

производились неоднократные уточнения этих основополагающих "констант" в новых экспериментах.

В условиях бустинга к фундаментальным вопросам относится взаимодействие термоядерных нейтронов с делящимися материалами. Эти же вопросы существенны и для режимов горения термоядерных модулей.

Важнейшая стадия — горение бустированных и термоядерных зарядов — требует комплексного рассмотрения процессов радиационной газодинамики, термоядерного горения и нейтронной кинетики в многокомпонентных средах. В настоящее время мы используем в этих целях ряд 2D-программ.

Мы располагаем целым рядом методик расчёта переноса нейтронов в сложных гетерогенных конфигурациях и прецизионными системами спектральных и групповых нейтронных констант для всех изотопов, с которыми связана наша работа.

## 8. Неравновесные процессы

Наша работа непосредственно связана с исследованиями ряда неравновесных процессов. Приведу несколько примеров.

В условиях термоядерного горения может реализоваться режим, в котором не успевает установиться, с одной стороны, термодинамическое равновесие между электронами и ионами, а с другой стороны — между электронами и излучением. Такой режим был неоднократно реализован и зафиксирован экспериментально, и для его описания у нас разработаны специальные физико-математические модели.

В условиях термоядерного горения даже при установлении термодинамического равновесия существует определённая вероятность того, что быстрые частицы, рождённые в термоядерных реакциях, могут вступать в новые термоядерные реакции до своей термализации. С целью изучения этого процесса у нас был проведён специальный комплекс исследований, результаты которого внедрены в модели и используются на практике.

Характерной является ситуация, в которой плотность потока энергии рентгеновского излучения значительно превышает равновесную плотность потока, соответствующую температуре среды, а спектр потока рентгеновского излучения существенно отличается от планковского. Эти обстоятельства также учтены в программах радиационной газодинамики.

## 9. Заключение

Мы не можем представить наиболее яркие примеры работ, о которых говорилось выше. В то же время эти исследования сопровождались научным поиском и получением результатов, которые являются вполне открытыми. Некоторые из них непосредственно относятся к решению наших основных оружейных задач, некоторые частично связаны с ними. В публикуемых в этом выпуске УФН статьях наши ведущие специалисты представили результаты таких открытых исследований. Надеюсь, что эти статьи дают достаточно полное представление о ряде конкретных особенностей наших научных работ.

В создании и развитии новых научных направлений, связанных с работами РФЯЦ–ВНИИЭФ, на протяжении 65 лет принимало участие большое число выдающихся специалистов и корифеев отечественной науки. Я не привожу имён, поскольку любая выборка персоналий

не будет достаточно представительной. Можно сказать, что мы говорим о науке РФЯЦ–ВНИИЭФ в целом.

PACS numbers: 47.20.-k, 47.27.wj, 47.40.-x  
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104i.0410

## Гидродинамические неустойчивости

А.Л. Михайлов, Н.В. Невмержицкий,  
В.А. Раевский

### 1. Введение

В статье представлены результаты экспериментальных работ по исследованию гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания в жидких, газовых и прочных средах. В частности, показано: 1) развитие возмущений и турбулентного перемешивания в газах чувствительно к числу Маха ударной волны; 2) скорость проникновения фронта газа в жидкость при увеличении числа Рейнольдса течения от  $5 \times 10^5$  до  $10^7$  не изменяется; 3) устойчивый и неустойчивый режимы в средах с прочностью зависят от длины волны и амплитуды начальных возмущений; 4) гидродинамические неустойчивости могут быть инструментом исследований прочностных свойств материалов.

Одна из наиболее амбициозных и важных научно-практических проблем — проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС). Реализация идеи УТС оказалась принципиально зависящей, среди прочего, от одной "малости" — гидродинамических неустойчивостей: Рэлея–Тейлора [1], Рихтмайера–Мешкова [2, 3] и Кельвина–Гельмгольца [4]. Сколько угодно малые начальные возмущения на границе раздела разнородных сред под действием этих неустойчивостей начинают возрастать, что со временем приводит к турбулентному перемешиванию веществ. Как следствие, появляются энергетические потери и ограничения в достигаемой плотности кумулируемой в мишени энергии, необходимой для осуществления зажигания.

