



ПИЛЯВСКАЯ Елена Владимировна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОЙ ДИССИПАЦИИ И ТЕПЛОПЕРЕНОСА
ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ
ДВУХФАЗНЫХ ПОРИСТЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2013

2

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»

**Научный
руководитель:**

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, доцент
Аттетков Александр Владимирович

**Официальные
оппоненты:**

Формалев Владимир Федорович,
Заслуженный деятель науки РФ, доктор
физико-математических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»,
профессор кафедры вычислительной
математики и программирования

Долгобородов Александр Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, федеральное
государственное бюджетное учреждение
науки «Институт химической физики
имени Н.Н. Семенова РАН», главный
научный сотрудник лаборатории детонации

**Ведущая
организация:**

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Московский государственный университет
тонких химических технологий
имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится «02» июля 2013г. в 13 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д212.141.15 при Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: Москва, Руб-
цовская наб., 2/18, ауд. 1006 л.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского го-
сударственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «___» _____ 2013г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



А.В. Аттетков

2786

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2029779

Пилверская Е.В. Математическое моделирование

480 -

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Механизм ударно-волновой чувствительности (УВЧ) и перехода ударной волны (УВ) в детонацию (в зарубежной литературе — Shock-to-Detonation Transition, или сокращенно SDT) в гетерогенных энергетических материалах (ЭМ) еще не понят до конца, несмотря на значительное количество результатов экспериментальных и теоретических исследований по рассматриваемой проблеме. Действительно, имеются различные стандартные «тесты» по ударно-волновой и механической чувствительности ЭМ, приводящие, в ряде случаев, к различным уровням чувствительности одних и тех же ЭМ в зависимости от амплитуды УВ и ее длительности, микроструктуры ЭМ и т.д. Более того, для одного и того же ЭМ некоторые из параметров, традиционно используемых в качестве характеристик УВЧ, могут изменяться в противоположных направлениях при увеличении удельной поверхности пористого ЭМ. Этот эффект связан с зависимостью УВЧ от микроструктуры ЭМ: многочисленные дефекты структуры (поры, межфазные и межгранулярные границы, кристаллические дефекты и трещины в твердых ЭМ, сенсibiliзирующие включения в жидких ЭМ) сильно влияют на УВЧ и динамику перехода УВ в детонацию.

Концепция горячих точек (ГТ) — локализованных зон динамического перегрева ударно-сжатого ЭМ, предложенная в 50-х годах прошлого века Боуденом и Иоффе, позволяет качественно объяснить повышенную УВЧ гетерогенных ЭМ по сравнению с гомогенными и успешно используется при математическом моделировании процессов возбуждения очаговой химической реакции и перехода УВ в детонацию в ЭМ, обладающих гетерогенной структурой.

Формирование ГТ в твердых ЭМ описывается с использованием нескольких математических моделей, рассматривающих дефекты различной геометрической формы и размеров и базирующихся на различных физических механизмах локализации энергии ударного сжатия в ГТ. Особое место в теоретических исследованиях занимает вязкопластическая модель ГТ. Бурное развитие этих исследований относится к середине 80-х годов прошлого века (Хасанов Б.А., Аттетков А.В., Борисов А.А. Ударно-волновое инициирование пористых энергетических материалов и вязкопластическая модель горячих точек // Химическая физика. 1996. Т. 15, № 7 С. 53–125); в настоящее время они актив-

но развиваются как российскими, так и зарубежными исследователями. При этом, несмотря на достигнутые результаты по рассматриваемой проблеме, ряд вопросов является еще открытым и требует дальнейшего изучения. В частности, актуальными остаются вопросы о влиянии тонкого слоя пластификатора (в дальнейшем — термически тонкого покрытия) на поверхности пластически затекаемых пор, эффектов тепловой диссипации, плавления, теплопереноса и межфазного теплообмена на формируемое температурное поле и критические условия ударно-волнового инициирования очаговой химической реакции в двухфазном пористом ЭМ.

Цель проведенных исследований — разработка математических моделей и методов математического моделирования мезоскопических процессов тепловой диссипации и теплопереноса при распространении ударной волны в двухфазных пористых ЭМ, сопровождаемых проявлением различных эффектов неоднородности — фазовых переходов, межфазного теплообмена, очагового химического разложения.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение **следующих основных задач**:

1. Разработка базовой математической модели процесса формирования температурного поля при распространении ударной волны в двухфазном пористом ЭМ и иерархии ее упрощенных аналогов, применение которых позволяет значительно сократить вычислительные затраты при математическом моделировании ударно-волновых процессов в изучаемой системе.

