## Кондратова Ольга Анатольевна

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ПОДУШЕК БЕЗОПАСНОСТИ

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

#### АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск – 2007

Работа выполнена на кафедре математической физики физикотехнического факультета Томского государственного университета

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук,

профессор С.С.Бондарчук

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,

профессор А.А. Глазунов

Доктор физико-математических наук,

профессор И.Г. Боровской

Ведущая организация: Федеральное научно – производствен-

ное объединение "Алтай"

Защита диссертации состоится 29 мая 2007 года на заседании диссертационного совета Д212.267.13 Томского государственного университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 36, ауд.503

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Автореферат разослан 28 апреля 2007г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.т.н, профессор.

Ю. Ф. Христенко

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Непрерывно возрастающее число автомобилей в развитых странах мира и повышение в связи с этим интенсивности движения автотранспорта а также увеличение скоростного режима на дорогах выдвигает на первый план проблему безопасности водителей и пассажиров. Наиболее надежным средством, имеющимся в арсенале систем безопасности, является применение подушек безопасности (айрбэгов), надуваемых каким-либо источником газа за очень короткое время (30÷100 мс) в момент возникновения аварийной ситуации. В настоящее время практически все ведущие автомобилестроительные предприятия оснащают свои автомобили среднего класса и выше айрбэгами и число различных конструкций этих устройств и схем их применения постоянно растет. Количество газогенераторов, применяемых в современных автомобилях, может достигать десятков единиц – от миниатюрных для натяжения ремней безопасности до газогенераторов наддува айрбэгов для сохранения жизни водителя и пассажиров. О важности и перспективности использовании этих средств говорит и тот факт, что в течение десяти последних лет регулярно проводится международная конференция «AIRBAG», специально посвященная вопросам разработки, эксплуатации и развития этих средств безопасности автомобиля.

При создании перспективных схем айрбэгов важное значение имеет математическое моделирование функционирования айрбэгов, когда вместо полномасштабных экспериментов можно проводить параметрические расчеты. Вместе с тем адекватность математического моделирования реальному процессу в большой степени определяется развитостью моделей и точностью исходных данных, закладываемых в программу расчета. В этой связи весьма важным являются эксперименты по определению скоростей горения воспламенителей и топлив, констант формальной кинетики процессов и т.п.

Методы численного моделирования процессов в газогенераторах, снабженных зарядом твердого топлива, в настоящее время широко используются на всех этапах решения задач проектирования и отработки подобных устройств. Особенную важность эти вопросы приобретают в случаях, когда натурный эксперимент дорог, трудноосуществим или дает весьма ограниченную информацию. Кроме того, обеспечение традиционно строгих для систем безопасности требованиях по надежности разрабатываемых устройств предопределяет ак-

*туальность работ* в области математического моделирования внутрикамерных процессов в газогенераторах айрбэгов.

В настоящее время для численного моделирования применяются в основном нульмерные (балансовые) и простые одномерные математические модели; учет неодномерных эффектов, в которых осуществляется с помощью различных коэффициентов, определяемых из экспериментов. Состав продуктов сгорания определяется на основе термодинамических расчетов. Расчет процесса наддува оболочки айрбэга часто ограничивается моделированием заполнения жесткого цилиндрического сосуда того же объема, что и наполненная оболочка.

**Целью работы** является разработка элементов теоретических и методологических основ для реализации универсальной методики моделирования процессов в твердотопливных айрбэг-газогенераторах на всех этапах конструирования: математическая модель — метод решения — реализация; а также разработке технологии и программной реализации функциональных модулей как компонентов эффективной интегрированной программной среды.

Объектом исследования является газогенератор или устройство, где в качестве рабочего тела используются продукты сгорания высокоэнергетических материалов (твердых топлив). Предметом исследования является комплекс взаимосвязанных явлений, сопровождающих функционирование данного объекта, структуры и закономерностей развития внутрибаллистического процесса. Основными методами исследований являются математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

**Научная новизна** работы заключается в разработке элементов теоретических основ методики, обеспечивающей решение задач газовой динамики и баллистики *реальных* систем газогенераторов подушек безопасности при пространственном, осредненном и комбинированном описаниях течения.

- 1. Применительно к современной практике проектирования создана *новая* физико математическая модель, описывающая комплекс взаимовлияющих процессов в газогенераторах подушек безопасности, включая воспламенительное устройство и полость наддуваемой оболочки; разработаны *новые* методы решения ряда задач, обеспечивающие эффективность программной реализации модели.
- 2. Впервые решен ряд практических задач газодинамики внутрикамерных процессов и получены новые данные по гидрогазо- и термодинамической структуре течений в газогенераторах подушек безопасности (локализации зон повышенных давлений, разрежений, не-

стационарных взаимодействий спутных потоков, возникающих динамических нагрузках и т.д.) при расчетах конструкций существующих и перспективных airbag-газогенераторов с гранулированными, вкладными и пористыми зарядами.

3. На базе анализа процессов при организации спутного горения предложена *новая* схема конструкции пористого заряда для перспективных газогенераторов подушек безопасности.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные автором расчетные технологии и полученные на их основе результаты численных исследований позволяют прогнозировать расходно-энергетические характеристики airbag-газогенераторов, что способствует как получению новых знаний о развитии внутрибаллистических процессов и повышению качества проектирования этих устройств, так и сокращению стоимости и объема натурной отработки подобных систем.

Построенные в диссертации новые физико - математические модели развития внутрибаллистического процесса расширяют и углубляют понимание сложной картины течения и тепломассообмена в пространственных каналах airbag-газогенераторов, внося определенный вклад в развитие теории внутрикамерных процессов.

На основе анализа полученных результатов по моделированию процессов в газогенераторах с пористым зарядом предложена новая конструктивная схема, обеспечивающая целевую функцию airbag-газогенераторов более полным образом.

