

РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ, УСКОРЯЕМОЙ СХОДЯЩЕЙСЯ УВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛУЧАЕ

А. И. Толмьяков, Е. Е. Мешков

(Москва)

Гравитационная неустойчивость границы раздела жидкостей или газов разной плотности (контактной границы) возникает, если ускорение направлено от легкой среды к тяжелой [1]. При импульсном ускорении стационарной УВ граница оказывается неустойчивой как при прохождении ударной волной от легкого к тяжелому газу [2], так и в обратном случае [3]. Интерес к проблеме гравитационной неустойчивости в последнее время заметно возрос в связи с развитием исследований по лазерному термоядерному синтезу [4].

Ниже излагаются результаты экспериментального исследования устойчивости цилиндрической границы раздела двух газов, ускоряемой сходящейся УВ. При этом имеет место как импульсное ускорение границы УВ (первоначальной и отраженной от центра), так и плавное изменяющееся за счет цилиндрического схождения.

Устройство, на котором проводились эксперименты, имело полый внутренний объем в форме полуцилиндра радиусом 100 и шириной 20 мм, ограниченный со всех сторон жесткими неразрушаемыми стенками. Боковые плоские стенки сделаны прозрачными. Устройство состояло из двух concentричных блоков, граница между которыми проходила на радиусе 55 мм. Перед сборкой на цилиндрическую поверхность центрального блока наносилась тонкая органическая пленка с удельной массой $(3 \div 4) \cdot 10^{-5}$ г/см². В собранном виде пленка разделяла внутренний объем на две части. Центральный блок в экспериментах заполнялся гелием ($\rho_0 = 0,163$ кг/м³, $\gamma = 1,63$) или фреоном-12 ($\rho_0 = 5,13$ кг/м³, $\gamma = 1,139$). В наружном блоке находился воздух ($\rho_0 = 1,205$ кг/м³, $\gamma = 1,401$). Здесь и ниже плотность газа приводятся при атмосферном давлении и температуре 20 °С. Центральный блок заполняли по методике [3] перепусканием через отверстия в стенке объема газа, многократно превышающего внутренний объем блока. Исследуемое возмущение задавалось на указанной границе.

Сходящаяся цилиндрическая УВ формировалась электрическим взрывом проволочек, расположенных по образующим внутренней цилиндрической поверхности устройства на радиусе 100 мм. Всего имелось 90 проволочек из нихрома диаметром 0,1 мм. Проволочки соединялись параллельно, и на них разряжалась конденсаторная батарея емкостью 6 мкФ, заряженная до напряжения 32 кВ. Возникающее течение регистрировалось теневой установкой, сочлененной оптически с камерой СФР в варианте луны времени. В результате каждого эксперимента получалась серия фотографий картины течения в разные моменты времени.

При взрыве проволочек формируются расходящиеся цилиндрические УВ, которые при взаимодействии образуют единый сходящийся фронт. В экспериментах [5] при электрическом взрыве тонкого проводящего слоя на внутренней поверхности полого цилиндра в воздухе образуется автомодельная волна с законом движения

$$R = R_1 (t/t_1)^\alpha,$$

где $\alpha = 0,834$. В настоящих опытах (в случае, когда весь объем устройства заполнен воздухом) автомодельный режим схождения волны формируется на радиусе ~ 40 мм. Асимметрия сформировавшейся УВ была невелика: искажение фронта $\Delta R = 0,5$ мм, а смещение центра волны относительно геометрического центра системы составляло ~ 2 мм при $R = 50$ мм. Исследовалась устойчивость границы между газами на $R_0 =$

= 55 мм. Этой границе придавалось начальное возмущение, приближающееся к форме

$$R = R_0 + \Delta_0/2 \cdot \cos(n\varphi).$$

Начальная амплитуда возмущения составляла $\Delta_0/\lambda_0 = 0,1$ и $0,15$, $\lambda_0 = -2\pi R_0/n$. Эксперименты проводились при $n = 4, 6, 8$.

