

# ДИНАМИКА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ АЭРОГЕЛЯ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Мержиевский Л.А.\*, Пруэл Э.Р., Лукьянчиков Л.А., Тен К.А., Титов В.М.

ИГиЛ СО РАН, Новосибирск

\*merzh@hydro.nsc.ru

Почти все материалы и реальные среды обладают внутренней структурой фрактального типа. В современном материаловедении возникает задача о связи между такой структурой и свойствами материалов. Этим объясняется все возрастающий интерес к исследованию фрактальных свойств различных сред и их эволюции под действием внешних воздействий. В данной работе излагаются результаты исследования эволюции основной характеристики фрактальных свойств аэрогеля — его фрактальной размерности — при ударно-волновом нагружении. Для генерации в аэрогеле ударных волн использовались разгоняемые взрывом плоские металлические ударники.

Аэрогели — высокопористые материалы, главными особенностями которых являются чрезвычайно низкая плотность и большое количество пор различного размера. Эти материалы — еще и своеобразные физические объекты, представляющие собой макроскопические кластеры, состоящие из жестко связанных макрочастиц. Характерный размер отдельных частиц — несколько нанометров. Жесткий каркас составляет малую долю объема аэрогеля, то есть почти весь его объем (до 98–99 % и выше) приходится на поры.

Простейшая модель аэрогеля может быть построена из сферических «первичных» частиц радиусом  $r_0 \leq 1$  нм, которые объединяются во «вторичные» сферические же частицы. «Вторичные» частицы образуют цепи, в которых связь между частицами возникает при их соприкосновении. Эти цепи и образуют высокопористую структуру аэрогеля. В области размеров  $r_0 \leq r < R_0$ ,  $R_0$  — максимальный размер пор, аэрогель является фрактальным кластером, а при  $r \gg R_0$  его считают однородным телом.

Наиболее надежный метод анализа структуры аэрогелей — малоугловое рассеяние рентгеновских лучей или нейтронов.

Результаты первых исследований свойств аэрогеля на основе двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  при ударно-волновом нагружении с помощью синхротронного излучения описаны в [1].

В соответствии с общей теорией малоуглового рассеяния [2], исходным характеризующим параметром является вектор рассеяния  $q$ ,

$$q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta/2,$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\theta$  — угол рассеяния. Выделяются различные режимы рассеяния [2]. Для очень малых значений  $q$ , когда линейный масштаб превышает характерный размер максимальной неоднородности среды, интенсив-

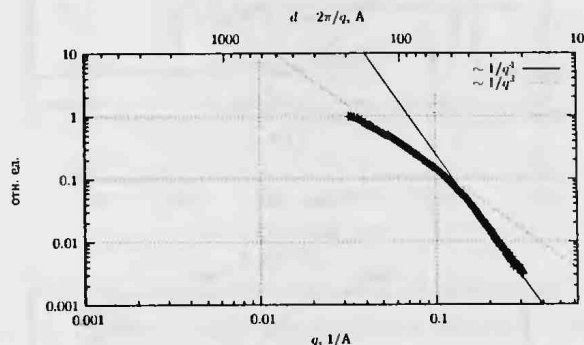


Рис. 1.

ность рассеянного излучения велика и постоянна. При возрастании  $q$  реализуется режим Гинье, при котором рассеяние определяется максимальной неоднородностью (здесь — размером кластера). По полученным данным определяется размер неоднородности  $R = R_0$ . Далее реализуется режим рассеяния на фрактальных структурах, при котором интенсивность  $I$  изменяется по закону

$$I \sim q^{-D},$$

где  $D$  — фрактальная размерность. Последующее увеличение  $q$  соответствует рассеянию на отдельных первичных частицах (режим Порода), при котором

$$I \sim q^{-G},$$

$G = D_S - 6$ ,  $D_S$  — фрактальная размерность поверхности частиц. При  $D_S = 2$  (гладкая поверхность) имеем классическое рассеяние на отдельных частицах, при котором

$$I \sim q^{-4}.$$

Элементы описанных режимов наблюдаются при исследовании аэрогеля с помощью синхротронного излучения. На рис. 1 в координатах  $(I, q)$  приведены данные, полученные для исходного ненагруженного образца аэрогеля с плотностью  $0,25 \text{ г/см}^3$  при облучении монохроматическим пучком СИ (стационарные условия). Четко выделяется участок, соответствующий режиму Порода и последующая область рассеяния на фракталах. При этом фрактальная размерность аэрогеля близка к 2.

