном диапазоне 350...850 нм для двух ацетилено-кислородных смесей: $C_2H_2 + 2,5 O_2$ и $C_2H_2 + 3 O_2$ демонстрируют в пределах $p_0 = (0,2...1,0) \cdot 10^5$ Па линейную зависимость E от p_0 и, следовательно, от химического энергосвечения Q в среде. При $p_0 > 1,0 \cdot 10^5$ Па в зависимости $E(p_0)$ наблюдается тенденция к насыщению, связанная, по-видимому, с началом экранировки излучения. Отмечается, что E для смесей $C_2H_2 + 2,5 O_2$ в 2...3 раза больше, чем E для смеси $C_2H_2 + 3 O_2$, что возможно связано с ранее отмеченной существенной ролью молекулы C_2H_2 в процессе излучения.

По измерениям интегральной излучаемой энергии E и энергозапасу химической энергии Q в среде определен полный КПД преобразования Q в световое излучение, составивший 8...17 % в диапазоне $p_0 = (0,2...2,6) \cdot 10^5$ Па. Обращается внимание на то, что такие значения КПД приближаются к значениям световых КПД в детонационных излучателях на твердых ВВ и на порядок больше полного КПД для электроразрядных плазмодинамических источников света.

По спектральному распределению излучения в непрерывном континuumе излучения фокальных областей каскадного тройного взрыва в ацетилено-кислородных смесях рассчитывалась яркостная температура процесса, составляющая величину $T' = (0,9...1,0) \cdot 10^4$ К в диапазоне давлений $p_0 = (0,2...1,0) \cdot 10^5$ Па. Отмечено, что в области аномальной светимости полосы $\lambda = 623$ нм C_2H_2 , составляющей $p_0 = (0,3...0,45) \cdot 10^5$ Па наблюдается падение T' с $T' = 10^4$ К при $p_0 = 0,3 \cdot 10^5$ Па до $T' = 0,9 \cdot 10^4$ Па при $p_0 = 0,45 \cdot 10^5$ Па.

Произведен анализ возможных механизмов аномальной светимости полосы $\lambda = 623$ нм C_2H_2 . Показано, что все области давлений $p_0 = (0,3...0,45) \cdot 10^5$ Па излучение $\lambda = 623$ нм C_2H_2 находится в равновесии с термодинамической температурой T_1 первой фазы каскадного тройного взрыва. Эффективная же температура процесса в пике интенсивности при $p_0 = 0,4 \cdot 10^5$ Па составляет $T'' = (1,4...1,6) \cdot 10^4$ К, что существенно выше любой из термодинамических температур T_i последовательных фаз тройного взрыва. Показа-

зано также, что аномальное излучение молекулы C_2H_2 не может быть объяснено только дореагированием ацетилена в послесвечении цилиндрического столкновения детонационных волн.

В заключении сделан вывод о применимости режима каскадного тройного взрыва для использования в качестве широкополосных или селективных источников излучения в видимой - ультрафиолетовой области спектра.

В пятой главе диссертации рассмотрены конкретные технические решения, реализующие режим столкновений детонационных волн в газах и определены их основные технические и ресурсные показатели.

Для создания протяженных цилиндрических детонационных волн в разработанных устройствах использовались различного рода фазовые замедляющие структуры в соответствии с принципом Гюйгенса для детонационной волны. Разработано и испытано два типа широкополосных детонационных излучателей, различающихся конструкцией фазовой замедляющей структуры. Проведенные испытания показали, что для таких излучателей яркостная температура процесса составляет $T' = (4...6) \cdot 10^3 K$ при $p_0 = (0,2...1,0) \cdot 10^5 Pa$. Полный КПД процесса составил 6...9%.

Показано, что фактором, ограничивающим ресурс работы широкополосного детонационного излучателя является уменьшение прозрачности выходного окна излучателя. Прямые измерения прозрачности окна показали что с ростом числа пусков окно начинает вести себя как нейтральный широкополосный фильтр, уменьшающий свою прозрачность в 5 раз примерно за 12...15 пусков. Предельное ослабление прозрачности составляет 6...7 раз за ~ 20 пусков, после чего окно изменяет свою прозрачность по крайней мере до 100 пусков.

Разработано также устройство, позволяющее производить накачку неодимового стекла посредством протяженного фокуса схождения цилиндрической детонационной волны. Для такого устройства достигнут КПД преобразования в 2...3 раза выше, чем в стационарных (ГОС-1000) излучателях.