На рис. 1 приведены кадры фотохронограммы двух опытов. Интервал между кадрами 12 (а) и 32 мкс (б). Поле зрения регистрирующей системы включает часть картины течения, на рисунке граница кадра указана штриховкой. В первом случае сходящаяся ударная волна S_1 проходит границу I от более тяжелого газа (воздуха) к легкому (гелию), отношение плотностей газов составляет 7,24. Вначале возмущение границы меняет знак на обратный и затем монотонно растет со временем. После достижения отраженной от центра УВ S_2 границы скорость роста возмущения увеличивается, причем выступы тяжелого газа практически достигают центра и смыкаются вершинами. Начальная форма возмущений искажается, как и в случае нелинейной стадии гравитационной неустойчивости в плоском случае [6], — выступы более тяжелого газа (воздуха) сужаются, образуя струи, по краям которых возникают вихревые зоны.

Когда во внутренней полости находится фреон-12, сходящаяся УВ проходит границу из легкого в более тяжелый газ (отношение плотностей 1,0 : 4,26). Развитие возмущения в этом случае распадается на три стадии: вначале оно уменьшается по амплитуде (за счет сжатия УВ); затем растет по амплитуде, но еще до момента выхода на границу отраженной от центра УВ начинает уменьшаться до нуля и даже меняет знак, т. е., по существу, совершает колебание. Процесс сопровождается размытием границ вследствие увеличения мелкомасштабных возмущений, в первом случае это проявляется более ярко. В некоторых экспериментах хорошо просматривается форма сходящейся УВ и можно наблюдать характер развития возмущений на ее фронте.

По результатам экспериментов подобрана расчетная модель, удовлетворительно описывающая динамику данной системы (одномерное течение) в течение ~ 150 мкс после начала движения. При этом масса взрывающихся проволок предполагается размазанной в виде газа с $\rho_0 = 22$ кг/м³ и $\gamma = 5/3$ в слое толщиной 2,5 мм, прилегающем к цилиндрической жесткой стенке с мгновенным энерговыделением в начальный момент, поднимающим давление в этом слое газа до $45,6 \cdot 10^5$ Па. В остальных областях системы предполагается в начальный момент атмосферное давление. При проведении газодинамических расчетов во всех областях использовалось уравнение состояния идеального газа.

На рис. 2 приведена $R-t$ -диаграмма опыта воздух — гелий. Здесь и на последующих графиках время отсчитывается от момента взрыва проволок. Привязка данных эксперимента к расчету по времени осуществлялась совмещением экспериментальных точек, определяющих положение фронта у сходящейся УВ. При этом данные измерений положения границы удовлетворительно согласуются с расчетом. Возмущение растет асимметрично относительно границы, как и в плоском случае [3], что определяется асимметричным изменением формы возмущения.

Данные измерений амплитуды возмущения приведены на рис. 3 для $n = 4, 6, 8$, где $\delta = \Delta/R$; $\delta_0 = \Delta_0/R_0$; Δ — амплитуда возмущения границы от вершины выступа до впадины. Начальный участок графика — прохождение УВ через границу и соответствующее сжатие начального возмущения — определялся по данным рис. 2. Прохождение УВ через возмущенную границу приводит к появлению периодического возмущения течения — зон повышенного и пониженного относительно среднего уровня давления по обе стороны границы. Распределение этих зон и соответственно градиентов давления поперек границы таково, что начальное возмущение границы после прохождения волны меняет знак. Дальнейший рост возмущения определяется двумя факторами: а) довольно