Исследования гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания ведутся в Российском федеральном ядерном центре — Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (РФЯЦ–ВНИИЭФ) практически со времени его основания. В частности, основные результаты Тейлора (1950 г.) (для так называемой гравитационной неустойчивости) независимо были получены сотрудниками ФИАН С.З. Беленьким и Е.С. Фрадкиным, участвовавшими тогда в работах по атомной проблеме. Их результаты изложены в конце 1940-х – начале 1950-х годов в серии неопубликованных отчётов ВНИИЭФ. Эти исследователи разработали и первую полуэмпирическую модель развития зоны перемешивания [5]. В 1951 г. по инициативе А.Д. Сахарова Ю.Ф. Алексеевым, И.Г. Проскуриным и Н.Ф. Зеленцовой были выполнены первые экспериментальные исследования развития турбулент-

А.Л. Михайлов, Н.В. Невмержицкий, В.А. Раевский.

ФГУП "Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ  
E-mail: root@gdd.vniief.ru

ного перемешивания на границе двух жидкостей, результаты которых не опубликованы до сих пор.

В середине 1960-х годов в экспериментах на ударной трубе Е.Е.Мешковым было обнаружено, что граница раздела двух газов является неустойчивой не только тогда, когда ударная волна (УВ) проходит из "лёгкого" газа в "тяжёлый" (согласно данным Рихтмайера), но и тогда, когда УВ движется в обратном направлении [3]. С тех пор неустойчивость границы, индуцируемая УВ, именуется неустойчивостью Рихтмайера–Мешкова. В начале 1970-х годов во ВНИИЭФ В.В. Никифоровым стали разрабатываться полуэмпирические модели турбулентности, внедряться первые численные методы расчёта турбулентных течений (В.А. Андронов, С.М. Бахрах, А.В. Певницкий и др.).

Первые в СССР экспериментальные исследования неустойчивости Рэлея–Тейлора в твёрдых телах, начатые во ВНИИЭФ в конце 1950-х годов, связаны с именами А.Д. Сахарова, Р.М. Зайделя, А.Г. Олейника и др. Подавляющее большинство их результатов не опубликовано в открытой печати, за исключением цикла работ [6].

В последнее десятилетие гидродинамические неустойчивости в разных средах по-прежнему являются предметом систематических исследований — как теоретических с помощью физического и численного моделирования, так и экспериментальных. Эксперименты, являясь источником базовых данных для тестирования физических и численных моделей, в то же время служат источником информации о фундаментальных закономерностях развития этих процессов и свойствах веществ: прочности, реологии, фазовых превращениях.

В разделах 2–4 обозначены некоторые направления и результаты, полученные в последние годы с применением классического ударно-волнового эксперимента на ударных трубах и во взрывных газодинамических системах.

## 2. Развитие турбулентного перемешивания и возмущений на контактной границе газов

При численном моделировании течений с учётом турбулентного перемешивания необходимы экспериментальные данные для верификации и тестирования расчётных моделей. В связи с появлением новых задач информации, имеющейся в настоящее время для этой цели, например [7], оказывается недостаточной. Поэтому для отработки алгоритмов расчётов нами, в частности, проведён комплекс экспериментов на воздушной ударной трубе по исследованию развития турбулентного перемешивания в трёхслойных газовых системах воздух– $SF_6$ –воздух, воздух– $He$ – $SF_6$  и воздух– $He$ –воздух [8]. Контактные границы газов располагались перпендикулярно или под углом к направлению УВ, или имели изломы. Такое расположение контактных границ приводило к двумерному характеру течения. Газы изначально разделялись тонкой (толщиной 1 мкм) полимерной пленкой. Число Маха УВ составляло  $M \approx 1,3$ . На контактных границах развивается, помимо неустойчивости Рихтмайера–Мешкова, неустойчивость Кельвина–Гельмгольца (рис. 1). В результате взаимодействия волн разрежения и ударных волн с контактными границами формируется довольно сложное течение, которое предоставляет хороший материал для калибровки расчётных методик.

