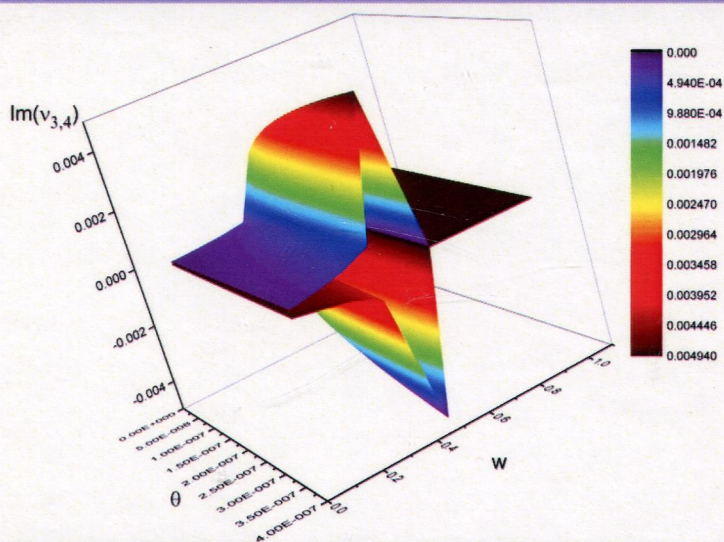


А.В. Федоров, Н.Н. Федорова,  
П.А. Фомин, С.А. Вальгер

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ



Новосибирск, 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(СИБСТРИН)  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ  
МЕХАНИКИ им. С.А. Христиановича СО РАН



**А.В. Федоров, Н.Н. Федорова, П.А. Фомин, С.А. Вальгер**

# **РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ**

**Монография**

НОВОСИБИРСК 2016

УДК 536.468

**Федоров А.В., Федорова Н.Н., Фомин П.А., Вальгер С.А.**

Распространение взрывных процессов в неоднородных средах.

Новосибирск: Параллель, 2016. 258 с.

**ISBN 978-5-98901-183-4**

Монография посвящена вопросам математического моделирования динамических явлений в гетерогенных/гомогенных средах. Актуальность исследований обусловлена широким распространением в промышленности рабочих тел типа газовых смесей, гетерогенных смесей газов с частицами или жидкости с пузырьками газов, что создает опасность возникновения катастрофических взрывов. Также представлены результаты о распространении ударных волн, образовавшихся в результате взрыва, и их взаимодействии с отдельно стоящими сооружениями или их комплексами.

Книга предназначена для научных сотрудников, аспирантов и магистрантов, работающих в области механики гетерогенных и сплошных сред и математического моделирования физико-химических процессов. Она будет также полезна техническим специалистам, занимающимся вопросами взрыво- и пожаробезопасности технологических процессов и проектированием сооружений, устойчивых к воздействию взрывных волн.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Мин. образования и науки (проект № 211, задание № 2014/140), РФФИ: № 15-08-01947-а, № 15-07-06581-а, РНФ: проект № 16-19-00010.

Печатается по решению Ученого Совета ИТПМ СО РАН

Рецензенты:

- О.Б. Ковалев, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией ИТПМ СО РАН;
- И.В. Яковлев, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией ИГиЛ СО РАН

**ISBN 978-5-98901-183-4**

© Федоров А.В., Федорова Н.Н.,  
Фомин П.А., Вальгер С.А., 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>6</b>
Список литературы .....	13
<b>Глава 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ СПЛОШНЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ</b> .....	<b>15</b>
1.1. Основные уравнения механики гомогенной химически активной среды .....	17
1.1.1. Законы сохранения .....	17
1.1.2. Основные уравнения для описания течения вязкой теплопроводной смеси реагирующих газов с учетом перемешивания.....	24
1.2. Математические модели для описания движения смеси газа и мелких твердых частиц .....	28
1.2.1. Основные уравнения для описания гетерогенной смеси газа и твердых частиц с учетом их собственного давления.....	28
1.2.2. Основные уравнения для описания течения смеси газа и реагирующих частиц, различные приближения данной модели .....	37
1.3. Химические превращения в газовзвесьях в режиме взаимодействующих континуумов .....	41
1.3.1. Основные уравнения взаимодействующих континуумов с учетом конкретного вида неравновесной химической реакции .....	43
1.3.2. Воспламенение газовзвеси в континуальном режиме.....	47
1.4. Численное исследование течений композитных реагирующих смесей .....	58
1.4.1. Уравнения механики гетерогенных сред для описания движения к-смеси.....	58
1.4.2. Детонация в смеси реагирующих газов и реагирующих частиц .....	61
1.4.3. Тепловой взрыв в смеси капель и твердых частиц ....	67
Список литературы .....	71
<b>Глава 2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ С УДАРНЫМИ И ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ</b> .....	<b>75</b>
2.1. Обзор методов для расчета течений с ударными волнами ....	75
2.2. Схемы для квазилинейного гиперболического уравнения .....	78
2.2.1. Противопотоковая TVD-схема .....	78