Достоверность использованных методов, положений, выводов и рекомендаций работы подтверждена физическим анализом результатов вычислений, исследованием сходимости выбранных методов и расчетно – алгоритмических схем, сравнением с другими известными методиками и точными решениями, а также сравнением с экспериментальными данными.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработанные в диссертации методическое и программное обеспечение внедрены в практику исследовательских работ Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН, а также переданы Fraunhofer ICT, где используется в практике проектирования подушек безопасности.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы представлялись и обсуждались на научных конференциях:

III международной конференции "Application of the Conversion Research Results for International Cooperation" (г. Томск, 1999), на II, III Всероссийских научных конференциях "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики" (г. Томск, 2000 г., 2002 г.), на 33<sup>th</sup> International Annual Conference of ICT "Energetic Materials: Synthesis, Production and Application" (Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 2002), на IV Международной конференции "Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и в ствольных системах" (г. Москва, 2002г.), на 9 Всероссийской научнотехнической конференции "Информационные технологии в науке, проектировании и производстве (г. Нижний Новгород, 2003 г.), на V и VI Международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права" (г. Москва, 2003 г., 2004 г.), на Международном форуме по проблемам науки, техники и образования "Региональные проблемы и национальные достижения" (г. Москва, 2003 г., 2006 г.), на Международной научно-практической конференции "Современные информационные технологии в науке, производстве и образовании" (г. Пенза, 2004 г.), на I и II Международных конференциях "Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение" (г. Белокуриха, 2004 г., 2006 г.), на Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и образование" (г. Томск, 2004г.), на V Международной конференции и выставке "High Energy Materials" (Индия, г. Хайдерабад, 2005г.).

**Публикации.** Результаты проведенных исследований изложены в 26 публикациях, из них 6 без соавторов. Имеется публикация в издании, входящем в список ВАК РФ, 14 публикаций в зарубежных статьях и материалах международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников и приложения. Работа содержит 125 страниц основного текста, таблицу, 71 рисунок, список литературы из 98 наименований на 12 страницах, приложение.

**Личный вклад**. В диссертации использованы результаты, полученные автором при методическом руководстве научного руководителя.

## Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенная физико – математическая модель, описывающая

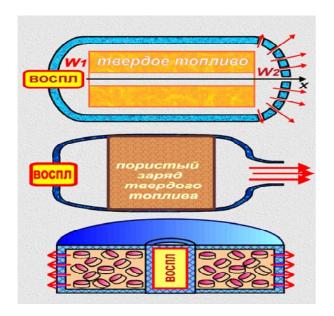
комплекс взаимовлияющих процессов в газогенераторах подушек безопасности, включая воспламенительное устройство и полость наддуваемой оболочки; методическое и программное обеспечение по реализации указанных моделей.

- 2. Результаты решения практических задач газодинамики внутрикамерных процессов; данные по структуре и закономерностях течений в газогенераторах подушек безопасности существующих и перспективных airbag-газогенераторов с гранулированными, вкладными и пористыми зарядами в частях
  - о локализации зон повышенных давлений, разрежений;
  - о нестационарного течения спутного потока в системе пористого заряда;
  - о возникающих динамических нагрузках на оболочку подушки безопасности.
- 3. Новая схема конструкции пористого заряда для перспективных газогенераторов подушек безопасности.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, обсуждается вклад в решение проблемы ученых отечественных школ и методы, используемые зарубежными исследователями. Определяются цель и решаемые задачи, излагаются научная новизна и практическая ценность.

B первой главе комплексная физикопредставлена математическая модель задачи расчета нестационарного пространственного течения многокомпонентной гомогенной смеси идеального газа в камере сгорания газогенератора с зарядом сложной геометрической конфигурации. Рассмотрен комплекс вспомогательных задач расчета параметров функционирования воспламенительного устройства, прогрева элементов конструкции изделия, задача зажигания заряда твердого топлива. Сформулированы и обсуждены начальные и граничные условия. Для алгоритма вычислений получены и приведены соотношения, позволяющие определить картину течения в каналах натурных газогенераторов с зарядами сложной формы применительно к расчету характеристик на существенно нестационарном режиме работы газогенератора с учетом постепенности зажигания твердого топлива. Схемы твердотопливных газогенерирующих устройств, для которых разрабатывалось программное обеспечение, представлены на рисунке 1.



Система уравнений газовой динамики записывается применительно к контрольному объему V, ограниченному замкнутой поверхностью, частично или полностью состоящей из проницаемой для газа поверхности A и непроницаемой S, на которой происходит тепломассообмен между газами потока и элементами конструкции газогенератора.

Рисунок 1 – Схемы газогенераторов

Систему уравнений, выражающую основные законы сохранения, запишем в интегральном виде, не зависящем от выбора системы координат:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V} \rho dV + \int_{A} \rho \cdot N dA = \int_{S} \sum_{j=1}^{L} M_{j} dS,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V} \rho \cdot \mathbf{u} dV + \int_{A} \mathbf{\Pi} dA + \int_{S} \mathbf{\Pi} dS + \int_{S} \rho \cdot \mathbf{f} dS = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V} \rho \cdot R dV + \int_{A} \rho \cdot R \cdot N dA = \int_{S} \sum_{j=1}^{L} R_{j} \cdot M_{j} dS,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V} \rho \cdot C_{p} dV + \int_{A} \rho \cdot C_{p} \cdot N dA = \int_{S} \sum_{j=1}^{L} C_{p_{j}} \cdot M_{j} dS,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V} E dV + \int_{A} (E + p) \cdot N dA + \int_{S} q dS =$$

$$= \int_{S} \sum_{j=1}^{L} H_{j} \cdot M_{j} dS,$$

$$E = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho \cdot |\mathbf{u}|^{2}}{2}, \qquad \gamma = \frac{C_{p}}{C_{p} - R},$$

$$T_{g} = \frac{p}{\rho \cdot R}.$$

где t - время;

 $p, \rho, \mathbf{u}$  - давление, плотность и вектор скорости;

N = (u, n) - нормальная к поверхности скорость, определяемая скалярным произведением вектора скорости u на единичный вектор n внешней нормали к поверхности;

 $\mathbf{\Pi} = p \cdot \mathbf{n} + \rho \cdot N \cdot \mathbf{u}$  - поток импульса;

 $\gamma$  - показатель адиабаты (отношение теплоемкостей);

 $M_i$ ,  $H_i$  - плотность прихода массы и энтальпия вдуваемых с поверхности S продуктов;

 $R, C_p$  - газовая "постоянная" и изобарическая теплоемкость;  $T_g$  - температуры газа;

f, q - плотности напряжения трения и теплового потока.

Массовая скорость горения топлива как функция параметров потока определяется с поправками на начальную температуру заряда,

нестационарность и эрозионный эффект. Поправка на нестационарность скорости горения рассчитывается по феноменологической модели Зельдовича — Новожилова, построенной на допущении о тепловой инерционности конденсированной фазы. В рамках этой теории скорость горения определяется мгновенным значением давления над поверхностью топлива и величиной градиента температуры на поверхности горения, который, в свою очередь, вычисляется из решения задачи нестационарной теплопроводности внутри топлива. Коэффициент эрозии  $\varepsilon$ , равный отношению скорости горения с учетом и без учета влияния обдувающего потока, представляется в виде функции безразмерного параметра I, предложенного В.Н. Вилюновым:

$$\varepsilon = I + \varepsilon_* \cdot (I - I_*),$$

$$I = \frac{\rho \cdot u}{\rho_o \cdot u_g} \sqrt{\lambda_c},$$

где индексом "\*" отмечены экспериментальные значения параметров,  $u_g$ , u - скорости горения и обдувающего потока,  $\rho_o$  - плотность твердого топлива,  $\lambda_c$  - коэффициент трения.