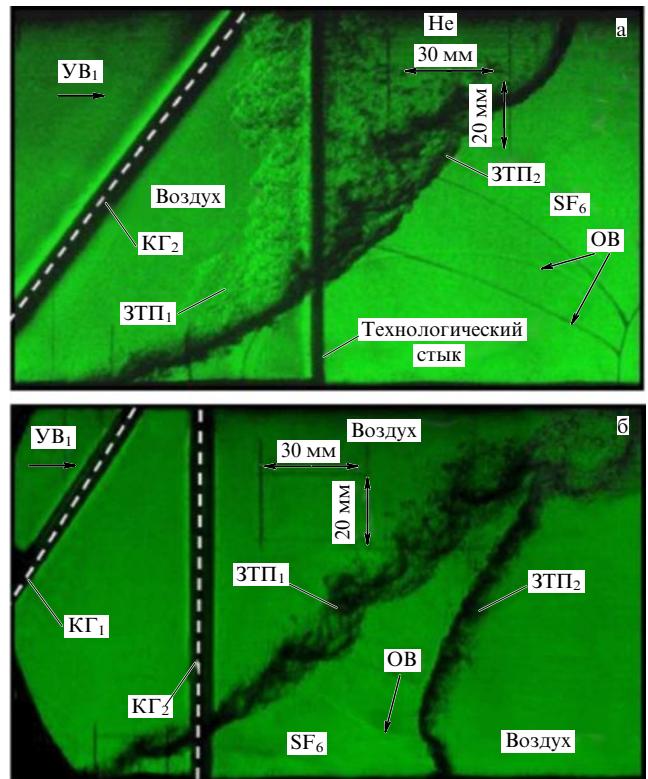


Рис. 1. Фотографии, полученные в экспериментах на воздушной ударной трубе по исследованию развития турбулентного перемешивания в системах воздух– $He$ – $SF_6$  (а) и воздух– $SF_6$ –воздух (б). КГ<sub>1(2)</sub> — контактная граница, ЗТП<sub>1(2)</sub> — зона турбулентного перемешивания, ОВ — отражённая волна. Масштаб реперной сетки 30 × 20 мм.

При ускорении контактной границы газов сильной ударной волной (с числом Маха  $M > 5$ ) или серией волн, проходящих последовательно через газы, может происходить сжатие газов в несколько десятков раз. Это приводит к приближению контактной границы газов к фронту УВ [9]. При этом возникающая на границе зона перемешивания или возмущения может "упираться" во фронт УВ, что влияет на характер течения.

Для изучения такой ситуации в 2002 г. была создана лабораторная методика, позволяющая проводить исследования в газах при числах Маха УВ  $M \approx 10$ . Такие высокие числа Маха в ударной трубе удалось получить с помощью детонации газовой взрывчатой смеси ( $C_2H_2 + 2,5O_2$ ), находящейся в камере высокого давления под избыточным давлением [9].

На рисунке 2 показаны кинограммы развития двумерных локальных возмущений на границе воздух– $SF_6$  в виде излома контактной границы (ступеньки) и в виде треугольной канавки, условно имитирующих возможные технологические дефекты на оболочке термоядерной мишени. Вариация числа Маха УВ приводила к различному сжатию  $SF_6$ .

Эксперименты показывают, что с увеличением сжатия "тяжёлого" газа при увеличении числа Маха характер развития возмущений изменяется: возмущение тормозится близлежащей ударной волной (вследствие близости УВ и контактной границы), что приводит к его быстрому подавлению зоной турбулентного перемешивания; сама зона перемешивания развивается более интенсивно.

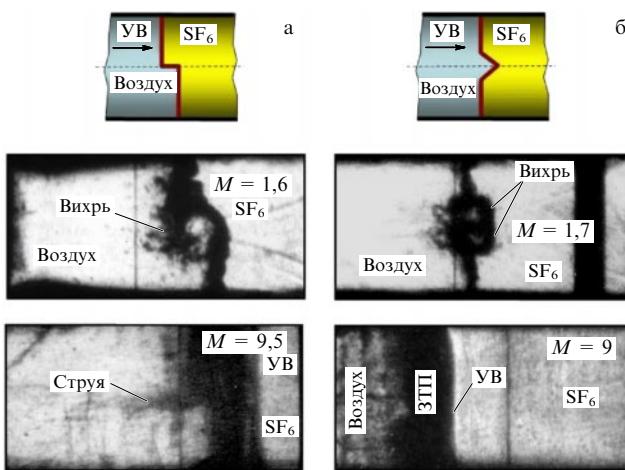


Рис. 2. Кинограммы развития двумерных локальных возмущений на границе воздух– $SF_6$  с контактной границей в виде ступеньки (а) и треугольной канавки (б).  $M$  — число Маха УВ в  $SF_6$ .