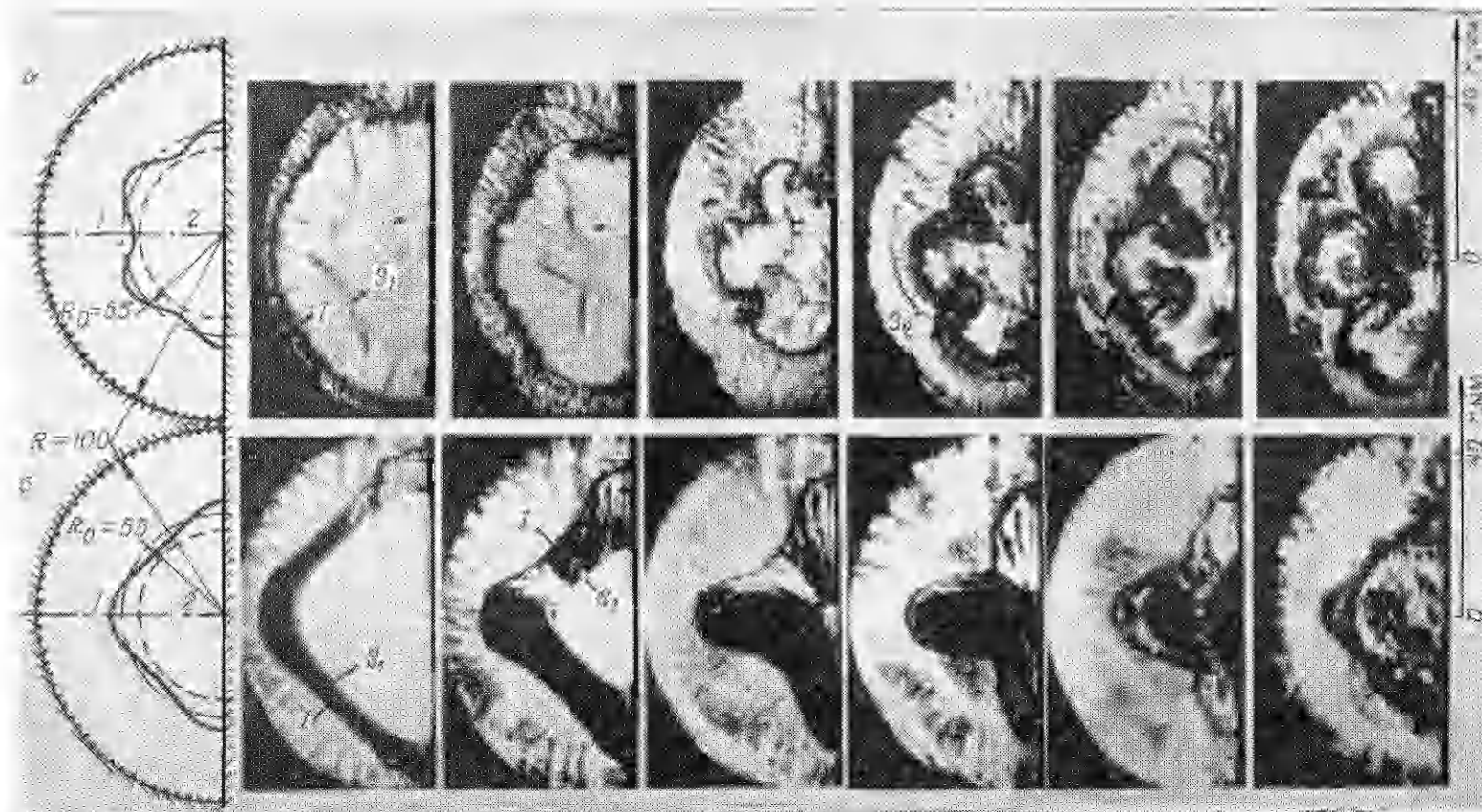


Рис. 1. Тепловые фотохронограммы опытов по развитию возмущений на цилиндрической границе, ускоряемой сходящейся ударной волной.
 а) воздух (область 1) — гелий (2), $n = 6$, $\Delta_0/\lambda_0 = 0,15$; б) воздух (1) — фреон-12 (2), $n = 4$, $\Delta_0/\lambda_0 = 0,1$.