Математическая модель задачи зажигания конденсированного вещества — твердого топлива — включает уравнение теплопроводности с учетом экзотермических реакций и уравнение химической кинетики:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \aleph_o \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_o \cdot F(a, T),$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = -F(a, t),$$

$$x = 0$$
:  
 $\alpha \cdot [T_g - T(0, t)] = -\lambda_o \frac{\partial T}{\partial x},$ 

$$x \to \infty$$
:  
 $-\lambda_o \frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ,

где x - координата, направленная от поверхности вглубь топлива,

*T* - температура топлива,

 $Q_o$  - отношение тепловыделения к теплоемкости топлива,

*а* - массовая концентрация (глубина "выгорания" ТРТ),

 $\mathcal{N}_o$  - коэффициент температуропроводности твердого топлива,

 $\lambda_o$  - коэффициент теплопроводности;

lpha - эффективный коэффициент теплоотдачи

 $F(a,T) = Z \cdot a \cdot exp(-E_a/T)$  - скорость химической реакции для зависимости Аррениуса,

 $Z_{*}E_{a}$  - предэкспонент и отношение энергии активации топлива к универсальной газовой постоянной

Тепловое воздействие на заряд со стороны горячих газообразных продуктов сгорания моделируется постановкой граничных условий третьего рода (условий Ньютона-Рихмана) на поверхности твердого топлива и равенства нулю теплового потока "на бесконечности".

В практике конструирования газогенераторов широкое распространение получили ВУ с неразрушаемым в процессе работы корпу-

сом (например, типа перфорированного стакана), обеспечивающие стабильные расходно — энергетические характеристики. Для этого случая математическая модель, описывающая изменение газодинамических параметров в полости корпуса ВУ, представляется системой обыкновенных дифференциальных уравнений для осредненных по внутреннему свободному объему W внутрибаллистических характеристик — так называемое нульмерное описание. Предполагается, что  $\mathcal S$  составов, образующих заряд ВУ, загораются одновременно по всей поверхности, а конструкция перфорированного корпуса препятствует выносу зерен воспламенителя. Тогда система уравнений, выражающая основные законы сохранения массы и энергии, изменения свободного объема ВУ, имеет вид:

$$\frac{d}{dt}(\rho \cdot W) = \sum_{i=1}^{3} (1 - z_{vi}) \cdot M_i - M_*,$$
 где  $\omega$  - текущий объем пиросостава, 
$$\frac{d}{dt}(\rho \cdot R \cdot W) = \sum_{i=1}^{3} (1 - z_{vi}) \cdot R_i \cdot M_i - R \cdot M_*,$$
 
$$\frac{d}{dt}(\rho \cdot C_p \cdot W) = \sum_{i=1}^{3} (1 - z_{vi}) \cdot C_{pi} \cdot M_i - C_p \cdot M_*,$$
 
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{p \cdot W}{\gamma - 1}\right) = \sum_{i=1}^{3} (1 - z_{vi}) \cdot C_{pi} \cdot T_{pi} \cdot M_i - \frac{1}{\gamma - 1} \cdot \frac{p}{\rho} \cdot M_*,$$
 
$$\omega_i = \frac{m_{oi}}{\rho_{oi}} \cdot \frac{\prod_{j=1}^{3} (e_i^j - e_i)}{\prod_{j=1}^{3} e_i^j},$$
 
$$\frac{dW}{dt} = -\sum_{i=1}^{3} \frac{d\omega_i}{dt}$$
 
$$\frac{de_i}{dt} = u_{gi}, \quad i = 1, K, \Im.$$

Значимым преимуществом предложенного подхода является точное (в рамках погрешности ЭВМ) выполнение закона сохранения массы, что обеспечивается даже в случае использования приближенных геометрических зависимостей для связи между параметрами выгорания и характеристиками формы зерна.

**Во второй главе** на основе анализа ряда решенных задач проведено подтверждение достоверности используемого подхода в частях решения газодинамических и "тепловых" задач. Достоверность подтверждена физическим анализом результатов решения, исследованием сходимости выбранных методов и схем вычислений, сравнением с другими известными методиками и точными решениями, а также сравнением с экспериментальными данными.

Изучение влияния включенного в математическую модель нового фактора — переменности теплофизических характеристик продуктов сгорания — проводилось на основе анализа расчета параметров функционирования воспламенительного устройства. На рисунке 2.

приведены кривые давление — время в камере сгорания, снабженной пиросоставами, содержащими 27% и 60% металлической составляющей, полученные при осреднении газодинамических параметров по свободному объему устройства. Кривые 1 и 2 — при расчете термодинамических свойств смеси с использованием традиционных уравнений для концентраций компонентов и аддитивности газовой постоянной и изобарической теплоемкости; зависимость 3 — расчет на основе предлагаемых уравнений.

Из графиков видно, что расчетная зависимость 3 проходит между кривыми минимальных (1) и максимальных (2) значений теплофизических свойств и носит обобщающий характер, точно (в пределах модели) отражая изменение термодинамических характеристик продуктов сгорания на всем

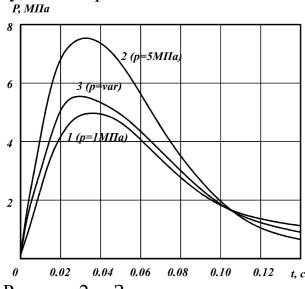


Рисунок 2. – Зависимости давление – время для камеры сгорания

интервале изменения давления от минимального до максимального. Наибольшие отклонения кривой 3 от диаграммы 1 составляют 23% в сторону завышения и 39% от зависимости 2 в сторону занижения.

Сходимость метода Годунова распада произвольного разрыва проверялась удвоением расчетной сетки для области, представляющей собой входной дозвуковой участок сопла до критического сечения.

Исследования распределения осевых значений числа Маха и осредненного по сечению (обезразмеренного по полному внутрикамерному) давления подтвердили сходимость разностной схемы при удвоениях расчетной сетки. Дополнительным косвенным подтверждением сходимости использования разностной схемы послужил тот факт, что результаты расчета по методу Годунова первого порядка точности аппроксимации на удвоенной сетке практически совпали с вычислениями по модификации Колгана-Тилляевой второго порядка точности аппроксимации на исходной разностной сетке.