Динамика изменения распределения интенсивности рассеяния в процессе ударно-волнового сжатия показана на рис. 2.

В этих опытах одновременно фиксировалась интенсивности проходящего и рассеянного излучения, такая постановка позволяла сопоставить наблюдаемое распределение МУРР с моментом

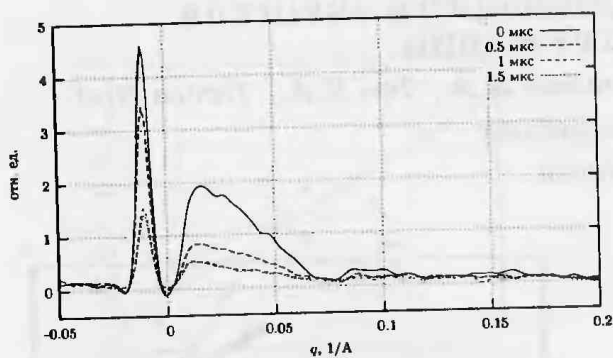


Рис. 2.

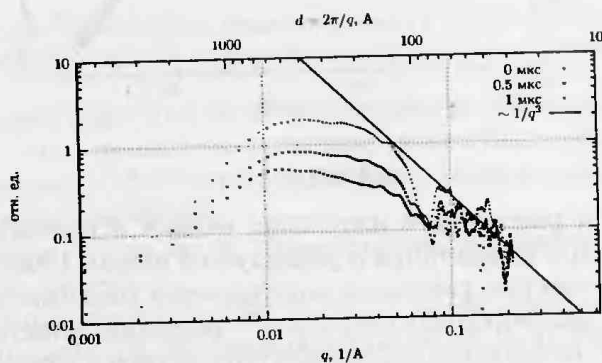


Рис. 3.

прихода ударной волны и последующей разгрузкой в области наблюдения.

## РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ УДАРНОВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Паршиков А.Н.\*, Медин С.А.

ИТЭС ОИВТ РАН, Москва

\*parshikov@ihed.ras.ru

**Введение.** Исследования динамического сжатия пористых веществ проводилось, например, в [1–4] с целью получения ударных адиабат (УА) веществ различной степени пористости или для получения данных в низкоплотном высокотемпературном диапазоне. Динамика нагружения материала существенно определяется процессом схлопывания пор. При схлопывании пор давление и температура достигают больших значений в очагах схлопывания, в сжатом материале возникают локальные потоки импульса и тепла. Лишь после завершения всех релаксационных процессов давление и плотность принимают значения, соответствующие УА. Из исследований релаксационных процессов при сжатии материала можно привести [5] и [6]. Компьютерное моделирование нагружения пористого вещества с прямым определением его мезоструктуры проводилось, например, в [7] для определения дисперсии ударных волн в композите, в [8] для построения модели композита на основе расчетно-экспериментальных данных, в [9] для расчетно-экспериментального получения УА смесей. В настоящей работе предпринята попытка моделировать ударноволновое сжатие пористого алюми-

Данные при  $q < 0$  соответствует проходящему пучку и показывает изменение плотности при прохождении ударной волны через область наблюдения. Информативный сигнал о распределении рассеянного излучения начинается с  $q \sim 0,15$ . Данные показывают, что интенсивность падает по мере сжатия вещества.

На рис. 3 приведена обработка полученных результатов в соответствии с описанными выше представлениями.

В отличие от данных рис. 1, ввиду кратковременности экспозиции в ударно-волновых экспериментах, здесь не удается наблюдать область, соответствующую режиму Порода. В то же время результаты показывают уменьшение фрактальной размерности в процессе ударного сжатия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-02-17335 и интеграционного проекта СО РАН № 23.

1. Л.А.Мержиевский, В.П.Ефремов, П.И.Зубков, Л.А.Лукьянчиков, К.А.Тен, В.М.Титов, Б.П.Толочко, В.Е.Фортов, М.Р.Шарафутдинов, М.А.Шеромов // Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях / Под редакцией А.Л.Михайлова. Саров. ВНИИЭФ. 2005 г. С. 665-670.
2. O.Glatter, O.Kratky. Small Angle X-ray Scattering. Acad. Press Inc., London, 1982.