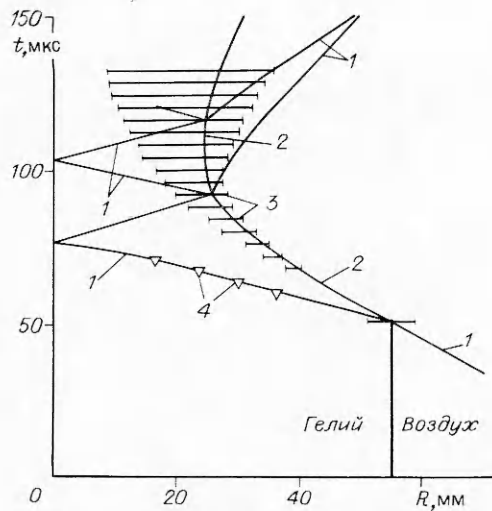


Рис. 2. $R-t$ -диаграмма течения в опыте воздух — гелий; одномерный расчет и эксперимент ($n = 6$, $\Delta_0/\lambda_0 = 0,15$).

1 — ударные волны (расчет); 2 — граница (расчет); 3 — возмущение границы; 4 — сходящаяся ударная волна (эксперимент). Края черточек соответствуют вершинам выступов и впадин возмущения.

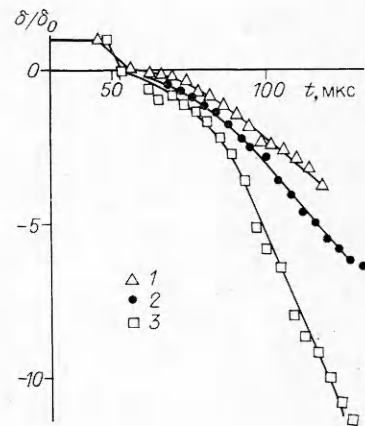


Рис. 3. Относительная амплитуда возмущений δ/δ_0 в зависимости от времени в случае воздух — гелий.

1 — $n = 4$, $\Delta_0/\lambda_0 = 0,1$; 2 — $n = 6$, $\Delta_0/\lambda_0 = 0,15$; 3 — $n = 8$, $\Delta_0/\lambda_0 = 0,1$.

быстро уменьшающимся по амплитуде распределением давления на границе, что связано с колебательными процессами перетекания вещества из зон повышенного в зоны пониженного давления, б) гравитационной неустойчивостью границы: после скачкообразного ускорения УВ граница движется с торможением (это видно из рис. 2), т. е. ускорение направлено от гелия к воздуху, что соответствует неустойчивости. Возмущения с более высоким n (с меньшей длиной волны возмущения λ) растут относительно быстрее.

На рис. 4 наблюдается хорошее согласие расчетных и экспериментальных траекторий движения волны и границы до $t \approx 200$ мкс, позднее отмечается растущее со временем расхождение.

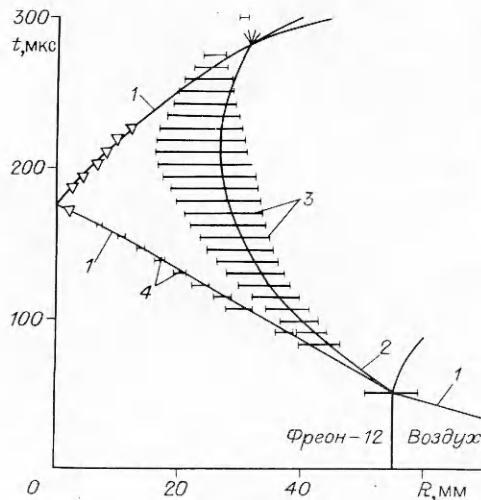


Рис. 4. $R-t$ -диаграмма опыта воздух — фреон-12, одномерный расчет и эксперимент ($n = 4$, $\Delta_0/\lambda_0 = 0,1$).

1 — ударные волны (расчет); 2 — граница (расчет); 3 — края возмущения границы; 4 — сходящаяся и отраженная от центра ударные волны (эксперимент).