### 3. Развитие турбулентного перемешивания и возмущений на границе газ–жидкость

Известно, что при неустойчивости Рэлея–Тейлора на стадии турбулентного перемешивания в автомодельном режиме глубина проникновения "тяжёлого" вещества в "лёгкое"  $h_{h-l}$ , "лёгкого" вещества в "тяжёлое"  $h_{l-h}$  и полная ширина зоны перемешивания  $H$  описываются выражениями:

$$h_{h-l} = \alpha_1 A g t^2, \quad h_{l-h} = \alpha_2 A g t^2, \quad H = \alpha A g t^2, \quad (1)$$

где  $A = (\rho_h - \rho_l)/(\rho_h + \rho_l)$  — число Атвуда,  $\rho_h$ ,  $\rho_l$  — плотности "тяжёлого" и "лёгкого" веществ соответственно,  $g$  — ускорение,  $t$  — время,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha$  — константы, характеризующие темп (скорость) роста соответственно  $h_{h-l}$ ,  $h_{l-h}$  и  $H$  в (1). В различных источниках даются разные значения  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha$ .

Так, в ранних экспериментальных исследованиях [10]  $\alpha_2 \approx 0,07$ , в расчётах [11]  $\alpha_2 \approx 0,05$ . Позднее в расчётах [12] для идеальных жидкостей получено  $\alpha_2 \approx 0,03$ , в экспериментах со взаимно растворимыми жидкостями [10]  $\alpha_2 \approx 0,04$ , в экспериментах на границе газ–вода при  $g \approx 10^5 g_0$  (где  $g_0 = 9,8 \text{ м с}^{-2}$ ), температуре газа  $\approx 2000^\circ\text{C}$  и давлении  $\approx 400$  атм (т.е. при закритическом состоянии поверхности слоя жидкости) при смещении слоя  $S \leq 25$  мм получено  $\alpha_2 \approx 0,03$  [13]. Причины разброса  $\alpha_2$  пока не ясны. Предполагалось, что  $\alpha_2$  уменьшается с увеличением числа Рейнольдса течения.

Для исследования этого вопроса нами создана установка, которая позволяет получать течение с  $Re \approx 10^7$ . В этой установке слой жидкости массой  $\approx 3$  кг ускорялся сжатым газом. Величина ускорения достигала  $g \approx 10^3 g_0$ , смещение слоя составляло  $S = 350$  мм, ширина зоны перемешивания  $H$  равнялась 200 мм [14]. Число Рейнольдса в экспериментах определялось как

$$Re = \frac{H \sqrt{AgH}}{v},$$

где  $A \approx 1$ ,  $v$  — коэффициент кинематической вязкости воды.

В экспериментах получено, что при  $Re \leq 10^5$  ( $S < 50$  мм) значение  $\alpha_2 \approx 0,11$ , при повышении  $Re$  до  $\approx 5 \times 10^5$  ( $50 \text{ мм} < S < 70 \text{ мм}$ )  $\alpha_2$  уменьшается до 0,075.

При дальнейшем возрастании  $Re$  до  $\approx 10^7$  ( $S > 70$  мм)  $\alpha_2$  не изменяется. При  $S > 70$  мм получены значения  $\alpha_1 \approx 0,26$ ,  $\alpha \approx 0,33$ . Коэффициент асимметрии зоны составил  $k = \alpha_1/\alpha_2 \approx 3$ .