ния периодической мезоструктуры с использованием полных уравнений динамики упругопластической среды. Для проведения расчётов избран свободнопластинчатый метод SPH, использующий для расчёта взаимодействия частиц решение задачи распада разрыва. Особенности метода изложены в [10] и [11]. Вычислительный алгоритм детально рассмотрен в [12]. Каждая SPH-частица представляет объект из сплошного материала. Непрерывное заполнение расчётной области такими SPH-частицами моделирует сплошной материал. Изъятие из расчётной области группы соседствующих частиц образует пору. При таком подходе пористая среда рассчитывается с использованием экспериментальных УА, измеренных для сплошного материала.

**Ударноволновое нагружение пористой среды.** Решалась плоская 2-D задача удара пористого алюминиевого образца о жёсткую стенку. Пористость задавалась регулярно расположенными порами квадратного сечения размерами  $l \times l$  каждая. Величина пористости  $m = \rho_0 / \rho_{00} = 1,33$  (здесь  $\rho_0$  есть плотность сплошного материала, а  $\rho_{00}$  — средняя плотность пористого материала). Коэффициент пористости в расчётах принят

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ  
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---



ФИЗИКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ  
ВЕЩЕСТВА — 2007

Черноголовка — 2007

**Физика экстремальных состояний вещества — 2007**

*Под редакцией Фортова В. Е., Ефремова В. П., Хищенко К. В., Султанова В. Г., Левашова П. Р., Темрокова А. И., Карамурзова Б. С., Канеля Г. И., Минцева В. Б., Савинцева А. П.*

Сборник посвящен исследованиям в области физики высоких плотностей энергии и теплофизики экстремальных состояний. Рассматриваются процессы взаимодействия мощных ионных и электронных пучков, интенсивного лазерного, рентгеновского и СВЧ излучения с веществом, электрический взрыв проводников мощными импульсами тока, методы генерации интенсивных импульсных потоков энергии, экспериментальные методы диагностики быстропротекающих процессов, физика ударных и детонационных волн, различные модели и результаты теоретических расчетов уравнения состояния вещества в экстремальных условиях при высоких давлениях и температурах, физика низкотемпературной плазмы, проблемы управляемого термоядерного синтеза и традиционной энергетики, а также различные технологические аспекты. Основная часть работ была представлена на XXII Международной конференции «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество» (Эльбрус, 1–6 марта 2007 г.). Издание адресовано специалистам в области физико-технических проблем энергетики.

# ДИНАМИКА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ АЭРОГЕЛЯ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Мержиевский Л.А.\*, Пруэл Э.Р., Лукьянчиков Л.А., Тен К.А., Титов В.М.

ИГиЛ СО РАН, Новосибирск

\*merzh@hydro.nsc.ru

Почти все материалы и реальные среды обладают внутренней структурой фрактального типа. В современном материаловедении возникает задача о связи между такой структурой и свойствами материалов. Этим объясняется все возрастающий интерес к исследованию фрактальных свойств различных сред и их эволюции под действием внешних воздействий. В данной работе излагаются результаты исследования эволюции основной характеристики фрактальных свойств аэрогеля — его фрактальной размерности — при ударно-волновом нагружении. Для генерации в аэрогеле ударных волн использовались разгоняемые взрывом плоские металлические ударники.

Аэрогели — высокопористые материалы, главными особенностями которых являются чрезвычайно низкая плотность и большое количество пор различного размера. Эти материалы — еще и своеобразные физические объекты, представляющие собой макроскопические кластеры, состоящие из жестко связанных макрочастиц. Характерный размер отдельных частиц — несколько нанометров. Жесткий каркас составляет малую долю объема аэрогеля, то есть почти весь его объем (до 98–99 % и выше) приходится на поры.

Простейшая модель аэрогеля может быть построена из сферических «первичных» частиц радиусом  $r_0 \leq 1$  нм, которые объединяются во «вторичные» сферические же частицы. «Вторичные» частицы образуют цепи, в которых связь между частицами возникает при их соприкосновении. Эти цепи и образуют высокопористую структуру аэрогеля. В области размеров  $r_0 \leq r < R_0$ ,  $R_0$  — максимальный размер пор, аэрогель является фрактальным кластером, а при  $r \gg R_0$  его считают однородным телом.

Наиболее надежный метод анализа структуры аэрогелей — малоугловое рассеяние рентгеновских лучей или нейтронов.

Результаты первых исследований свойств аэрогеля на основе двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  при ударно-волновом нагружении с помощью синхротронного излучения описаны в [1].