В заключении сделан вывод о перспективности использования детонационных источников излучения в практических применениях.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность создания высокоэффективных световых источников с яркостной температурой $\sim 10^4$ К на основе цилиндрического схождения двойных детонационных волн в газовой-плазменной смеси. Световой КПД процесса при этом достигает 8...17% при начальных давлениях среды $p_0 = (0,5...2,0) \cdot 10^5$ Па.

2. Разработана экспериментальная модель, реализующая режим каскадного тройного взрыва в газовой-плазменной среде. Создан универсальный измерительный комплекс, позволяющий проводить измерение спектральных, энергетических и газодинамических характеристик в автоматическом цифровом режиме.

3. Проведены экспериментальные исследования газодинамических характеристик каскадного тройного взрыва в диапазоне начальных давлений смеси $p_0 = (0,05...2,0) \cdot 10^5$ Па. Получены зависимости скоростей скачков плотности от начального давления, зарегистрировано существенное (до $\sim 5 \cdot 10^2$ раз) увеличение давления газа в последней фазе каскадного тройного взрыва.

4. Построена модель аналитических расчетов термодинамических параметров газовой среды в каскадном тройном взрыве. Показана возможность увеличения давления в среде до $(5...8) \cdot 10^2$ раз, температуры – до $(8...10) \cdot 10^3$ К, плотности среды – в 5...20 раз.

5. Экспериментально исследованы спектральные и энергетические характеристики излучения каскадного тройного взрыва. Обнаружена аномальная светимость молекулярной полосы ацетилена на длине волны $\lambda = 623$ нм в диапазоне начальных давлений $p_0 = (0,35...0,45) \cdot 10^5$ Па. Показана возможность создания на основе тройного взрыва селективных источников УФ и видимого излучения.

6. Разработан ряд конструкций детонационных излучателей. Определена их яркостная температура излучения, составляющая $(4...9) \cdot 10^3$ К. Определены факторы, приводящие к уменьшению ресурса работы устройств. Достигнут световой КПД излучателя в 4...6%.

7. Создано устройство, реализующее оптическую накачку несдиемого стекла излучением газовой детонации. Получено увеличение све-

того КД устройства в 2...3 раза по сравнению с существующим циклом преобразования энергии химической связи в излучение.

Материалы диссертации отражены в следующих работах:

1. А. с. N 589841, МКИ H01S 3/095. Оптический квантовый генератор / В. К. Аблеков, Ю. Н. Денисов, Ф. Н. Любченко, С. Г. Миронов, В. В. Прошкин (СССР). -N2319535/25-18. Опублик. 2.11.79. Бюллетень N4 // Открытия. Изобретения. -1979. -N4. -С. 312.

2. А. с. N 831007, МКИ H01S 3/22. Детонационный квантовый генератор / В. К. Аблеков, Ю. И. Герасько, Ю. Н. Денисов, Ф. Н. Любченко, С. Г. Миронов, (СССР). -N2565517/25. Опублик. 2.1.79. Бюллетень N4 // Открытия. Изобретения. -1979. -N4. -С. 313.

3. Денисов Ю. Н., Любченко Ф. Н. Тройной взрыв в стехиометрической ацетилено-кислородной смеси

// 1-й Всесоюзный Симпозиум по Радиационной Плазмодинамике: Тезисы докладов. -М., 1989. -Часть 1. -С. 77-78.

4. Денисов Ю. Н., Любченко Ф. Н. Спектральный состав излучения фокальных областей тройного взрыва в смеси С Н /2,50

// 1-й Всесоюзный Симпозиум по Радиационной Плазмодинамике: Тезисы докладов. -М., 1989. -Часть 1. -С. 75-77.

5. Денисов Ю. Н., Любченко Ф. Н. Концентрационные пределы отклонения интенсивности С Н -линий спектра от термодинамически равновесного излучения в тройном взрыве

// 1-й Всесоюзный Симпозиум по Радиационной Плазмодинамике: Тезисы докладов. -М., 1989. -Часть 1. -С. 75-77.

6. Денисов Ю. Н., Любченко Ф. Н. Радиационные характеристики цилиндрических детонационных волн в газовой-плазменных смесях

// Труды 1-го Всесоюзного Симпозиума по Радиационной Плазмодинамике. -М., 1990. -С. 712-732.

7. Аблеков В. К., Денисов Ю. Н., Любченко Ф. Н. Справочник по газодинамическим лазерам. -М.: Машиностроение, 1982. -167с.

8. Денисов Ю. Н., Любченко Ф. Н. Глиссирующие пульсации в сверхтонкой структуре детонации и в отраженных скачках плотности // ДАН СССР. -1990. -Т. 315, N2. -С. 413-419.