2. Исследование структуры фронта ударной волны и эффектов кумуляции энергии ударного сжатия на стадии, предшествующей возбуждению очаговой химической реакции в двухфазном пористом ЭМ.

3. Разработка методов численного анализа мезоскопических процессов тепловой диссипации, теплопереноса, плавления и межфазного теплообмена, установление специфических особенностей влияния указанных процессов на формируемое температурное поле и критические условия ударно-волнового инициирования очаговой химической реакции в двухфазном пористом ЭМ.

Методы исследования. При решении задач, возникших в ходе выполнения диссертационной работы, использовались различные классы математических методов: динамики многофазных сред и математической теории теплопроводности, качественной теории дифференциальных урав-

нений, матричного анализа и вычислительной математики.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов гарантируется строгостью используемого математического аппарата и подтверждается сравнением результатов, полученных с использованием различных методов и вычислительных экспериментов. Сформулированные в работе допущения обоснованы как путем их содержательно-го анализа, так и методами математического моделирования. Результаты диссертационной работы согласуются с известными результатами других авторов и экспериментальными данными по УВЧ пористых ЭМ.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:

1. Разработанная иерархия математических моделей процесса формирования температурного поля при распространении ударной волны в двухфазном пористом ЭМ — вязкопластической среде, содержащей сферические поры с тонким слоем пластификатора на их поверхности.

2. Результаты теоретического анализа структуры фронта ударной волны и эффектов кумуляции энергии ударного сжатия, теоретические оценки пороговых условий ударно-волнового инициирования очаговой химической реакции в двухфазном пористом ЭМ.

3. Результаты вычислительных экспериментов, устанавливающие специфические особенности влияния мезоскопических процессов тепловой диссипации, теплопереноса и межфазного теплообмена на формируемое температурное поле и критические условия возбуждения очаговой химической реакции в ударно-сжатом двухфазном пористом ЭМ при отсутствии и наличии расплавленных зон в окрестности пластически затекаемых пор.

Практическая значимость диссертационной работы связана с ее прикладной ориентацией, а полученные результаты могут быть использованы при исследовании и прогнозировании температурного состояния ударно-сжатых двухфазных ЭМ, определении критических условий ударно-волнового инициирования очаговой химической реакции в изучаемой системе.

Разработан и зарегистрирован программный комплекс «PMTFF — Расчет температурного поля ударно-сжатого вязкопластического пористого материала», позволяющий выполнять численные расчеты, представлять полученные результаты в табличной форме и сопровождать их

графическими иллюстрациями (свидетельство о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ № 2012617548 от 21.08.2012 г.)

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались на V Всероссийской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2010), XVI-XVIII Школах–семинарах молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Санкт-Петербург, 2007; Жуковский, 2009; Звенигород, 2011), Всероссийской конференции по математике и механике (Томск, 2008), V и VI Всероссийских конференциях «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 2009 и 2011).

Диссертация является составной частью фундаментальных исследований, проводимых в рамках грантов Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (гранты НШ – 4140.2008.8; НШ – 4046.2010.8; НШ – 255.2012.8).

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в 12 научных работах, в том числе в 7 статьях из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, и 1 тезисах докладов.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 130 страницах, содержит 25 иллюстраций. Библиография включает 131 наименование.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность д.ф.-м.н., профессору кафедры математического моделирования МГТУ им. Н.Э. Баумана Игорю Куприяновичу Волкову и к.ф.-м.н., с.н.с., заведующему лабораторией взрывных процессов в конденсированных средах ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН Борису Сергеевичу Ермолаеву за научные консультации и поддержку.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая

значимость полученных результатов, их достоверность, основные положения, выносимые на защиту, а также приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

Первая глава посвящена математическому моделированию волновых процессов в двухфазных пористых материалах.

Рассматривается задача о стационарной УВ, распространяющейся со скоростью D в двухфазном пористом материале — несжимаемой вязкопластической среде (фаза 1), содержащей сферические поры радиуса a_0 (регулярная ячеистая схема; наличием газа в порах пренебрегается) с покрытием их поверхности (фаза 2; несжимаемая вязкая среда). В предположении, что характерная длина волны много больше размера пор и расстояния между ними, в системе координат, связанной с волной, интегралы уравнений сохранения массы и импульса на фронте УВ можно представить в следующем виде, справедливом для всех промежуточных состояний в волне (объемным содержанием фазы 2 пренебрегается):

$$p - p_0 = \rho_s D^2 \frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha_0^2}; \quad p_0 = \frac{2Y}{3} \ln \frac{\alpha_0}{\delta + \alpha_0 - 1} \quad (1)$$