Для оценки точности получаемых результатов численное решение однородного уравнения теплопроводности на используемой в данном подходе адаптирующейся сетке сравнивалось с соответствующим аналитическим решением, полученным для теплофизиче-

ских характеристик для пороха Н при постоянных коэффициенте теплоотдачи и температуре газа.

На рис. 3 приведен реализующийся при данных условиях температурный профиля при t=8 мс и показана относительная погрешность численного решения.

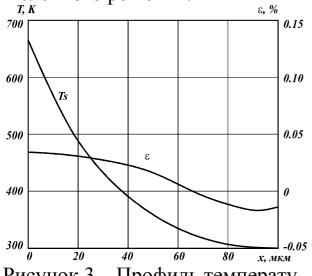


Рисунок 3 – Профиль температуры и относительная погрешность численного решения

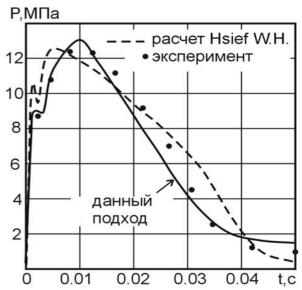


Рисунок 4 — Сравнительный анализ зависимостей давление - время

На рисунке 4 приведено сравнение зависимостей давление — время для камеры сгорания айрбэг-газогенератора — предлагаемый подход и данные, полученные в работе [Hsief W.H., Sun L.Y., Chen J.K., Wang S.W. Theoretical Simulation of Combustion Processes of Airbag Inflators // Proc. Instn. Mech. Engrs. 2001. Vol 215. Part D. P.1-9], где в состав модели были включены экспериментально полученные корректирующие зависимости по газообразованию. Сравнение результатов вычислений показывает хорошее согласование расчетных зависимостей.

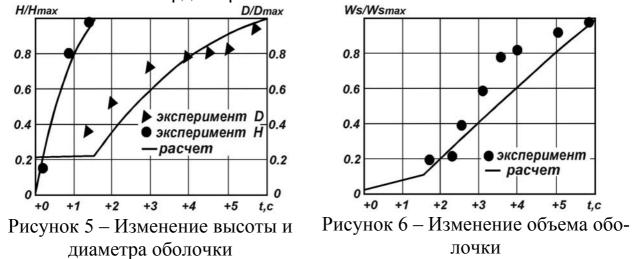
Для систем различного целеназначения достаточно широко используется наддув эластичных оболочек продуктами сгорания порохов и твердых ракетных топлив. В качестве апробации подхода в части газопроизводительности исследовались параметры устройства, предназначенного для подъема грузов в водной среде (оболочка, надуваемая продуктами сгорания), где охлаждение газов осуществляется их барботированием через жидкость. По мере поступления газа оболочка разворачивается и вытягивается вверх до максимальной высоты и полного объема.

$$W_{s}(t) = \pi \frac{R \cdot T_{e}}{P_{e}} \int_{0}^{t} \int_{S} mdS dt$$

m — массовая скорость горения

Текущее значение  $W_s(t)$  объема в процессе раскрытия полости определяется накопленной к текущему моменту времени массой газа, находящегося при температуре  $T_e$  и давлении  $P_e$  внешней среды.

Теоретические и экспериментальные исследования проводились для газогенератора с канальным (внутренний диаметр 1.2см) зарядом баллиститного твердого ракетного топлива массой 20г.



**В третьей главе** представлены результаты параметрических исследований газогенераторов подушек безопасности с гранулированными и вкладными зарядами.

Наиболее широкое распространение в настоящее время получили системы автомобильных подушек безопасности, где источником создания давления являются пороховые газогенераторы с гранулированным зарядом, состоящим из элементов твердого топлива в виде таблеток или имеющих шарообразную форму. Для гранулированных зарядов величины площади A, свободной для прохода газов, определяются объемной гравиметрической плотностью, а поверхность S рассматривается как суммарная для элементарного объема V. Изменение во времени этих параметров, а также поступление массы и энтальпии в объем определяются по соотношениям, аналогичным используемых для воспламенителя в предположении неподвижности гранул топлива.

По представленной модели были выполнены численные исследования. В расчетных вариантах параметры зарядов подбирались таким образом, чтобы обеспечивались приблизительно одинаковые динамические характеристики процесса наддува полости. На рис. 7 приведены зависимости давление — время для зарядов различной формы пороховых гранул при одинаковой начальной поверхности горения: 1 — шарообразные гранулы диаметром 5мм;

2 – таблетки диаметром 5.8мм и высотой 2.9мм.

Максимальное различие кривых на рабочем участке не превышает 9%; значительно большее различие наблюдается на участке высокоградиентного подъема давления, что обусловлено различием моментов начала зажигания (см. рисунок 8).

Рисунки 9,10 иллюстрируют распределение скорости и давления вдоль радиуса корпуса газогенератора для различных моментов вре-

мени для заряда для гранул заряда таблеточной формы.

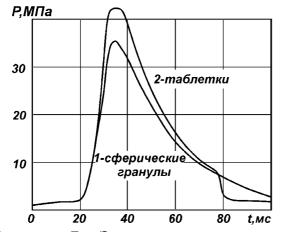


Рисунок 7 — Зависимость давление — время для двух форм зарядов

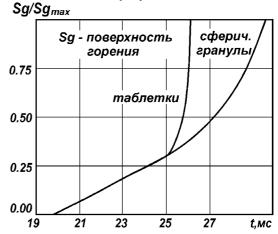


Рисунок 8 — Зависимость времени зажигания заряда от времени процесса

Отметим, что данная задача может ставиться и решаться как оптимизационная, когда для заданного времени достижения требуемого давления в подушке безопасности определяется необходимая зависимость расходных характеристик газогенератора от времени в условиях ограничений (обусловленных прочностными параметрами материалов подушки) на градиент и динамику нарастания давления в подушке.

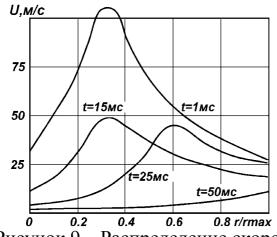


Рисунок 9 — Распределение скорости вдоль корпуса в разные моменты времени

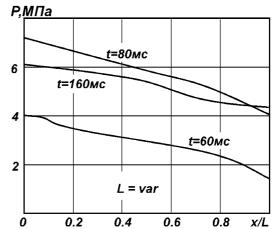


Рисунок 10 – Распределение давления по длине заряда в разные моменты времени

В настоящее время для современных систем автомобильных систем безопасности разрабатываются проекты, конструкции которых включают газогенераторы с моноблочным вкладным зарядом. По представленной модели рассматривались течения в газогенераторах, схематично представленных на рис. 11, конструктивно отличающихся расположением перфорированных отверстий, через которые происходит истечение продуктов сгорания.