2.2.2. СР-метод.....	80
2.3. Разностные схемы для уравнений газовой динамики .....	86
2.3.1. Временная аппроксимация .....	86
2.3.2. FVS-методы.....	88
2.3.4. FDS-методы.....	91
2.3.5. Метод коррекции потоков (FCT).....	96
2.4. Адаптация расчетной сетки.....	97
2.5. Решение тестовых задач для уравнений Эйлера на равномерных сетках .....	102
2.5. Тестовые расчеты 1D- и 2D-уравнений Эйлера на адаптивных сетках .....	111
Список литературы .....	118
<b>Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ОКРЕСТНОСТИ КОМПЛЕКСОВ ЗДАНИЙ. 123</b>	
3.1. Физика взрыва .....	125
3.2. Сведения о ПК ANSYS AUTODYN .....	128
3.3. Расчет ударно-волнового воздействия на призму прямоугольного сечения .....	130
3.4. 3D-моделирование ударно-волнового течения в окрестности двух призм.....	141
3.5. 3D-расчет ударно-волнового воздействия на комплекс призм, имитирующих городскую застройку .....	144
Список литературы .....	153
<b>Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ СМЕСЯХ ..... 156</b>	
4.1. Экспериментальное исследование инициирования ударной волны в химически активной пузырьковой смеси.....	156
4.1.1. Инициирование ударной волны в химически активной пузырьковой жидкости путем отражения детонационной волны от границы раздела сред .....	156
4.2. Кавитационные эффекты в реакторе, содержащем химически активную пузырьковую смесь .....	165
4.2.1. Экспериментальное изучение кавитационных процессов в химически активной пузырьковой смеси ....	166
4.2.2. Расчет динамики пузырьков при последовательном нагружении волнами сжатия и разрежения .....	172
4.3. Инициирование пузырьков взрывчатого газа преломленными ударными волнами .....	178

4.3.1.	Экспериментальное наблюдение воспламенения пузырьков преломленными ударными волнами .....	182
4.3.2.	Расчет инициирования пузырька преломленной ударной волной .....	183
4.4.	Моделирование ударно-волнового инициирования переобогащенных горючим пузырьков .....	187
4.4.1.	Модель динамики и взрыва пузырька с учетом конденсации паров горючего .....	197
4.4.2.	Расчет ударно-волновой динамики и взрыва переобогащенного горючим пузырька без учета конденсации паров горючего .....	205
4.4.3.	Расчет ударно-волновой динамики и взрыва переобогащенного горючим пузырька с учетом конденсации паров горючего .....	208
4.4.4.	Расчет взрывных пределов пузырька .....	212
4.4.5.	Оценка характерного времени конденсации .....	216
4.4.6.	Ударно-волновое инициирование бедных горючим пузырьков .....	218
4.4.7.	Периодические взрывные процессы в пузырьковых средах, содержащих жидкое монотопливо .....	220
4.4.8.	Влияние химически инертного разбавителя (аргона) на динамику и взрыв кислородсодержащего пузырька ...	223
4.5.	Волна пузырьковой детонации при нормальных и повышенных начальных давлениях .....	226
	Список литературы .....	234
<b>Глава 5. ВЛИЯНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ ГОРЮЧЕГО ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ ГАЗОВЫХ И ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ.....</b>		<b>242</b>
5.1.	Введение .....	243
5.2.	Расчет конденсации паров горючего в ударной волне .....	246
5.3.	Оценка массы жидкого горючего, которая переходит в газ вследствие теплообмена с продуктами газового взрыва.....	253
5.4.	Оценка характерного времени конденсации паров горючего ..	255
5.5.	Заключение .....	256
	Список литературы .....	257