



**НГТУ
НЭТИ**

**Факультет
летательных
аппаратов**

И. А. БАЛАГАНСКИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА



**НОВОСИБИРСК
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

И. А. БАЛАГАНСКИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2023

УДК 533.2.082.32(075.8)+623.45(075.8)
Б20

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *К. Е. Милевский*
канд. физ.-мат. наук *И. А. Рубцов*

Балаганский И. А.

Б20 Экспериментальная газовая динамика: учебное пособие /
И. А. Балаганский. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 116 с.

ISBN 978-5-7782-5016-1

В учебном пособии описаны методы и средства, используемые при исследовании быстротекающих процессов. Первый раздел содержит описание экспериментальных исследовательских комплексов, таких как ударные трубы, открытые полигоны, взрывные камеры и баллистические трассы. Описаны также основные понятия системы безопасности при проведении взрывных работ. Во втором разделе рассмотрены устройства взрывного и ударного нагружения для газодинамических экспериментов. Дано понятие начального импульса, описаны характеристики методов нагружения сред взрывом: падающей, уходящей, скользящей детонационной волной, нагружение пересжатой детонацией. Раздел содержит также схемы и характеристики устройств нагружения сред взрывом и ударом. В третьем разделе представлена измерительная и регистрирующая техника для исследования быстротекающих процессов. Описаны наиболее употребительные датчики и измерительные преобразователи, устройства для оптических методов регистрации, лазерные и лазерно-доплеровские измерители-преобразователи для измерения волновых и массовых скоростей. Даны основные представления об импульсной рентгенографической технике. В четвертом разделе кратко описаны методы определения температуры и оптических свойств ударно-сжатых материалов. В пятом и шестом разделе рассмотрены относительно новые методы исследований быстротекающих процессов, такие как микроволновая диагностика и использование синхротронного излучения.

УДК 533.2.082.32(075.8)+623.45(075.8)

ISBN 978-5-7782-5016-1

© Балаганский И. А., 2023
© Новосибирский государственный
технический университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМООБРАЗУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ	15
1.1. Ударные трубы.....	15
1.2. Открытые полигоны	18
1.3. Взрывные камеры	19
1.4. Баллистические трассы (стенды).....	25
1.5. Система безопасности при проведении взрывных работ.....	28
2. УСТРОЙСТВА ВЗРЫВНОГО И УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	31
2.1. Понятие начального импульса при газодинамических экспериментах	31
2.2. Характеристики нагружения среды взрывом	32
2.2.1. Нагружение падающей детонационной волной	32
2.2.2. Нагружение уходящей детонационной волной	33
2.2.3. Нагружение скользящей детонационной волной	35
2.2.4. Нагружение пересжатой детонационной волной	36
2.3. Схемы и характеристики устройств нагружения сред взрывом и ударом.....	38
2.3.1. Первичные элементы устройств взрывного нагружения.....	38

2.3.2. Плоскороволновые детонационные генераторы (ПВДГ).....	41
2.3.3. Взрывные устройства со сходящимися детонационными волнами	42
2.4. Устройства для нагружения сред ударом	44
2.4.1. Устройства взрывного метания пластин	45
2.4.2. Устройства взрывного метания сферически сходящихся ударников.....	46
2.4.3. Пороховые ускорители или пушки.....	47
2.4.4. Баллистические ударные трубы.....	49
2.4.5. Легкогазовые ускорители	50
2.5. Устройства для сохранения ударно-сжатых веществ	51
3. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ И РЕГИСТРИРУЮЩАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ	54
3.1. Наиболее употребительные датчики и измерители-преобразователи.....	55
3.1.1. Электроконтактные датчики и вспыхивающие зазоры	55
3.1.2. Датчики реостатной методики измерения перемещений фронтов ударных волн и поверхностей тел.....	59
3.1.3. Датчики и измерители-преобразователи пьезорезистивных методик измерения давления	61
3.1.4. Пьезоэлектрические и сегнетоэлектрические датчики в методиках измерения давления	63
3.1.5. Ёмкостный датчик.....	65
3.2. Устройства оптических методов регистрации	66
3.2.1. Методы высокоскоростной фотографической регистрации	67
3.2.2. Непрерывная регистрация изображения при относительном смещении изображения и светочувствительного материала	73
3.2.3. Источники света и устройства освещения	75

3.3. Лазерные и лазерно-доплеровские измерители-преобразователи для измерения волновых и массовых скоростей.....	81
3.3.1. Лазерное измерение волновых скоростей (ЛИВС)	81
3.3.2. Лазерные доплеровские преобразователи для измерения скорости движения светоотражающих поверхностей	83
3.4. Импульсная рентгенографическая техника	91
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УДАРНО-СЖАТЫХ МАТЕРИАЛОВ	94
4.1. Основы оптического измерения температуры	94
4.1.1. Фотографический метод	95
4.1.2. Фотоэлектрический метод	95
4.2. Пирометры для регистрации излучения	96
4.2.1. Одноканальный фотографический пирометр	96
4.2.2. Фотоэлектрический пирометр	97
4.2.3. Оптико-электронный пирометр	99
4.3. Температура ударно-сжатых металлов	100
5. МИКРОВОЛНОВАЯ ДИАГНОСТИКА	102
5.1. Особенности метода микроволновой диагностики.....	102
5.2. Принцип работы радиоинтерферометра	103
6. ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	105
6.1. Сведения о синхротронном излучении	105
6.2. Использование синхротронного излучения во взрывных экспериментах	106
6.2.1. Опыты с прямо прошедшим СИ. Линейный детектор.....	108