(p_0 — амплитуда упругого предвестника; Y — предел текучести материала фазы 1). При этом зависимости между среднеинтегральными и фазовыми значениями величин двухфазного пористого материала определяются равенствами

$$p = \alpha^{-1} [\delta p_2 + (1 - \delta) p_1]; \quad \rho = \alpha^{-1} \rho_s = \alpha^{-1} [\delta \rho_2 + (1 - \delta) \rho_1] \approx \alpha^{-1} \rho_1; \\ \alpha = b^3 (b^3 - a^3)^{-1}; \quad \delta = (c^3 - a^3) (b^3 - a^3)^{-1},$$

где p — давление; ρ — плотность; b — радиус сферического объема характерного (представительного) элемента двухфазного пористого материала; c — радиус контактной границы фаз; α, δ — концентрационные симплексы подобия пористого материала.

Показано, что результирующее уравнение связи, определяющее скачок начального состояния изучаемого материала во фронте УВ, динамически неравновесно и может быть представлено в виде суммы динамических слагаемых $p_d(\ddot{\alpha}, \dot{\alpha}, \alpha, \delta)$ и $p_v(\dot{\alpha}, \alpha, \delta)$, отражающих инерционные и вязкие эффекты при затекании пор, и слагаемого $p_s(\alpha, \delta)$, характеризующего статическое сопротивление материала фазы 1:

$$p = p_d(\ddot{\alpha}, \dot{\alpha}, \alpha, \delta) + p_v(\dot{\alpha}, \alpha, \delta) + p_s(\alpha, \delta). \quad (2)$$

Равенства (1) с учетом уравнения связи (2), в котором нужно перейти к переменному $\xi = (x - Dt)/a_0$, определяют структуру фронта стационарной УВ в двухфазном пористом материале. Математическая модель, используемая при анализе волнового профиля в изучаемой системе, имеет вид:

$$\frac{d^2\alpha}{d\xi^2} = \left\{ \frac{B(\alpha, \delta, \gamma)}{6} \left(\frac{d\alpha}{d\xi} \right)^2 + \frac{4kR(\alpha_0 - 1)^{2/3}}{3(\alpha - 1)} \times \right. \\ \left. \times \frac{(\alpha - 1)(1 - \delta) + \zeta\alpha\delta}{\delta + \alpha - 1} \frac{d\alpha}{d\xi} - F(\alpha, \alpha_0, \delta, \gamma, k) \right\} A^{-1}(\alpha, \delta, \gamma), \quad \xi > 0; \\ \exists \lim_{\xi \rightarrow +\infty} \frac{d\alpha}{d\xi} = 0; \quad \exists \lim_{\xi \rightarrow +\infty} \alpha = \alpha_0; \quad (3)$$

$$F(\alpha, \alpha_0, \delta, \gamma, k) = \alpha(\alpha_0 - 1)^{2/3} \left\{ [1 + (\gamma - 1)\delta] \times \right. \\ \left. \times (\alpha_0 - \alpha)\alpha_0^{-2} + \frac{2k^2}{3} \ln \frac{\alpha_0(\delta + \alpha - 1)}{\alpha(\delta + \alpha_0 - 1)} \right\};$$

$$\alpha \in [1, \alpha_0]; \quad \zeta \in \mathbb{R}^+; \quad \gamma \in \mathbb{R}^+; \quad 0 < \delta \leq 1;$$

структура функционалов $A(\alpha, \delta, \gamma)$ и $B(\alpha, \delta, \gamma)$ известна [1, 2];

$$k = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{Y}{\rho_1}}; \quad R = \frac{\eta}{a_0 \sqrt{Y\rho_1}}; \quad \zeta = \frac{\mu}{\eta}; \quad \gamma = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

(η, μ — коэффициенты вязкости фаз 1 и 2 соответственно).

Анализ фазового портрета системы (3) в плоскости $\alpha 0g (g = d\alpha/d\xi)$ показывает, что точки ее покоя принадлежат отрезку $[1, \alpha_0]$ оси 0α , т.е. имеют координаты $(\alpha, 0)$, где $\alpha \in [1, \alpha_0]$. Установлено, что параметр k^2 является бифуркационным и при $k^2 \in (0, k_1^2) \cup (k_{\max}^2, +\infty)$ система (3) имеет две точки покоя $O_1 = (1, 0)$ и $O_0 = (\alpha_0, 0)$. При

$$k^2 = k_1^2 \triangleq \frac{3(\alpha_0 - 1)[1 + (\gamma - 1)\delta]}{2\alpha_0^2 \ln[(\delta + \alpha_0 - 1)/(\alpha_0\delta)]}$$

точка покоя O_1 становится двойной; с ростом значений k^2 из этой точки «выходит» третья точка покоя $O_\alpha = (\alpha, 0)$, попадающая в точку покоя O_0 при $k^2 = k_{\max}^2$. При дальнейшем росте k^2 точка покоя O_1 «исчезает» из зоны анализа. Значение параметра $k_{\max}^2$ определяет минимальную скорость распространения УВ

$$D_{\min} = \left\{ \frac{2Y\alpha_0(1 - \delta)}{3\rho_1(\delta + \alpha_0 - 1)[1 + (\gamma - 1)\delta]} \right\}^{1/2},$$

появление которой физически обусловлено проявлением механических свойств материала фазы 1 двухфазного пористого материала.