В соответствии с общей теорией малоуглового рассеяния [2], исходным характеризующим параметром является вектор рассеяния  $q$ ,

$$q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta/2,$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\theta$  — угол рассеяния. Выделяются различные режимы рассеяния [2]. Для очень малых значений  $q$ , когда линейный масштаб превышает характерный размер максимальной неоднородности среды, интенсив-

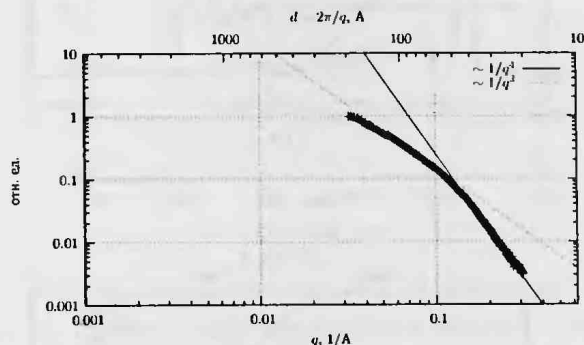


Рис. 1.

ность рассеянного излучения велика и постоянна. При возрастании  $q$  реализуется режим Гинье, при котором рассеяние определяется максимальной неоднородностью (здесь — размером кластера). По полученным данным определяется размер неоднородности  $R = R_0$ . Далее реализуется режим рассеяния на фрактальных структурах, при котором интенсивность  $I$  изменяется по закону

$$I \sim q^{-D},$$

где  $D$  — фрактальная размерность. Последующее увеличение  $q$  соответствует рассеянию на отдельных первичных частицах (режим Порода), при котором

$$I \sim q^{-G},$$

$G = D_S - 6$ ,  $D_S$  — фрактальная размерность поверхности частиц. При  $D_S = 2$  (гладкая поверхность) имеем классическое рассеяние на отдельных частицах, при котором

$$I \sim q^{-4}.$$

Элементы описанных режимов наблюдаются при исследовании аэрогеля с помощью синхротронного излучения. На рис. 1 в координатах  $(I, q)$  приведены данные, полученные для исходного ненагруженного образца аэрогеля с плотностью  $0,25 \text{ г/см}^3$  при облучении монохроматическим пучком СИ (стационарные условия). Четко выделяется участок, соответствующий режиму Порода и последующая область рассеяния на фракталах. При этом фрактальная размерность аэрогеля близка к 2.

Динамика изменения распределения интенсивности рассеяния в процессе ударно-волнового сжатия показана на рис. 2.

В этих опытах одновременно фиксировалась интенсивности проходящего и рассеянного излучения, такая постановка позволяла сопоставить наблюдаемое распределение МУРР с моментом

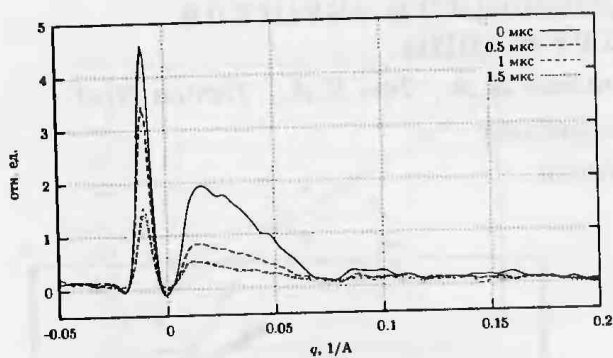


Рис. 2.

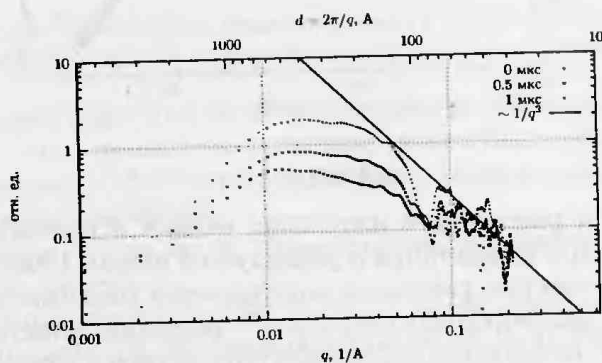


Рис. 3.

прихода ударной волны и последующей разгрузкой в области наблюдения.

## РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ УДАРНОВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Паршиков А.Н.\*, Медин С.А.