6.2.2. Опыты с прямо прошедшим СИ. Фазоконтрастная радиография.....	110
Вопросы для самопроверки	113
Библиографический список.....	115

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальная газовая динамика является дисциплиной, исследующей свойства любых сжимаемых сред, включая газообразные, жидкие и твердые. В данной работе мы будем рассматривать методы и устройства, позволяющие исследовать свойства сред применительно к задачам, которые возникали и возникают в области техники и физики взрыва и удара. Примеры практических задач, требующих информации о свойствах веществ при высоких давлениях и скоростях деформации, даны на рис. В1 и В2 отдельно для гражданских и военных областей.

Основополагающие экспериментальные исследования были начаты в конце XIX в. при изучении сжимаемости газов применительно к проблемам совершенствования артиллерии и особенно при изучении проблемы повышения безопасности подземных работ.

Открытие явления детонации в конденсированных веществах, которые стали рассматриваться и использоваться как новые сверхмощные источники энергии, инициировало экспериментальные исследования, направленные на выявление механизма этого явления и количественное описание его характеристик на уровне представлений, удовлетворяющих запросам практики взрывных работ, и на создание военной техники того времени.

При этом в экспериментах использовались в основном механические измерительные устройства. Так, при измерении давления, которое развивается при взрыве, для реализации «динамического» метода измерения использовался акселеографический прибор. Давление определялось по записи перемещения во времени поршня определенной массы под действием давления газов, отображаемого ускорением движения (запись представляла собой кривую, оставляемую на закопченной пластинке).