Таким образом, на границе газ–жидкость (в условиях гетерогенного перемешивания) при  $g \approx 10^3 g_0$  и  $5 \times 10^5 < Re \leq 10^7$  значение  $\alpha_2 \approx 0,07$ , т.е. совпадает с результатами ранних экспериментов. Поэтому уменьшение  $\alpha_2$  до 0,03–0,04 не объясняется только увеличением числа Рейнольдса. Значение  $\alpha_2 \approx 0,03$  может быть частным случаем конкретных экспериментов и расчётов. Необходимы исследования по поиску условий, при которых  $\alpha_2$  уменьшается, так как  $\alpha_2$  определяет физический масштаб перемешивания веществ.

Развитие локальных возмущений в слабосжимаемых жидкостях может существенно отличаться от развития возмущений в сжимаемых средах. Так, согласно [15], полусферическое локальное возмущение (ЛВ) на неустойчивой границе несжимаемой жидкости со временем выходит на автомодельный режим развития. В [16, 17] показано, что с возрастанием начального радиуса такого возмущения (от  $R \approx 0,5$  мм до  $R \approx 3$  мм) при наличии зоны турбулентного перемешивания на контактной границе газ–жидкость скорость его проникновения в жидкость увеличивается примерно в два раза, т.е. автомодельность отсутствует. Эксперименты [16] и расчёты [17] были проведены при относительно малых смещениях контактной границы ( $S \approx 40$  мм). Как будет развиваться такое возмущение при больших смещениях контактной границы? Для выяснения этого вопроса проведены дополнительные исследования при смещении слоя до 350 мм.

Получено, что локальное возмущение, как и в [16], развивается изначально в виде пузыря (рис. 3), опережающего фронт турбулентного перемешивания. При смещении слоя  $S < 50$  мм с увеличением начального радиуса локального возмущения скорость проникновения возмущения в жидкость, как и в [16, 17], увеличивается. В диапазоне смещений слоя  $50 \text{ мм} < S < 350 \text{ мм}$  скорости возрастания возмущения становятся близки между собой, т.е. процесс развития возмущения выходит на автомодельный режим. При этом время выхода возмущения на этот режим возрастает с увеличением его начального размера. Развитие таких возмущений в оболочках мишней инерционного термоядерного синтеза может приводить к их прорыву.

### 4. Развитие неустойчивостей в средах с прочностью

До некоторых пор наличие прочности в твёрдых телах позволяло считать, что в них нет проблем с неустойчивостью. Однако стабилизирующее свойство прочности теряется, когда напряжения превышают силы прочности. Известно также, что прочность в динамических нестационарных процессах существенно зависит от условий деформирования материала — величин давления, температуры, скорости деформации. Кроме того, если в веществе под действием интенсивных динамических воздействий происходят структурные и фазовые превращения, то его прочность изменяется. Из этого следует, что гидродинамические неустойчивости могут быть не только объектом исследований с конечной целью их подавления или минимизации, но и инструментом исследований прочностных свойств и фазовых состояний вещества в экстремальных условиях.