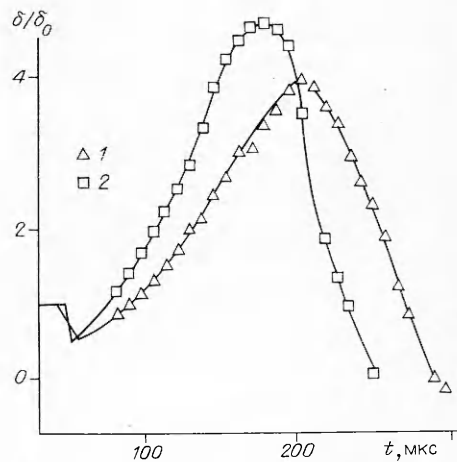


Рис. 5. Относительная амплитуда возмущения как функция времени в случае воздух — фреон-12.

1 — $n = 4$, $\Delta_0/\lambda_0 = 0,1$; 2 — $n = 8$, $\Delta_0/\lambda_0 = 0,1$.

Данные измерений амплитуды возмущений приведены на рис. 5. Начальный участок графика (сжатие возмущения УВ), как и в ранее описанном случае, определялся расчетом. Дальнейшее развитие, как и в случае воздух — гелий, определяется распределением зон повышенного и пониженного давления и соответственно градиента на границе. Распределение это таково, что после сжатия УВ возмущение начинает расти, не изменяя знака, как и в плоском случае [2, 3]. Влияние этого начального импульса довольно быстро ослабевает, и возмущение растет по инерции. В то же время, как видно на рис. 4, граница движется с торможением, т. е. ускорение направлено от тяжелого газа к более легкому, и оказывается гравитационно устойчивой. В результате возникают силы, тормозящие рост возмущения и приводящие к последующему уменьшению его амплитуды до момента выхода на границу отраженной от центра УВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Taylor J. Proc. Roy. Soc., 1950, Ser. A, 201, 1065, 192.
2. Richtmyer R. D. Communs Pure and Appl. Math., 1960, 13, 297.
3. Мешков Е. Е. Изв. АН СССР. МЖГ, 1969, 5, 151.
4. Гамалий Е. Г., Розанов В. Б., Самарский А. А. и др. ЖЭТФ, 1980, 79, 2(8), 459.
5. Деннен Р., Вильсон Л. // Электрический взрыв проводников.— М.: Мир, 1964.
6. Chang G. T. Phys. Fluids, 1959, 2, 6, 656.

Поступила в редакцию 14/IX 1987,
после доработки — 5/VIII 1988

УДК 532.593 + 538.245

ВЛИЯНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ТОНКУЮ СТРУКТУРУ ФЕРРИТОВ

Э. С. Атрощенко, Э. Г. Яковлева, В. А. Дурнев, Н. В. Голованова
(Пенза)

Возрастающий интерес к изучению свойств ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса вызван широким применением их в запоминающих и логических устройствах ЭВМ. Для получения таких ферритов необходимо иметь однородные, однофазные плотные материалы с высокой степенью симметрии кристаллической решетки. Ранее полученные экспериментальные данные [1, 2] свидетельствуют, что взрывное прессование положительно влияет на свойства ферритов: увеличивается дефектность кристаллической решетки, что приводит к интенсификации процесса спекания и в конечном итоге — к получению материалов с повышенными физико-механическими свойствами и стабильностью. Квадратичность петли гистерезиса, коэрцитивная сила, остаточная индукция, прочность, плотность и другие физико-механические свойства зависят от исходного состояния порошка-феррита, которое можно регулировать параметрами ударно-волнового нагружения [3].

Схема взрывного нагружения приводится в работе [1]. Активацию порошков проводили при различных скоростях нагружения, которые регулировались изменением высоты заряда ВВ. Скорости нагружения определялись с помощью рентгеноимпульсных снимков и характеризовались максимальной скоростью перемещения пластины порошка при прессовании. Марки исследуемых ферритов и их химический состав приведены в таблице.

Исходная относительная плотность порошков до прессования составляла 40—45 %, а после нагружения 80—88 % и была равномерной по толщине. После активации порошков размалывали для изготовления изделий по обычной технологии. Влияние параметров взрывного прессования на фазовый состав, структуру и физические свойства порошков