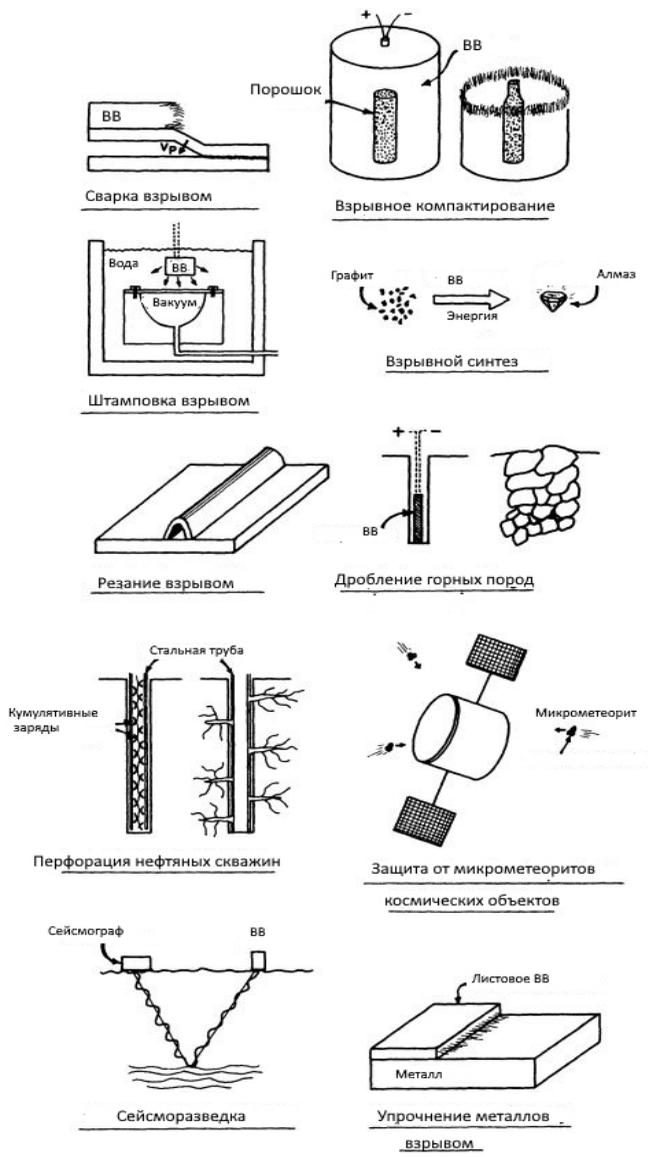


Рис. В1. Гражданские применения высокоскоростных процессов

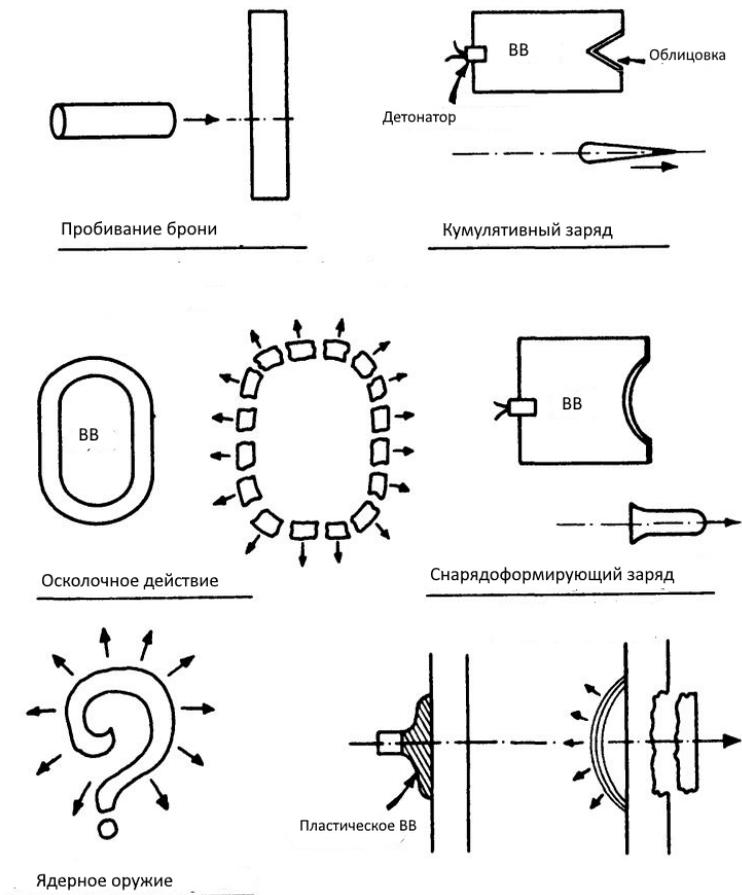


Рис. В2. Военные применения быстропротекающих процессов

При «статическом» методе измерения использовался обычно крешер Нобля (рис. В3), предложенный им в 1868 г. Этот прибор позволял находить конечное максимальное давление, действующее на поршень, который вызывал сжатие небольших медных цилиндров. Крешер Нобля состоит из корпуса (б), в который вставляется поршень (г) с головкой (а), поддерживаемой пружиной (ж). Медный цилиндрик (д), поддерживаемый резиновым кольцом (е), ставят на головку (а); корпус закрывается винтом (в).

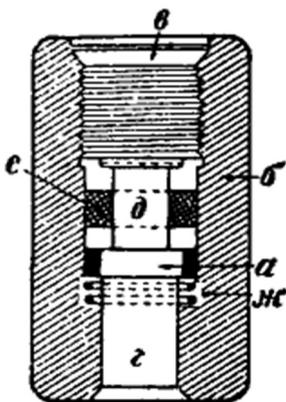


Рис. В3. Крешер Нобля

помещались в центр металлического кольца, называемого кольцом Аббота (рис. В4), с равномерно расположенными на нем шестью крешерами, поршни которых обращены к заряду.

Методы определения параметров детонации высокоплотных мощных конденсированных веществ, дающие довольно достоверные результаты, были разработаны к сороковым годам XX в. Появление этих и других экспериментальных методов определения газодинамических характеристик, используемых до настоящего времени, связано с новым качественным скачком в развитии газодинамики взрывных и ударных процессов, вызванным разработками ядерных взрывных устройств (рис. В5).

Установление параметров конструкций этих устройств традиционным методом проб и ошибок стало недопустимым даже по экономическим соображениям. Возникла необходимость находить условия сжатия определенных радиоактивных металлов и сферических оболочек из них в компактные образования (наиболее предпочтительной шаровой

При выстреле медный цилиндрик (d) под действием поршня сдвигается, и по величине его укорочения определяют давление. Этот прибор вкладывается в камеру перед выстрелом. После выстрела крешер Нобля остается в канале орудия или выбрасывается газами недалеко от дульного среза.

Представление о том, как в то время исследовалась детонация, в частности, измерялось давление в продуктах детонации, дают эксперименты, проведенные И.М. Чельцовым и П.Я. Назаровым. В этих экспериментах сравнивались значения давлений, развиваемых при подводном взрыве различных веществ. Исследуемые заряды на растяжках

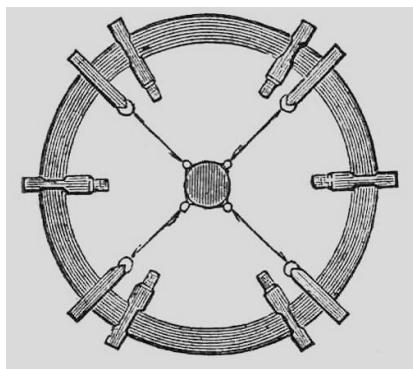


Рис. В4. Кольцо Аббота для подводных взрывов:

в центре привязан заряд. По окружности укреплены 6 крешеров