В схеме рис. 11а перфорирована только правая торцевая крышка; в конструкции схемы рис. 11б отверстия перфорации равномерно

расположены по правой половине всего корпуса диаметра 39 мм. Заряд всестороннего горения высокоэнергетичного быстрогорящего твердого топлива трубчатой формы с внутренним / внешним диаметром 10 / 26 мм имел длину 200 мм. Давление "раскрытия" отверстий перфорации ("среза" сопла) задавалось равным 0.2 МПа.

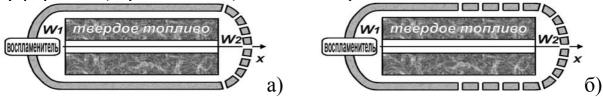
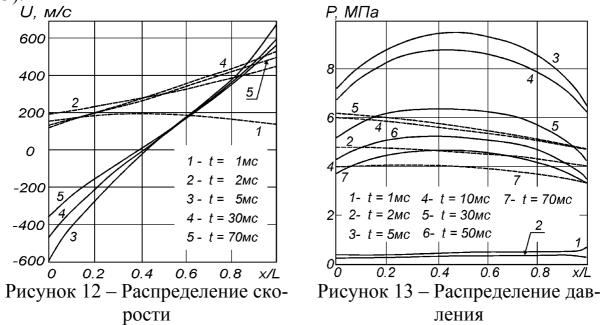


Рисунок 11 – Схемы газогенераторов

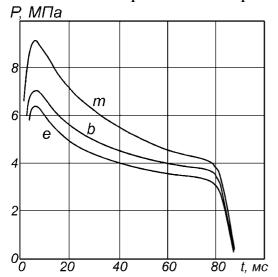
На рис. 12 представлено распределение скорости газового потока вдоль внутреннего (сплошные линии) и внешнего (пунктирные) каналов в различные моменты времени. Из рис. 12 видно, что после зажигания каналов ( $t \approx 2.8$ мс) распределение скорости качественно и количественно практически не изменяется. Во внутреннем канале формируется граница раздела потоков и истечение продуктов горения из левой части внутреннего канала происходит через внешний кольцевой канал. Во внешнем канале распределение скорости близко к линейному (от 100 до 500 м/с). Данному распределению скоростей соответствует распределение давлений по проточным трактам (рис. 13).



На рис. 14 приведено изменение во времени давления в начале (кривая b), середине (m) и в правом конце (e) заряда для внутреннего и внешнего каналов схемы рис.11а. Необходимо отметить, что перепад давления как между внутренним и внешним каналами (для одного и того же сечения), так и по длине этих газовых трактов, достигает значительных величин.

Из анализа расчетных данных следует, что характерная для трубчатых зарядов всестороннего горения значительная газодинамическая

напряженность течения (высокие скорости потоков и перепадов давления); наличие и положение границ раздела потоков на внутреннем и внешнем газовых трактах существенно нелинейным образом зависит от геометрических характеристик заряда и корпуса.



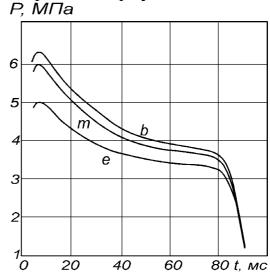


Рисунок 14 - 3ависимости p(t) внутреннего и внешнего каналов

Отметим также, что на кривую давления значительное влияние оказывает учет эффектов нестационарности скорости горения (3%) и эрозионный эффект (до 17%).

**В четвертой главе** проводится газодинамический анализ airbag – газогенераторов с пористым зарядом и анализ динамических нагрузок при наддуве airbag подушек.

Перспективной конструкцией, в значительной мере лишенной недостатков, связанных с высокой выходной температурой продуктов горения, являются airbag — газогенераторы с пористым твердотопливным зарядом, горение которого организуется в режиме спутной фильтрации. Конструктивные схемы подобных газогенераторов предусматривают такую организацию поверхностного горения пористого заряда, когда продукты горения существенно охлаждаются, диффундируя через пористую структуру заряда. Фильтрация теплоносителя через заряд в направлении фронта реакции приводит, в свою очередь, к локальному разогреву зоны горения.

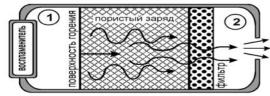


Рисунок 15 – Схема области решения

Перераспределение энергии между газообразными и конденсированными продуктами сгорания позволяет получать низкотемпературные газы. Кроме того, выход конденсированных продуктов сгорания снижается

за счет их частичного оседания в пористой структуре заряда Схема устройства приведена на рисунке 15.

Плотность прихода массы  $M_p$ , с текущей поверхности горения определяется соотношением

 $M_p = u_p \big[ I + \beta \cdot \overline{T}(x,t) \big]$  где  $\beta$  — температурный коэффициент зависимости скорости горения от "начальной" температуры топлива.

Локальная температура заряда  $\overline{T}(x,t)$  определялась осреднением местного профиля температуры, полученного из решения уравнения теплопроводности, описывающего изменение температуры заряда вследствие фильтрации через него продуктов сгорания. Конкретные значения величин поверхностей A и S рассчитывались через коэффициент пористости заряда.

Вычисления выполнялись для модельного газогенератора с заряда со следующими основными характеристиками:

- диаметр заряда 90мм;
- $_{\circ}$  длина заряда  $L = (120 \div 140)$ мм;
- длина заряда вместе с фильтром (кварцевый песок) 150мм;
- $_{\circ}$  характеристики материала за- температурный ряда: закона скоре плотность 1920кг/м $^{3}$ ; (0.001÷0.004)

коэффициенты температуропроводности и теплопроводности и теплопроводности топлива  $-6.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{c}$ , 0.86 BT/(M·K);

 $_{\circ}$  пористость –  $(0.3 \div 0.6)$ ; температурный коэффициент закона скорости горения  $(0.001 \div 0.004)$ .

На рисунке 16 представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных по зависимости давления от времени для области головного объема (1) и 2 — для параметров газа за фильтром (рисунок 15).

