

Список литературы

1. Высокоскоростное метание компактных элементов / А.Г.Балеевский, Ю.Г.Киселев, В.А.Могилев и др. // Сборник докладов научн. конф. Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». – Саров: ВНИИЭФ, 2000. – С. 244–248.
2. Жданов И.В., Князев А.С., Маляров Д.В. Получение высокоскоростных компактных элементов требуемых масс при пропорциональном изменении размеров кумулятивных устройств // Труды Томского государственного университета. – Т.276. – Серия физико-математическая. – Томск: Изд-во Томского университета, 2010. – С.193–195.
3. Федоров С.В., Баянова Я.М., Ладов С.В. Численный анализ влияния геометрических параметров комбинированной кумулятивной облицовки на массу и скорость формируемых взрывом компактных элементов // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 150–164.
4. Баянова Я.М., Федоров С.В., Ладов С.В. Сравнительный анализ результатов численного моделирования формирования взрывом высокоскоростных компактных элементов при использовании комбинированных кумулятивных облицовок // Сборник докладов международной конференции «XVII Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», - 2015. С. 504-509.
5. Федоров С.В. Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 5. – С. 150–164.
6. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампуемых свинцом оболочковых деталей / М.А.Бабурин, В.Д.Баскаков, О.В.Зарубина и др. // Технология металлов. – 2016. – № 11. – С. 2–8.
7. Оценка предельной степени вытяжки цилиндрических деталей из переменных по толщине дисковых заготовок / М.А.Бабурин, В.Д.Баскаков, В.А.Тарасов, О.В.Зарубина // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2015. – № 1. – С. 3–6.
8. Пирозерский А.С., Лукашев К.А., Методика определения глубины пробития броневых преград по данным рентгеноимпульсной съемки кумулятивных струй // Сборник трудов Седьмой всерос. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2014. – С. 472.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИМПЛОЗИИ

М.Д.Камчибеков¹, Е.Е.Мешков², Е.М.Грязева², И.А.Новикова²

РФЯЦ ВНИИЭФ¹, Саров, Россия

СарФТИ НИЯУ «МИФИ»², Саров, Россия

Аннотация

Экспериментально исследовано осесимметричное, сходящееся течение, возникающее при растекании под действием силы тяжести жидкого кольца, расположенного на плоской горизонтальной поверхности. Показано, что кумулятивный эффект такого течения несмотря на скромный масштаб по своему характеру аналогичен кумуляции при схлопывании полого пузырька в жидкости.

Явление имплозии – симметрично сходящееся течение – сопровождается концентрацией энергии в локальной области. Известным примером эффекта кумуляции энергии в течении

имплозивного типа является задача Рэлея о схлопывании полого пузырька в жидкости [1]. В представлениях [2,3] до момента схлопывания (фокусировки) пузырька – t_f при малых радиусах r движение границы пузырька является ускоренным и описывается законом $r \sim (t_f - t)^\alpha$ с постоянным показателем α ($0 < \alpha < 1$), причем в приближении несжимаемой жидкости показатель равен $\alpha = 0.4$. Эффект кумуляции характерен также для сходящихся ударных волн в сферической и цилиндрической геометриях [4,5]. Обзор различных кумулятивных процессов содержится в [6].

Ниже описаны результаты экспериментального исследования гидравлической модели цилиндрической имплозии [7] в виде динамически создаваемого на плоской горизонтальной поверхности жидкого кольца (ограниченного по наружному радиусу жесткой стенкой); при осесимметричном растекании кольца под действием силы тяжести внутренняя граница возникающего течения симметрично сходится; при этом скорость границы кольца нарастает с уменьшением ее радиуса, демонстрируя явление кумуляции. В известной мере эта модель является развитием постановки лабораторных экспериментов, демонстрирующих явление имплозии и кумуляции в учебных целях [8]. Гидравлическая модель цилиндрической имплозии [7] является составной частью практикума по газодинамике [9] и может быть, в частности, использована для изучения явления имплозии и кумуляции в рамках университетских курсов по газодинамике.