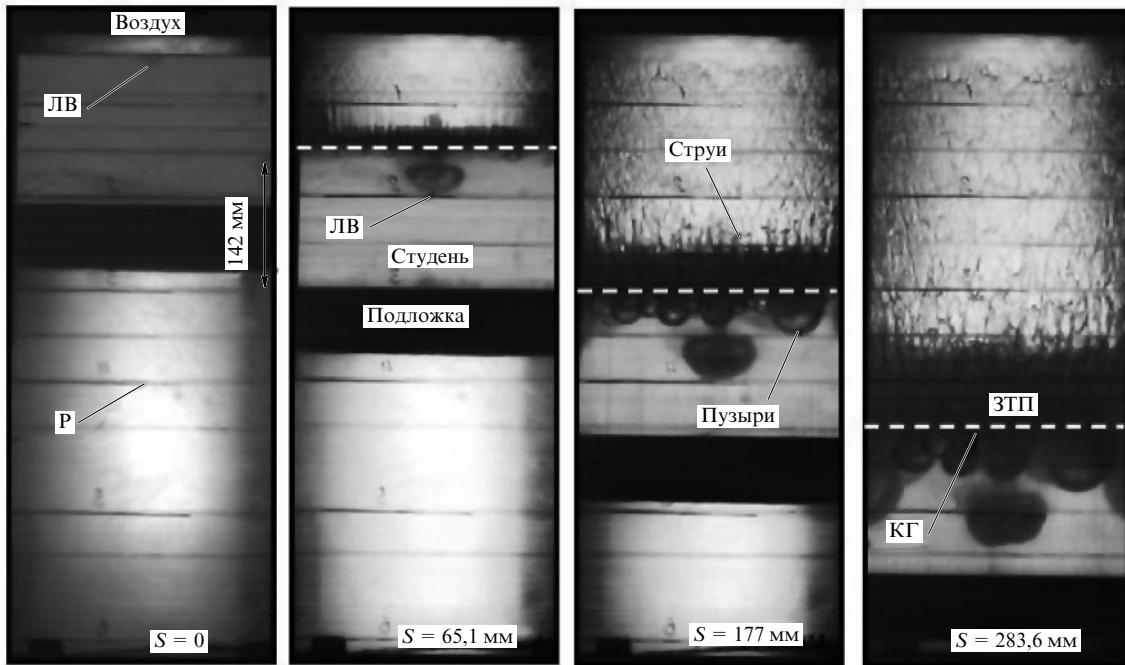


Рис. 3. Развитие полусферического локального возмущения (ЛВ) при различных смещениях контактной границы. Р — реперная линия. В качестве жидкости, как и в [16], использовался 2,2%-ный (низкопрочный) студень раствора желатина.

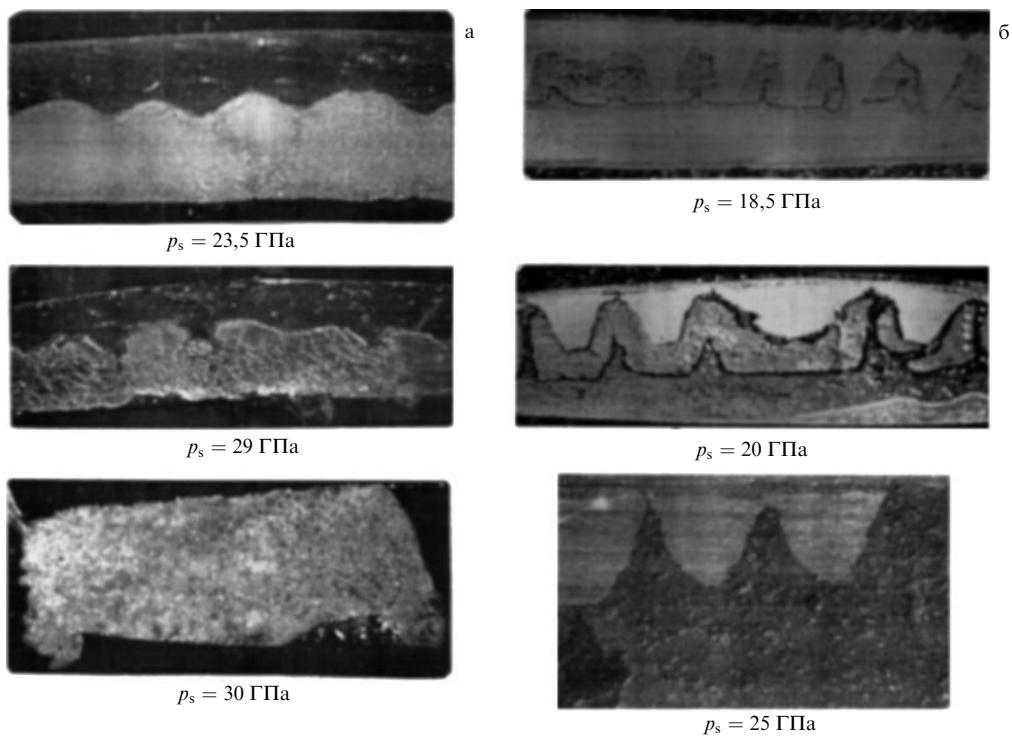


Рис. 4. Развитие неустойчивости на границе металлов Sn—Cd с  $\lambda_0 = 1,1$  мм и  $a_0 = 0,2$  мм (а) и Pb—Bi с  $\lambda_0 = 1,6$  мм и  $a_0 = 0,2$  мм (б) при увеличении давления в ударной волне  $p_s$ .