Анализ результатов показывает их хорошее качественное соответствие. Зависимость давления  $p_1(t)$  (головной объем газогенератора) имеет достаточно хорошее количественное соответствие с экспериментом. Кривая  $p_2(t)$  практически во всем временном диапазоне лежит выше экспериментально определенного уровня. Некоторый подъем давления на данной кривой в период завершения горения заряда связан как с меньшими потерями тепла в топливо, так нагреванием материала фильтра к данному моменту времени. Более значительный подъем экспериментально измеренного давления можно объяснить фактором снижения площади фильтра, свободной для прохода газа, вследствие оседания в нем конденсированных частиц.

На рисунке 17 представлены распределения давления по камере сгорания в различные моменты времени. Качественно характер представленных зависимостей обусловлен, главным образом, движением фронта горения.

Характерной особенностью распределения температуры газа (продуктов сгорания) является то, что ее профиль относительно координаты текущего положения фронта горения слабо меняется в течение всего времени работы газогенератора.

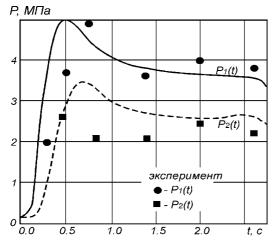


Рисунок 16 – Сравнения расчетных и экспериментальных данных зависимости давления от времени

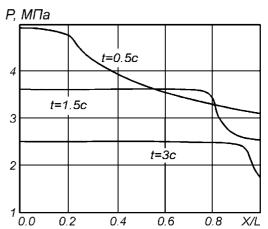


Рисунок 17 — Распределение давления по длине заряда в различные моменты времени

На рисунке 18 представлены результаты сопоставления величины перепада давления (между головным объемом и областью за фильтром) для зарядов различной пористости  $\eta$ . Закрашенная область представляет поле серий экспериментальных результатов; сплошная линия — осредненные по времени работы газогенератора расчетные значения.

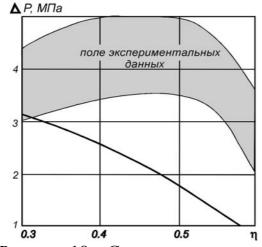


Рисунок 18 — Сопоставление экспериментальных и расчетных значений перепада давления по заряду

Исходя из выявленных особенностей газодинамических развития процессов в модельном газогенераторе можно предложить нижеследующую конструкцию применения пористых зарядов для airbag-газогенераторов, обеспечивающую существенно более высокие расходные характеристики. В перфорированном по внешней поверхности (рис. 19) корпусе размещается заряд трубчатой формы, в канале которого расположено воспламенительное устройство.

Видно, что расчетный перепад давления практически всегда менее значителен, что можно объяснить различием реальных "внутренних" геометрических параметров пористого заряда и используемой его модели, а также отсутствием учета движения и оседания в заряде конденсированной фазы продуктов сгорания.

В целом совпадение экспериментальных и расчетных данных удовлетворительное, что позволяет использовать предложенный подход для проектирования газогенераторов с пористым зарядом.К

внешней боковой поверхности корпуса примыкает фильтр, содержащий, как и в модельном заряде, кварцевый песок. Воспламенитель обеспечивает зажигание поверхности канала заряда и дальнейший режим спутного горения.



Рисунок 19 – Схема пористого заряд трубчатой формы

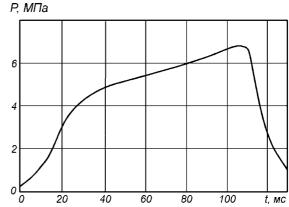
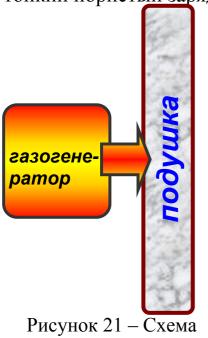


Рисунок 20 – Изменение во времени осредненного по каналу заряда давления

Необходимо отметить качественное и количественное развитие процессов схемы рисунка19 по сравнению с классической (рисунок 15). В частности, зависимость давления от времени (рисунок 20) имеет возрастающий характер на протяжении всего активного времени работы, что обуславливается как развитием геометрии поверхности горения, так и более высокой степенью прогрева массы существенно более тонкого пористого заряда.

Средняя температура продуктов горения на выходе устройства выше на 74К (по сравнению с расчетом для модельного газогенератора), поскольку продукты сгорания, протекающие через достаточно тонкий пористый заряд, не успевают охладиться до его температуры.



области расчета

Во второй части главы рассматривается процесс постадийного заполнения, развертывания и наддува эластичной оболочки airbag подушки. Схема области решения приведена на рисунке 21. На рисунке 22 представлены картины полей скорости течения продуктов сгорания и полей давления в различные моменты времени после развертывания подушки при ее наддуве до рабочего давления. Из результатов вычислений видно, что в начальные моменты времени (t < 16 мс) скорости потока достигают значительных величин (до 300÷450 м/с) в области между подводящим сечением и противоположной ему "стенкой" подушки.

Пространственные градиенты скорости в эти моменты времени также носят максимальный характер. Струя продуктов сгорания, достигая оболочки, разворачивается и растекается по всему объему. Непосредственно в области вблизи противоположной "соплу" стенкой подушки поток, как это и должно быть с точки зрения физики процесса, подтормаживается.

Вторая область повышенного давления локализуется в районе подвода массы и энергии.

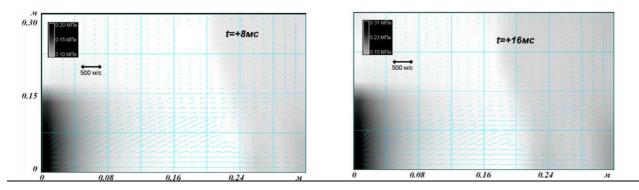


Рисунок 22 – Поля давления и скростей в моменты времени +8мс и +16мс

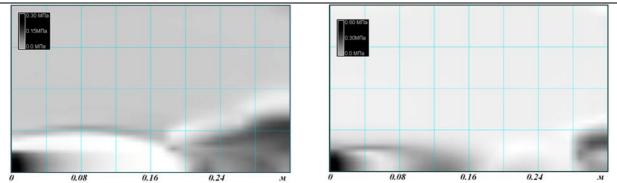


Рисунок 23 – Поля максимального перепада давления при +20мс и +28мс

В последующие моменты времени (t > 16 мс) скорости потока падают — вдув происходит в область с противодавлением. Эти моменты времени характеризуются повышенным давлением на фронтальной поверхности оболочки.