Подробно исследован инерционный режим пластического затекания пор ($R = 0$). Теоретически обоснована возможность существования критической скорости распространения УВ, превышающей $D_{\min}$ и приводящей к полному пластическому затеканию пор во фронте УВ:

$$D_{cr} = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1} \left\{ \frac{2Y [(1 - \delta)(\alpha_0 - 1) + \delta(\delta - 2) \ln [(\delta + \alpha_0 - 1)/\delta] + \ln \alpha_0]}{\rho_1(\alpha_0 + 2) [1 + (\gamma - 1)\delta]} \right\}^{1/2}.$$

Представлены теоретические оценки ширины фронта УВ слабой интенсивности в предельных режимах затекания пор: инерционном ($R = 0$) и сильновязком ($R \gg 1$), а также результаты вычислительных экспериментов, устанавливающие специфические особенности процесса распространения стационарной УВ в двухфазном пористом материале.

Исследованы эффекты мезоскопического процесса тепловой диссипации при распространении УВ в двухфазном пористом материале, устанавливающие специфические особенности эффектов кумуляции энергии ударного сжатия в изучаемой системе. Теоретически обосновано, что при низкоамплитудных динамических воздействиях $p_e \sim Y$ (p_e — амплитуда УВ) в сильновязком режиме затекания пор ($R \gg 1$) основной вклад в процесс тепловой диссипации вносит пластичность двухфазного пористого материала, а при $p_e \gg Y$ — вязкие свойства его фаз. Показано, что в реализуемом режиме затекания пор суммарное приращение диссипированной энергии во фронте УВ представляется соотношением, называемым ударной адиабатой или адиабатой Гюгонио. При проявлении инерционных эффектов в процессе затекания пор это соотношение не выполняется, поскольку в этом случае возрастает роль составляющей, определяющей вклад кинетической энергии мезомасштабных движений в суммарное приращение диссипированной энергии при ударном переходе. Отмечено, что к аналогичному эффекту могут также приводить как мезоскопические процессы теплового разупрочнения фаз, так и эффекты локального плавления в окрестности затекаемых пор.

Вторая глава посвящена математическому моделированию мезоскопических процессов тепловой диссипации, теплопереноса и межфазного теплообмена в двухфазных пористых материалах при ударно-волновом нагружении.

Разработаны базовая (далее — «**точная**») математическая модель процесса теплопереноса в изучаемой системе и иерархия ее упрощенных аналогов, применение которых позволяет значительно сократить затраты при проведении вычислительного эксперимента.

Используются стандартные предположения об идеальности теплового контакта на границе раздела фаз 1 и 2, а также о том, что покрытие является термически тонким и допустима реализация идеи «сосредоточенная емкость». Если ввести в рассмотрение среднеинтегральную по толщине покрытия температуру

$$\langle T(t) \rangle = \frac{3}{c^3 - a^3} \int_a^c T(\tau, t) r^2 dr$$

и воспользоваться допущением о равенстве температур границ покрытия его среднеинтегральной температуре и температуре подвижной границы $r = c(t)$ фаз, т.е.

$$T(a + 0, t) = T(c - 0, t) = T(c + 0, t) = \langle T(t) \rangle,$$

то возможно преобразование «точной модели» к ее упрощенному аналогу — модели «**сосредоточенная емкость**»:

$$\begin{aligned} c_1 \rho_1 \left[\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} + v_r \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] &= \frac{\lambda_1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] - \\ &- 2Y \frac{v_r}{r} + 12\eta \left(\frac{v_r}{r} \right)^2, \quad c(t) < r < b(t), \quad t > 0; \\ r(t)|_{t=0} &= r_0; \quad v_r(r, t)|_{t=0} = 0; \quad T(r, t)|_{t=0} = T_0; \quad \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=b(t)} = 0; \quad (4) \\ \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=c(t)} &= \frac{c(t)}{3\lambda_1} \frac{\delta}{\delta + \alpha - 1} \left[c_2 \rho_2 \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \Big|_{r=c(t)} - \frac{4\mu}{3} \frac{\dot{\alpha}^2(t)}{(\alpha - 1)(\delta + \alpha - 1)} \right]; \\ v_r &= \frac{a_0^3 \dot{\alpha}(t)}{3(\alpha_0 - 1)r^2}; \quad r^3 = r_0^3 + a^3(t) - a_0^3, \end{aligned}$$

где T — температура; $c_k, \lambda_k, k \in \{1, 2\}$ — удельная массовая теплоемкость и теплопроводность фаз 1 и 2 соответственно.