В нашем случае модель [7] (рис.1) имеет вид кольца из подкрашенной воды, расположенного на горизонтальной плоской поверхности слоя оргстекла и ограниченного по боковой поверхности цилиндрической стенкой (2); по внутренней поверхности кольцо ограничено подвижной цилиндрической перегородкой (концентричной наружной стенке) (1). При быстром подъеме перегородки в осевом направлении возникает течение в виде сходящегося к оси симметрии потока. Фронт этого потока сходится с ускорением [7]. В нашем эксперименте процесс имплозии регистрировался через зеркало, расположенное под углом 45°, цифровым фотоаппаратом Casio EX-ZR100 в режиме скоростной видеосъемки со скоростью 480 кадров в секунду. При обработке результатов экспериментов внутренний радиус жидкого кольца r определялся на снимках как среднее по двум взаимно перпендикулярным диаметрам изображения d_1, d_2

$$r = (d_1 + d_2) / 4$$

Погрешность измерений величины $r \sim 1$ мм. Симметричное схождение в опытах достигает радиуса порядка нескольких мм, затем симметрия течения нарушается.

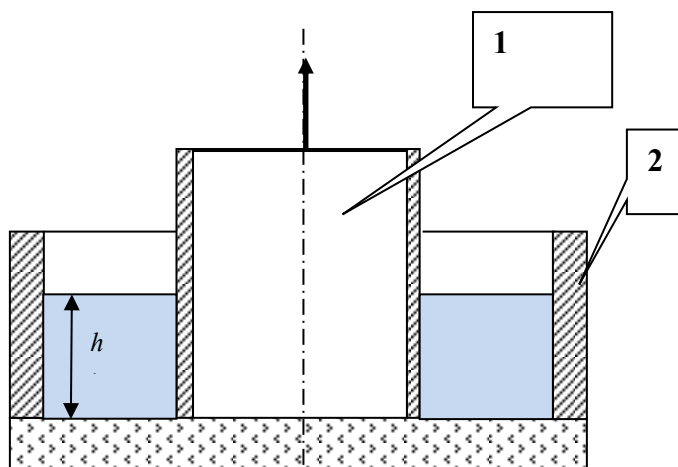


Рисунок 1. Схема установки, моделирующей процесс цилиндрической имплозии

Ниже описаны результаты экспериментального исследования течения, возникающего при схлопывании жидкого кольца с начальными размерами: наружный радиус – 96 мм, внутренний радиус $r_0=60$ мм, высота кольца – 14,2 мм .

На рисунке 2 приведена зависимость от времени радиуса внутренней поверхности кольца для одного из опытов. По характеру этой зависимости видно, что схлопывание потока происходит с ускорением.

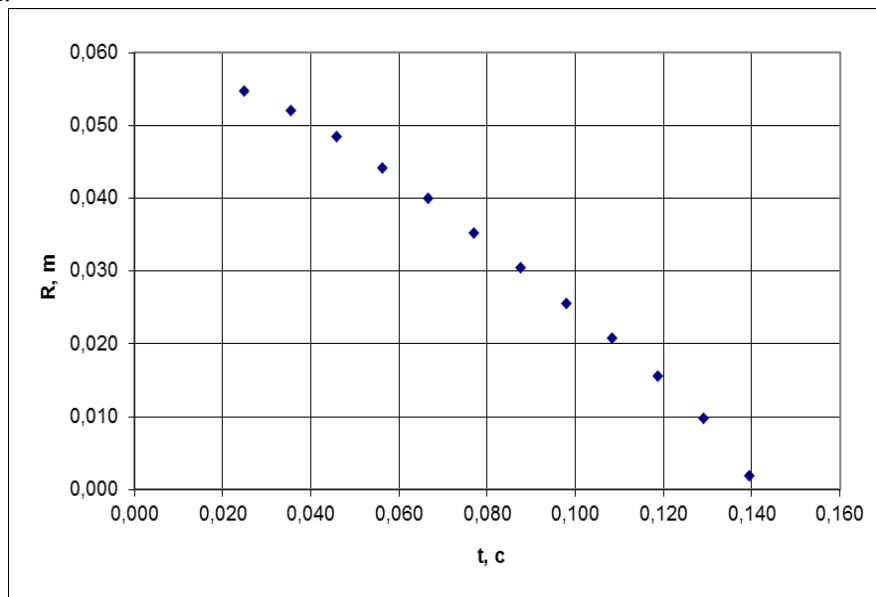


Рисунок 2. Зависимость от времени t радиуса r фронта сходящегося течения, возникающего при схлопывании внутренней границы жидкого кольца

На рисунке 3 результаты экспериментальной зависимости $r(t)$ приведены в логарифмических координатах в виде:

$$\ln r = \ln A + \alpha \ln (t_f - t), \tag{1}$$

где t_f – время от момента начала течения до схлопывания кольца, A – константа.