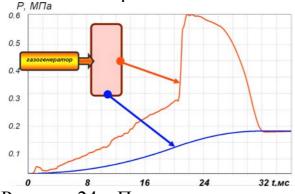


Рисунок 24 – Перепад давления по поверхности подушки

На рисунке. 24 показана динамика изменения во времени перепада давления в двух характерных точках оболочки. Можно отметить, что максимальные значения перепада давления реализуются на фронтальной поверхности оболочки в моменты времени (+20 мc < t < +32 мc). **В** заключении диссертации приведены выводы и сформулированы основные результаты исследований, которые состоят в следующем.

- 1. Применительно к современной практике проектирования создана новая физико математическая модель, описывающая комплекс взаимовлияющих процессов газовой динамики и баллистики реальных газогенераторов подушек безопасности, включая воспламенительное устройство и полость наддуваемой оболочки. Разработана методика и соответствующее программное обеспечение, обеспечивающие решение задач моделирования процессов в аirbagгазогенераторах при пространственном, осредненном и комбинированном описаниях течения.
- 2. Выполнена проверка и подтверждена достоверность использованных методов, положений, выводов и рекомендаций работы на основе физическго анализа результатов вычислений, исследования сходимости выбранных методов и расчетно алгоритмических схем, сравнения с другими известными методиками и точными решениями, а также сопоставления с экспериментальными данными.
- 2. Впервые решен ряд практических задач газодинамики внутрикамерных процессов и получены новые данные по структуре течений для конструкций существующих и перспективных airbag-газогенераторов с гранулированными, вкладными и пористыми зарядами. В частности
- Проведены расчеты airbag-газогенераторов с гранулированным зарядом, для которого выявлены закономерности влияния геометрических характеристик камеры сгорания и заряда на параметры зажигания топлива и развитие кривой давление-время;
- Исследован процесс функционирования для airbag-газогенераторов с трубчатыми зарядами всестороннего горения, характеризующийся значительной газодинамической напряженностью течения (высокие скорости потоков и перепадов давления); наличием и движением границ раздела потоков на внутреннем и внешнем газовых трактах. Анализ результатов показал существенно нелинейную зависимость параметров процесса от геометрических характеристик заряда и корпуса. Отмечено, что на кривую давления существенное влияние оказывают учеты эффектов нестационарности скорости горения (3%) и эрозионный эффект (до 17%);
- Проведены расчеты airbag-газогенераторов с пористым зарядом, работающим в режиме спутного горения. Отмечена характерная

- особенность конструкции слабая зависимость распределения температуры продуктов сгорания и ее профиля относительно координаты текущего положения фронта горения в течение всего времени работы газогенератора. Полученные данные по перепадам давления и температуры по камере сгорания и области, расположенной за узлом фильтра продуктов сгорания;
- Представлены результаты анализа динамических нагрузок, реализующихся в процессе развертывания и наддува подушек безопасности для различных систем газогенераторов. Представлены результаты вычислений в виде полей скорости и давления газа в различные моменты времени, а также динамики градиента давления в процессе заполнения полости подушки. Определено, что для среднего по применению объема оболочки подушки 80 л при среднем же времени ее заполнения 80-100 мс в штатном режиме максимальный перепад давления реализуется во второй четверти полного времени функционирования устройства и может двукратно превышать режимное значение наддува.
- 3. На базе анализа процессов при организации спутного горения предложена новая схема конструкции пористого заряда для перспективных высокопроизводительных газогенераторов подушек безопасности. Отмечено, что зависимость давления от времени имеет возрастающий характер на протяжении всего времени работы, что обусловлено как развитием геометрии поверхности горения, так и более высокой степенью прогрева массы более тонкого пористого заряда. При этом средняя температура продуктов горения на выходе устройства выше на 74К (по сравнению с расчетом для "классической" схемы), поскольку продукты сгорания, протекающие через достаточно тонкий пористый заряд, не успевают охладиться до его температуры.
- 4. Разработанное методическое и программное обеспечение внедрено в практику исследовательских работ Института проблем химико энергетических технологий СО РАН. По выполненным исследованиям разработаны курсы лекций и компьютерное учебное пособие для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Kondratova O.A. Propellant conversion use for supercharges elastic cases [Текст] /A.B.Vorozhtsov, S.S.Bondarchuk, O.A. Kondratova //Application of the Conversion Research Results for International Cooperation: The third International Symposium(SIBCONVERS'99). Proceedings. — Tomsk: Изд-во ТУСУР, 1999. - С. 264-265.

- 2. Кондратова О. Системно методическое обеспечение проектирования подушек безопасности на базе пороховых газогенераторов [Текст]/С. Бондарчук, А. Ворожцов, О Кондратова\_//Экономика, технология, предпринимательство: сб. научн. трудов. Томск: изд-во ТГПУ, 2000. С. 21-27
- 3. Кондратова О. Математическое моделирование наддува подушек безопасности низкотемпературными газогенераторами [Текст] / С.Бондарчук, О. Кондратова // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады II Всероссийской науч ной конференции. Томск: Изд-во ТГУ, 2000. С. 33-34
- 4. Kondratova O. Mathematical Simulation of Airbag Inflation by Low Temperature Gas Generator Products [Teκct] / A.Vorozhtsov, S.Bondarchuk, A Salko, O. Kondratova // An International Journal Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Volume 25, Issue 5, 2000. Pages: 220-223 (Published Online: 3 Nov 2000 WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Fed. Rep. of Germany
- 5. Кондратова О. Математическое моделирование наддува подушек безопасности низкотемпературными газогенераторами [Текст] / С. Бондарчук, А. Ворожцов, О. Кондратова // Вычислительная газодинамика и горение конденсированных систем / под ред. С.С. Бондарчука. Томск: Изд-во ТГПУ, 2001. С. 41-47
- 6. Kondratova O Numerical Simulation Of Airbag Gas Generator With Monoblok Non-Case-Bonded Charge [Τεκcτ] / A. Vorozhtsov, S.Bondarchuk, A. Salko, O. Kondratova//Energetic Materials: Synthesis, Production and Application: 33<sup>th</sup> International Annual Conference of ICT (June 25-28). 2002, Karlsruhe, Federal Republic of Germany, V8-11pp.
- 7. Кондратова О. Airbag-газогенераторы с вкладными зарядами [Текст] / С. Бондарчук, А. Березиков, О.Кондратова\_// Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады III Всероссийской науч. конф. Томск: Изд-во ТГУ, 2002. С. 48-49
- 8. Кондратова О. Comparative Analysis of Intrachamber Processes in Airbag Gas Generators [Текст] / С.Бондарчук, А. Ворожцов, В. Зима, О.Кондратова // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и в ствольных системах (ICOC 2002): 4 международная конф., (12-16 ноября 2002, Москва). Ижевск: Изд-во Института прикладной математики УрО РАН, 2004 С. 428-438
- 9. Кондратова О.А Моделирование процессов в airbag-газогенераторах с вкладными зарядами [Текст] / О.А Кондратова // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: материалы 9 Всероссийской научно-технической конференции Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 2003. С. 21-23
- 10. Кондратова О.А. Airbag-газогенераторы с пористым зарядом [Текст] / О.АКондратова // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всероссийской науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / под ред. С.М. Кулакова. Вып. 7 Ч. 2. Техн. науки. Новокузнецк: Изд-во Сиб-ГИУ, 2003. –С. 8-11