Математическая модель (4) представляет собой смешанную задачу нестационарной теплопроводности, в которой наличие термически тонкого покрытия на подвижной границе $r = c(t)$ фазы 1 фактически учтено граничным условием, явно содержащим производную температуры по времени. **Данная модель является базовой** при проведении дальней-

ших исследований, при этом основное внимание уделяется сильновязкому режиму затекания пор ($R \gg 1$), представляющему наибольший интерес в проблеме УВЧ пористых ЭМ. Теоретически обоснована возможность корректного (М.А. Пудовкин, И.К. Волков; 1978) уточнения модели (4) путем реализации **уточненной модели «сосредоточенной емкости»**.

При проведении вычислительных экспериментов, результаты которых частично представлены на рис. 1 (а — $\delta = 0$; б — $\delta = 0.01$), где $\Theta_c = c_1 \rho_1 [T(c, t) - T_0] / p_e$, $R_1 = a / a_0$, использованы следующие безразмерные определяющие параметры:

$$Re = \frac{a_0 \sqrt{p_e \rho_1}}{\eta}; \quad Pr = \frac{c_1 \eta}{\lambda_1}; \quad \beta = \frac{Y}{p_e}; \quad \zeta = \frac{\mu}{\eta}; \quad \varepsilon = \frac{c_2 \rho_2}{c_1 \rho_1}.$$

Расчет проведен при $\alpha_0 = 1.11$ (пористость $\phi_0 = 0.1$); $Re = 0.1$; $\beta = 0.1$; $\zeta = 1$; $\varepsilon = 1$ с использованием двух неявных разностных схем, полученных конечно-разностным и интегро-интерполяционным методами. Построена их программная реализация и проведен сравнительный анализ.

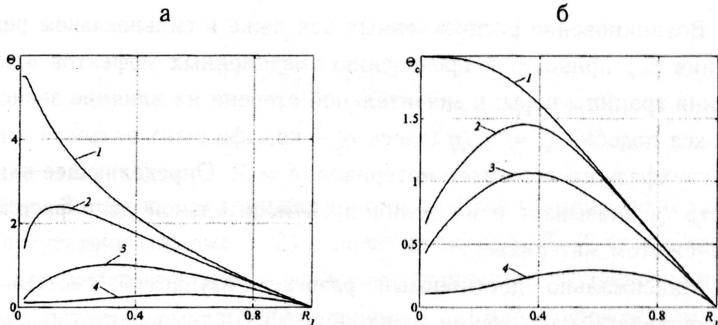


Рис. 1. Эволюция температурного профиля подвижной границы фаз при различных значениях числа Прандтля: 1 — $Pr = \infty$ (теплопроводность отсутствует); 2 — $Pr = 10^5$; 3 — $Pr = 10^4$; 4 — $Pr = 10^3$

Методами численного анализа математической модели (4), (2) обосновано существенное влияние на процесс формирования температурного поля в ударно-сжатом пористом материале числа Прандтля — критерия, характеризующего взаимодействие двух диффузионных процессов: тепловой диссипации вследствие вязкого трения и теплопроводности.

Проявление эффекта теплопроводности в сильновязком режиме затекания пор ($Re \ll 1$) приводит к возникновению характерного максимума на кривой $\Theta_c(R_1)$ (рис. 1). При преобладании инерционных эффектов ($Re \gg 1$) немонотонность температурного профиля подвижной границы фаз отсутствует. Проведенные оценки числа Прандтля показывают, что для типичных ЭМ $Pr = 10^4 - 10^6$, а для металлов — $10^3 - 10^5$.

Установлены специфические особенности процесса формирования температурного поля в изучаемой системе, обусловленные проявлением мезоскопических процессов плавления в окрестности затекаемых пор и межфазного теплообмена. Отмечено, что обсуждение вопроса о влиянии воздушных (газовых) пор или включений других физических свойств на температурное состояние ударно-сжатого пористого материала приводит к достаточно противоречивым выводам.