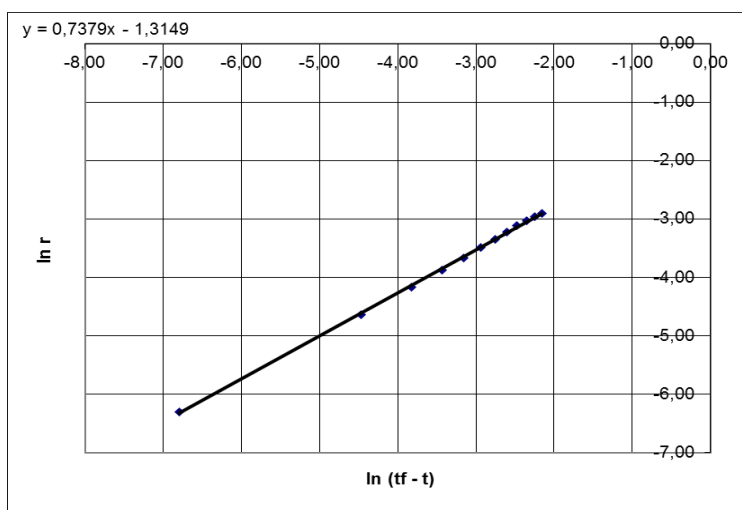


Рисунок 3. Зависимость от времени t радиуса r в логарифмических координатах (расчет и эксперимент (r в метрах))

Экспериментальная зависимость (1) имеет линейный характер на интервале $\sim 50 \text{ мм} > r > \sim 3 \text{ мм}$ или $(-3 > \ln r \text{ (м)} > -5,8)$ и аппроксимируется линией тренда с показателем 0,74. В данном случае вследствие развития неустойчивости кумуляция прекращается на радиусе $2 \div 3 \text{ мм}$ и t_f корректировалось вручную таким образом, чтобы экспериментальная зависимость в области малых r не отклонялась от линейного характера (масштаб корректировки t_f менее 0,001 с).

По результатам серии из четырех опытов α варьируется в пределах $(0,73 \div 0,81)$, среднее значение $\alpha = 0,76$. Описанная гидравлическая модель цилиндрической имплозии может быть использована в учебном процессе [9] не только для изучения явления имплозии, кумуляции, но и для определения величины показателя кумуляции α , а также для привлечения студентов к исследовательской работе (например, для изучения зависимости кумуляции от высоты и ширины жидкого кольца). Модель может быть также использована для изучения гипотезы Забабахина о неустойчивости неограниченной кумуляции [10]; в частности, для изучения вопроса о том, как малое начальное возмущение фронта сходящегося течения приводит к прекращению кумуляции.

Кроме этого, описанная модель может быть легко модифицирована для изучения сходящихся цилиндрических ударных волн; достаточно налить внутри цилиндрической подвижной перегородки слой воды толщиной меньше толщины жидкого кольца [11,12]. В этом случае имитация сходящейся цилиндрической ударной волны осуществляется на основе применения гидродинамической модели «мелкой воды».

Таким образом, результаты исследования цилиндрической имплозии гидравлической модели в виде жидкого кольца на плоской поверхности, растекающегося под действием силы тяжести, показывают, что такое течение имеет кумулятивный характер, аналогичный характеру схлопывания полого сферического пузырька. Показатель кумуляции α (для жидкого кольца с внутренним и наружным радиусами 60 и 96 мм и высотой 14,2 мм), полученный в прямых измерениях на гидравлической модели равен $\alpha = 0,76$. Кумуляция здесь существенно слабее, чем в случае сферического пузырька в несжимаемой жидкости ($\alpha = 0,4$), однако собственно эффект кумуляции идентифицируется вполне однозначно.

Это обстоятельство позволяет использовать гидравлическую модель цилиндрической имплозии [7] в лабораторном практикуме [9] не только для демонстрации явления имплозии и кумуляции, но и для количественных оценок показателя кумуляции в данной модели и для привлечения студентов ВУЗов к исследовательской работе.

В заключение авторы выражают признательность А.Г.Иоилову за полезные обсуждения и В.В.Пичугову за помощь при проведении экспериментов.