- 11. Кондратова О. Газодинамический анализ Airbag газогенератора с пористым зарядом [Текст] / С. Бондарчук, А. Ворожцов, Л. Пилюгин, В Полищук, В. Шандаков, О.Кондратова // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права: Науч. тр. VI Международной научно-практической конференции Книга "Приборостроение". (Сочи 6 9 октября 2003) М.: Изд-во МГАПИ, 2003. С.24-30
- 12. Кондратова О. Подводный наддув эластичных оболочек твердотопливным газогенератором [Текст] / С. Бондарчук, А. Ворожцов, В. Зима, О. Кондратова // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права: Науч. тр. VI Международной научно-практической конференции Книга "Приборостроение" (6 9 октября, Сочи, 2003) М.: МГАПИ, 2003. С.31-36
- 13. Кондратова О.А Применение численных методов решения задач для расчета базовых функций математической физики [Текст] / О. Кондратова // Региональные проблемы и национальные достижения: Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования. Т. 1.(1-5 декабря 2003) / под ред. В.П. Савиных, В.В. Вишневского. М.: Академия наук о Земле, 2003. С. 113-114
- 14. Кондратова О.А. Моделирование процессов в газогенераторах наддува подушек безопасности [Текст] / О. Кондратова // Региональные проблемы и национальные достижения: Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования. Т. 2. (1-5 декабря 2003) / под ред. В.П. Савиных, В.В. Вишневского. М.: Академия наук о Земле, 2003. С. 71-73
- 15. Кондратова О. Моделирование процессов в airbag-газогенераторах с пористым зарядом [Текст] / С. Бондарчук, А. Ворожцов, В. Зима, О. Кондратова // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: материалы 10 Всероссийской науч.-техн. конф. (23 декабря 2003). Нижний Новгород: Изд-во НГТУ,2003. С.4-5
- 16. Кондратова О.А. Gasdynamic analysis of the airbag gas generator with a porous charge [Текст] / С.С.Бондарчук, О.А Кондратова // Вестник Томского государственного педагогического университета. Серия: Естественные и точные науки №4, 2003, вып. 4(36). Томск: Изд-во ТГПУ, 2003. С. 31-35
- 17. Кондратова О. Моделирование процессов при подводном наддуве эластичных оболочек газогенератором [Текст] / С. Бондарчук, А. Ворожцов, В. Зима, О. Кондратова // Современные информационные технологии в науке, производстве и образовании: Сб. мат. международной научно-практической конференции. Пенза: Изд-во ПГСХА, 2004. С. 68-70
- 18. Archipov V.A., Bondarchuk S.S., Kondratova O.A. The Analysis of Measurement Techniques of Non-stationary Combustion Speed for Condensed Systems [Τκcτ] / V.A. Archipov, S.S. Bondarchuk, O.A. Kondratova // High Energy Materials: Demilitarization and Civil Applications. Summary of the International Workshop HEMs-2004 (Sept. 6-9, 2004, Belokurikha). Biysk: FGUP FR & PC ALTAI. P. 119-121
- 19. Кондратова О.А. Анализ методов измерения нестационарной скорости горения конденсированных систем [Текст] / В.А. Архипов, С.С. Бондарчук,

- О.А Кондратова // Высокоэнергетические материалы. Демилитаризация и гражданское применение: Тезисы Междунар. конф. "HEMs-2004" (6-9 сентября 2004г. г.Белокуриха). Бийск: Изд-во ФГУП ФНПЦ "Алтай". С.118-119
- 20. Кондратова О.А. Использование вкладных зарядов в airbag-газогенераторах [Текст] / С.С. Бондарчук, О.А. Кондратова // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права: Науч. тр. VII Международной научно-практической конференции Книга "Приборостроение". (1 5 октября, Сочи, 2004) М.: Изд-во МГАПИ, 2004. С. 104-108.
- 21. Кондратова О.А. Анализ применимости airbag-газогенераторов с вкладными зарядами [Текст] / С.С.Бондарчук, О.А. Кондратова // Региональные проблемы и национальные достижения: Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования. Т. 2.(6-10 декабря 2004) / под ред. В.П. Савиных, В.В. Вишневского. М.: Академия наук о Земле, 2004. С. 167 169
- 22. Кондратова О.А. Применение пористых зарядов в автомобильных подушках безопасности [Текст] / С.С Бондарчук, О.А. Кондратова // Наука и образование: Материалы Всероссийской конф студентов, аспирантов и молодых ученых (19-23 апреля 2004г.): В 6т. Т.1, Ч.2: Естественные и точные науки. Томск: Изд-во ТГПУ, 2004. с.239-242.
- 23. Kondratova O.A. Modeling of Processes in Airbag Gas Generators [Τεκcτ] / O.A Kondratova. // High Energy Materials: 5-th International Conference & Exhibit (November 23-25, 2005). Hyderabad, India: DRDL, 2005. P 38
- 24. Kondratova O.A. Modeling of Processes in Airbag Gas Generators [Электронный ресурс] / O.A Kondratova// High Energy Materials: 5-th International Conference & Exhibit (November 23-25, 2005). Hyderabad, India: DRDL, 2005. Режим доступа: [С экрана: секция Modelling; название публикации; тезисы (abstracts) или полный текст (full paper)]. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)
- 25. Кондратова О.А. Моделирование динамических и тепловых нагрузок при наддуве подушек безопасности [Текст] / С.С.Бондарчук, О.А.Кондратова // Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение: II Международная конф. (11-14 сентября 2006, г. Белокуриха). М.: Изд-во ЦНИИХМ С. 60
- 26. Kondratova O.A. Modeling of Dynamic and Thermic Stresses in Airbags [Tekct] / S.S. Bondarchuk, O.A. Kondratova // High Energy Materials: Demilitarization, Antiterrorizm & Civil Applications: II International Workshop (September 11-14, 2006, Belokurikha), M: CSRICM. P. 60-61