По результатам вычислительных экспериментов, проведенных в предположении о том, что газ является совершенным и допустимо использование условия его гомобаричности при анализе процесса межфазного теплообмена (Р.И. Нигматулин, Н.С. Хабеев; 1974), можно сделать следующие выводы:

1. Возникновение расплавленных зон даже в сильновязком режиме затекания пор приводит к проявлению инерционных эффектов в законе движения границы поры; в значительной степени их влияние зависит от симплекса подобия $\zeta_* = \eta_*/\eta$ (здесь η_* — коэффициент вязкости жидкой фазы) двухфазного пористого материала ($\delta = 0$). Определяющее влияние параметр ζ_* оказывает и на величину относительной доли расплава в ударно-сжатом материале.

2. Максимально достижимый разогрев изучаемой системы при ударно-волновом нагружении может превышать температуру плавления материала твердой фазы (рис. 2), где $\Theta_1 = c_1 \rho_1 [T(a, t) - T_0]/p_e$, и зависит от симплексов подобия ζ_* и $\Lambda_* = \lambda_*/\lambda_1$ (λ_* — теплопроводность жидкой фазы).

3. Существенное влияние на условия возникновения расплавленных зон в ударно-сжатом пористом материале и эволюцию формируемого в нем температурного поля оказывает число Прандтля.

4. В сильновязком режиме затекания пор ($Re \ll 1$) процесс межфазного теплообмена не оказывает значительного влияния на температурный профиль $\Theta_1(R_1)$ подвижной границы поры и при отсутствии

($\pi_{g0} = 0$), и при наличии ($\pi_{g0} = 10^{-2}$) газа в ней (рис. 3), где $\pi_{g0} = p_{g0}/p_c$. Доминирующими в этом случае являются диффузионные процессы, протекающие в твердой фазе материала.

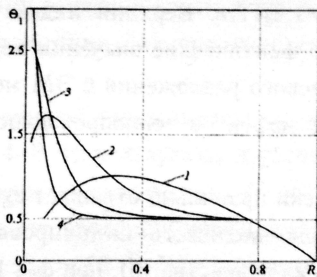


Рис. 2. Эволюция температурного профиля границы поры при отсутствии (кривая 1) и наличии расплавленной зоны (кривые 2–4; $\Lambda_* = 1$) в ее окрестности: 2 – $\zeta_* = 0.1$; 3 – $\zeta_* = 0.01$; 4 – $\zeta_* = 0.001$

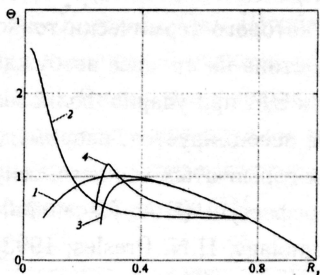


Рис. 3. Эволюция температурного профиля границы поры при отсутствии (кривые 1, 2) и наличии (кривые 3, 4) газа в ней при реализации режимов тепловой диссипации, не приводящих к образованию зоны плавления (кривые 1, 3) или сопровождаемых ее возникновением (кривые 2, 4; показатель адиабаты газа $\gamma = 1.4$)

В третьей главе с применением математической модели «сосредоточенная емкость» исследовано влияние эффектов неодноточности на критические условия ударно-волнового инициирования очаговой химической реакции в двухфазном пористом ЭМ.

Представлена теоретическая оценка предела p_{ign}^* возбуждения химической реакции в изучаемой системе

$$p_{ign}^* = (3\zeta)^{-1} \varepsilon e_{ign}^*, \quad (5)$$

где $e_{ign}^* = c_1 \rho_1 (T_{ign} - T_0)$ — объемная плотность диссипированной энергии при ударном переходе. Для типичных ЭМ (таких, как ТНТ, ТЭН, гексоген), принимая $c_1 \rho_1 \cong 2 \cdot 10^6$ Дж/(м³ · К) и $T_{ign} - T_0 = (400 - 600)K$, находим $e_{ign}^* = (0.8 - 1.2)ГПа$. Верхний индекс «*» в (5) акцентирует внимание на то, что фактические значения порогового давления p_{ign} инициирования химического разложения в ЭМ могут отличаться от p_{ign}^* вследствие проявления эффектов теплопроводности при затекании пор (обычно $p_{ign} > p_{ign}^*$).

Оценка (5) физически правильно отражает существующие представления о процессе ударно-волнового инициирования пористых ЭМ. В частности, как следует из равенства (5), при $\zeta < 1$ наличие тонкого слоя пластификатора на поверхности пор оказывает флегматизирующее действие на стадии генерации очагов разложения в ударно-сжатом ЭМ. Отметим, что симплекс подобия ϵ физических свойств фаз ЭМ в этом случае близок к единице. Практический интерес представляет также случай $\zeta > 1$, при реализации которого термически тонкое покрытие оказывает сенсibiliзирующее действие на процесс возбуждения очаговой химической реакции в пористом ЭМ при ударно-волновом нагружении. Его физическая интерпретация ассоциируется, например, с анализом проблемы УВЧ водоземulsionных взрывчатых веществ, сенсibiliзируемых полыми стеклянными микросферами (Б.А. Хасаинов, Б.С. Ермолаев; 1992; B.A. Khasainov, B.S. Ermolaev, H.N. Presles; 1993).