Список литературы

1. Lord Rayleigh //Phil.Mag. 34, 94, 1917.
2. Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. //Изд. «Наука», Москва, 1966г.
3. Дж.Сомон. Кумулятивные процессы, автомодельные решения в газодинамике.//Сб.переводов «Физика высоких плотностей энергии», Изд-во Мир, М., 1974, с.210-240
4. G.Guderley//Luftfahrtforschung, 19, 302, 1942.
5. К.П.Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды // М.: Гостехиздат, 1955.
6. Е.И.Забабахин. Кумуляция и неустойчивость. //Сб.научных статей. Изд.РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 1998г.
7. С.В.Бондаренко, А.Б.Георгиевская, Д.Н.Замыслов, И.С.Калинин, В.А.Клевцов, Г.Б.Красовский, Е.Е.Мешков, И.А.Новикова, Л.Л.Огородников, В.В. Руденко. Гидравлическая модель цилиндрической имплозии // Физическое образование в ВУЗах. т.22, №2, 2016, сс.85-94.
8. Майер В. В. Кумулятивный эффект: учебные исследования. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 208 с. — ISBN 978-5-9221-0826-3.

9. Е.Е.Мешков, В.В.Руденко. Комплекс лабораторных работ по газодинамике. //Материалы 13-ой Международной Школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 4-13 июня 2013 г., с.146-147.
10. Е.И.Забабахин. Неустойчивость неограниченной кумуляции. //Письма вЖЭТФ, т.30, вып.2, с.97-99, 1979.
11. A.V.Georgievskaya, E.E.Meshkov, L.L.Ogorodnikov, A.D.Shamshin, I.A.Yurina. Laboratory model for hydrodynamic instability investigation. //Proc. Abstracts of 3 Int. Conf. "Turbulent Mixing and Beyond". Trieste, Italy, 21-28 august 2011, p. 139
12. A.V.Georgievskaya, G.B.Krasovsky, E.E.Meshkov, L.L.Ogorodnikov, A.A.Tochilina Hydrodynamic Models of Plane and Converging Cylindrical Shock Waves. // Book of Abstracts, IUTAM symposium 12-3 "Waves In Fluids: Effects Of Non-Linearity, Rotation, Stratification And Dissipation". Moscow, June 18-22, 2012, p. 81.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМОЗАТАЧИВАНИЯ УДАРНИКА ИЗ W ПРИ ПРОНИКАНИИ В МИШЕНЬ ИЗ Fe

М.В. Ветчинников, М.А. Демина, А.Н. Анисимов, С.А. Грушин, А.Г. Кечин, В.П. Фомин, В.А. Дегтярев

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

В данной работе представлены результаты молекулярно-динамических (МД) расчетов проникания различных сердечников из W в мишень из Fe.

Моделирование велось в комплексе MoDyS (классическая молекулярная динамика), развиваемом в ИТМФ.

Проблема замены сердечников из обедненного урана (DU – от английского depleted U) на аналогичный по эффективности, но нерадиоактивный материал существует достаточно давно. И одним из первых кандидатов на эту роль был выбран вольфрам и его сплавы (WHA – от английского Wolframium Heavy Alloys).

Эффективность пробития сердечниками из обедненного U связана с эффектом самозатачивания сердечника в процессе прохождения брони, позволяющего ему проникать глубже [1].

Динамическое разрушение многих материалов при импульсных нагружениях обычно проявляется в виде сдвигов материала, возникающих вследствие образования больших локальных градиентов скоростей. Во многих случаях эти большие сдвиговые деформации появляются в очень узких зонах, которые назвали адиабатическими полосами сдвига (ASB – Adiabatic Shear Band). Этот механизм разрушения, являющийся результатом развития термомеханической неустойчивости, считается одной из наиболее общих мод разрушения материалов при скорости динамической нагрузки порядка 10^3 с⁻¹ и выше [2]. В последнее время выяснилось, что помимо термической неустойчивости, в некоторых металлах основным механизмом, ответственным за возникновение полос сдвига, является механизм динамической рекристаллизации [2,3]. Соотношение между двумя источниками зависит не только от металла, но и от хронологии обоих процессов [4].

Для W эффект самозатачивания имеет пороговый характер, т.е. он возникает при превышении определенной скорости на входе в броню $\sim 2 \div 2.1$ км/с [5]. Данная скорость является слишком высокой для современных орудий [1]. Поэтому во многих лабораториях мира, так или иначе связанных с вооружением, ведутся поиски путей, ведущих к повышению восприимчивости