ИТЭС ОИВТ РАН, Москва

\*parshikov@ihed.ras.ru

**Введение.** Исследования динамического сжатия пористых веществ проводилось, например, в [1–4] с целью получения ударных адиабат (УА) веществ различной степени пористости или для получения данных в низкоплотном высокотемпературном диапазоне. Динамика нагружения материала существенно определяется процессом схлопывания пор. При схлопывании пор давление и температура достигают больших значений в очагах схлопывания, в сжатом материале возникают локальные потоки импульса и тепла. Лишь после завершения всех релаксационных процессов давление и плотность принимают значения, соответствующие УА. Из исследований релаксационных процессов при сжатии материала можно привести [5] и [6]. Компьютерное моделирование нагружения пористого вещества с прямым определением его мезоструктуры проводилось, например, в [7] для определения дисперсии ударных волн в композите, в [8] для построения модели композита на основе расчетно-экспериментальных данных, в [9] для расчетно-экспериментального получения УА смесей. В настоящей работе предпринята попытка моделировать ударноволновое сжатие пористого алюми-

Данные при  $q < 0$  соответствует проходящему пучку и показывает изменение плотности при прохождении ударной волны через область наблюдения. Информативный сигнал о распределении рассеянного излучения начинается с  $q \sim 0, 15$ . Данные показывают, что интенсивность падает по мере сжатия вещества.

На рис. 3 приведена обработка полученных результатов в соответствии с описанными выше представлениями.

В отличие от данных рис. 1, ввиду кратковременности экспозиции в ударно-волновых экспериментах, здесь не удается наблюдать область, соответствующую режиму Порода. В то же время результаты показывают уменьшение фрактальной размерности в процессе ударного сжатия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-02-17335 и интеграционного проекта СО РАН № 23.

1. Л.А.Мержиевский, В.П.Ефремов, П.И.Зубков, Л.А.Лукьянчиков, К.А.Тен, В.М.Титов, Б.П.Толочко, В.Е.Фортов, М.Р.Шарафутдинов, М.А.Шеромов // Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях / Под редакцией А.Л.Михайлова. Саров. ВНИИЭФ. 2005 г. С. 665-670.
2. O.Glatter, O.Kratky. Small Angle X-ray Scattering. Acad. Press Inc., London, 1982.

ния периодической мезоструктуры с использованием полных уравнений динамики упругопластической среды. Для проведения расчётов избран свободномоментный метод SPH, использующий для расчёта взаимодействия частиц решение задачи распада разрыва. Особенности метода изложены в [10] и [11]. Вычислительный алгоритм детально рассмотрен в [12]. Каждая SPH-частица представляет объект из сплошного материала. Непрерывное заполнение расчётной области такими SPH-частицами моделирует сплошной материал. Изъятие из расчётной области группы соседствующих частиц образует пору. При таком подходе пористая среда рассчитывается с использованием экспериментальных УА, измеренных для сплошного материала.

**Ударноволновое нагружение пористой среды.** Решалась плоская 2-D задача удара пористого алюминиевого образца о жёсткую стенку. Пористость задавалась регулярно расположенными порами квадратного сечения размерами  $l \times l$  каждая. Величина пористости  $m = \rho_0 / \rho_{00} = 1,33$  (здесь  $\rho_0$  есть плотность сплошного материала, а  $\rho_{00}$  — средняя плотность пористого материала). Коэффициент пористости в расчётах принят

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ  
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---



ФИЗИКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ  
ВЕЩЕСТВА — 2007

Черноголовка — 2007

**Физика экстремальных состояний вещества — 2007**

*Под редакцией Фортова В. Е., Ефремова В. П., Хищенко К. В., Султанова В. Г., Левашова П. Р., Темрокова А. И., Карамурзова Б. С., Канеля Г. И., Минцева В. Б., Савинцева А. П.*

Сборник посвящен исследованиям в области физики высоких плотностей энергии и теплофизики экстремальных состояний. Рассматриваются процессы взаимодействия мощных ионных и электронных пучков, интенсивного лазерного, рентгеновского и СВЧ излучения с веществом, электрический взрыв проводников мощными импульсами тока, методы генерации интенсивных импульсных потоков энергии, экспериментальные методы диагностики быстропротекающих процессов, физика ударных и детонационных волн, различные модели и результаты теоретических расчетов уравнения состояния вещества в экстремальных условиях при высоких давлениях и температурах, физика низкотемпературной плазмы, проблемы управляемого термоядерного синтеза и традиционной энергетики, а также различные технологические аспекты. Основная часть работ была представлена на XXII Международной конференции «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество» (Эльбрус, 1–6 марта 2007 г.). Издание адресовано специалистам в области физико-технических проблем энергетики.