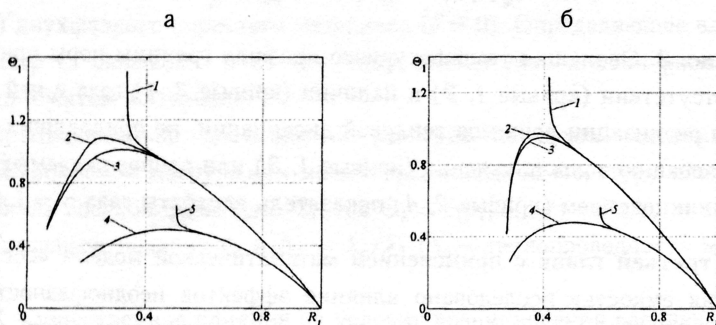


Рис. 4. Эволюция температурного профиля границы поры при различных значениях числа Рейнольдса:
1–3 — $Re = 0.1$; 4, 5 — $Re = 0.05$

Предложен численный метод реализации разработанной математи-

ческой модели, применение которого позволило установить специфические особенности влияния мезоскопических процессов теплопереноса и межфазного теплообмена на критические условия возбуждения очаговой химической реакции в ударно-сжатом пористом ЭМ. Кинетические закономерности при зажигании ЭМ описываются реакцией нулевого порядка.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов частично представлены на рис. 4–6. Используемые в расчетах данные о теплофизических и термокинетических свойствах ЭМ соответствуют ТНТ. Рис. 4 иллюстрирует особенности эволюции профиля $\Theta_1(R_1)$ при отсутствии (а; $\pi_{g0} = 0$) и наличии (б; $\pi_{g0} = 10^{-2}$) газа в поре ($\delta = 0$; $Pr = 10^4$; $\beta = 0.1$), рис. 5 — зависимость критического радиуса a_0^* воспламенения ЭМ с начальной пористостью $\phi = 0.1$ ($\alpha_0 = 1.11$) от безразмерного параметра $\beta^{-1} = p_e/Y$ ($Re = 0.1$; $Pr = 10^4$) при различных значениях коэффициента вязкости (1, 2 — $\eta = 10$ Па·с; 3 — $\eta = 1$ Па·с) и предела текучести (1, 3 — $Y = 0.2$ ГПа; 2 — $Y = 0.1$ ГПа). Штриховая линия определяет предел p_{ign}^* возбуждения химической реакции (Б.А. Хасаинов, А.В. Аттетков, А.А. Борисов; 1996). Видно, что в анализируемом (сильновязком) режиме затекания пор доминирующее влияние на критические условия ударно-волнового инициирования оказывают диффузионные процессы, протекающие в твердой фазе пористого ЭМ.

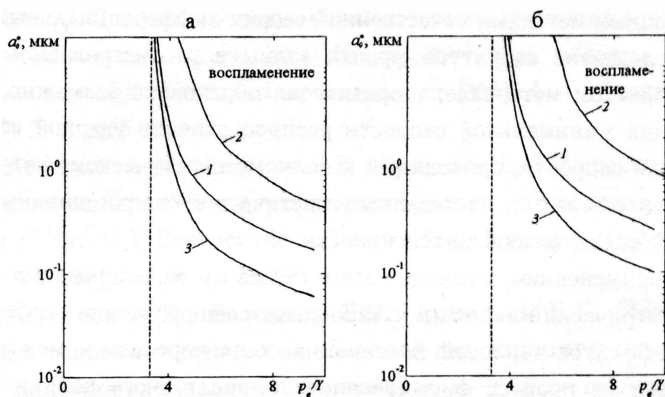


Рис. 5. Влияние коэффициента вязкости и предела текучести на порог инициирования химической реакции в пористом ЭМ при отсутствии (а; $\pi_{g0} = 0$) и наличии (б; $\pi_{g0} = 10^{-2}$) газа в порах ($Y = 0.2$ ГПа)

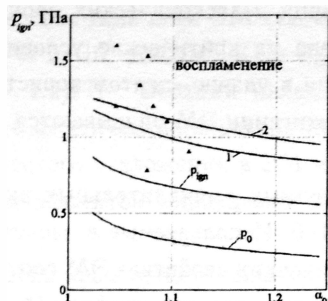


Рис. 6. Пороговые давления p_{ign} и нижний предел p_{ign}^* возбуждения очаговой химической реакции в прессованном ТНТ при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) газа в порах ($\delta = 0$; $Y = 0.2$ ГПа; $\eta = 10$ Па·с; ▲ — экспериментальные данные)

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработаны иерархия математических моделей и методы численного анализа мезоскопических процессов тепловой диссипации, теплопереноса и межфазного теплообмена при распространении ударной волны в вязкопластическом пористом энергетическом материале, содержащем сферические поры с тонким слоем пластификатора на их поверхности.

2. Общими методами качественной теории дифференциальных уравнений исследована структура фронта волны в рассматриваемом двухфазном пористом материале; теоретически обоснована возможность существования минимальной скорости распространения ударной волны и критической скорости, приводящей к полному пластическому затеканию пор во фронте волны; представлены теоретические оценки ширины фронта ударной волны слабой интенсивности.

3. С применением методов математического моделирования проведен параметрический анализ и установлены специфические особенности влияния эффектов тепловой диссипации, теплопереноса и межфазного теплообмена на процесс формирования температурного поля и критические условия возбуждения очаговой химической реакции в ударно-сжатом двухфазном пористом энергетическом материале при отсутствии и наличии расплавленных зон в окрестности пластически затекаемых пор.

4. Разработан программный комплекс «PMТFF — Расчет температурного поля ударно-сжатого вязкопластического пористого материала», позволяющий выполнять численные расчеты, представлять полученные результаты в табличной форме и сопровождать их графическими иллюстрациями (свидетельство о государственной регистрации в Реестре программ для ЭМВ № 2012617548 от 21.08.2012 г.)

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Аттетков А.В., Головина Е.В., Ермолаев Б.С. Математическое моделирование мезоскопических процессов тепловой диссипации и теплопереноса в двухфазном пористом материале при ударном сжатии // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М., 2007. Т. 1. С. 364–367.

2. Attetkov A.V., Golovina E.V., Ermolaev B.S. Mathematical simulation of mesoscopic processes of heat dissipation and heat transfer in a two-phase porous material subjected to shock compression // Journal of Heat Transfer Research. 2008. Vol. 39, No 6. P. 479–487.

3. Аттетков А.В., Головина Е.В., Ермолаев Б.С. Математическое моделирование мезоскопических процессов тепловой диссипации и теплопереноса при наличии расплавленных зон в ударно-сжатом пористом материале // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях: труды XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М., 2009. Т. 2. С. 286–289.

4. Аттетков А.В., Головина Е.В., Ермолаев Б.С. Иерархия моделей процесса теплопереноса в двухфазном пористом материале при ударном сжатии // Труды V Всероссийской национальной конференции по теплообмену. М., 2010. Т. 8. С. 50–53.

5. Аттетков А.В., Головина Е.В., Ермолаев Б.С. Математическое моделирование процессов тепловой диссипации и теплопереноса при наличии расплавленных зон в ударно-сжатом пористом материале // Тепловые процессы в технике. 2010. Т. 2, № 3. С. 129–132.

6. Аттетков А.В., Ермолаев Б.С., Пилявская Е.В. Математическое моделирование процесса межфазного теплообмена в ударно-сжатом пористом материале // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в но-

вых энергетических технологиях: тез. докл. XVIII Школы–семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М., 2011. С. 241–242.

7. Пилявская Е.В., Аттетков А.В. Эффекты тепловой диссипации при распространении ударной волны в двухфазном пористом материале // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2011. № 3. С. 53–58.

8. Аттетков А.В., Ермолаев Б.С., Пилявская Е.В. Влияние межфазного теплообмена на процесс формирования температурного поля в ударно–сжатом пористом материале // Тепловые процессы в технике. 2011. Т. 3, № 7. С. 333–337.

9. Аттетков А.В., Пилявская Е.В. Оценка критических условий ударно–волнового инициирования химической реакции в двухфазном пористом энергетическом материале // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2012. № 2. С. 81–86.

10. Аттетков А.В., Ермолаев Б.С., Пилявская Е.В. Математическое моделирование процесса межфазного теплообмена при наличии расплавленных зон в ударно–сжатом пористом материале // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4, № 8. С. 363–368.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617548. PMTFF — Расчет температурного поля ударно–сжатого вязкопластического пористого материала / Е.В. Пилявская. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21.08.2012.

12. Аттетков А.В., Пилявская Е.В. Влияние межфазного теплообмена на критические условия ударно–волнового инициирования очаговой химической реакции в энергетическом материале // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. Спец. выпуск № 2 «Математическое моделирование в технике». 2012. С. 4–8.