В исследованиях неустойчивости Рихтмайера—Мешкова авторами [18] предполагалось, что при приближении интенсивности УВ к параметрам ударно-волнового плавления металла будет наблюдаться резкое падение сдвиговой прочности слоистой системы, что приведёт к турбулизации течения и интенсивному перемешиванию металлов. Этот эффект, который действительно был обнаружен (рис. 4), послужил предметом ряда публикаций и патентов на изобретения. Однако зафиксирован-

ные значения амплитуд УВ, вызывающих развитие неустойчивости границы раздела металл—металл, коррелируют, но не вполне совпадают с расчётными параметрами диапазона ударно-волнового плавления более тугоплавкого металла. Это скорее всего связано с термическим разупрочнением металлов при приближении снизу к диапазону ударно-волнового плавления.

Как показали исследования [19], периодические возмущения на ускоряемой границе упругопластиче-

ского слоя могут возрастать до конечного значения, а затем совершать периодические колебания, т.е. движение границы может быть устойчивым. В то же время при определённом сочетании определяющих параметров возможно неограниченное возрастание возмущений, т.е. реализуется неустойчивость Рэлея – Тейлора. Было получено, что граница между устойчивым и неустойчивым режимами в координатах амплитуда ( $a_0$ ) – длина волн ( $\lambda$ ) определяется следующим приближённым уравнением [19]:

$$a_0^c = \frac{2Y}{\rho g} \left[ 1 - \frac{4\sqrt{3} - 1}{4\sqrt{3}} \exp \left( -\frac{2\pi h}{\sqrt{3}\lambda} \right) \right] \times \\ \times \left\{ \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2\pi h}{\sqrt{3}\lambda} \right) \right]^2 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_\infty} \right)^2 \right\}, \quad (2)$$

где  $Y$  — предел текучести,  $\rho$  — плотность,  $h$  — толщина слоя,  $\lambda_\infty = 4\pi G/(\rho g)$  — критическая длина волны для упругого полупространства,  $G$  — модуль сдвига.

Д. Друкером [20] и Д. Майлсом [21] предложены соответственно "пластический" и "упругий" критерии устойчивости. Критерий Друкера справедлив для возмущений с длиной волны, много меньшей критической ( $\lambda \ll \lambda_c$ ), а критерий Майлса справедлив при весьма малых амплитудах возмущений. Как следует из (2), область устойчивости в координатах  $a_0 - \lambda$  имеет конечную площадь и реализуется при достаточно малых амплитудах и длинах волн. В области длин волн, больших критической,  $\lambda \geq \lambda_c$ , граница неустойчива при любой амплитуде возмущений.

В реальных ударно-волновых процессах ускорение слоя носит импульсный характер, при этом в момент максимального ускорения область устойчивости имеет минимальный размер. Хотя в этом случае не существует постоянной границы области устойчивости, при определённом сочетании начальной амплитуды и длины волны возмущений возрастание возмущений оказывается весьма чувствительным к их начальным размерам, реализующейся интенсивности напряжений и к фактической динамической сдвиговой прочности материала.

На этом основан метод построения и тестирования моделей прочности вещества — динамический метод возмущений. Суть метода состоит в следующем. На поверхность слоя исследуемого вещества наносятся периодические (или локальные) возмущения. Затем исследуемый образец подвергается импульсному ускорению, в нашем случае — продуктами взрыва химического ВВ. Развитие возмущений в процессе движения лайнера регистрируется с помощью рентгеноимпульсной либо протонографической методики.

Принципиальная схема метода для случая импульсного ускорения лайнера продуктами взрыва показана на рис. 5. Там же приведены типичные протонографические изображения лайнера, полученные в одном эксперименте [22].

При задании той или иной модели прочности металла параметры модели определяются подгонкой результатов численных расчётов к экспериментальным данным по развитию возмущений.

Достоинство метода заключается в следующем: варьированием темпа и амплитуды воздействия, длины волны и амплитуды возмущений удается при применении взрывных устройств плоской или цилиндрической

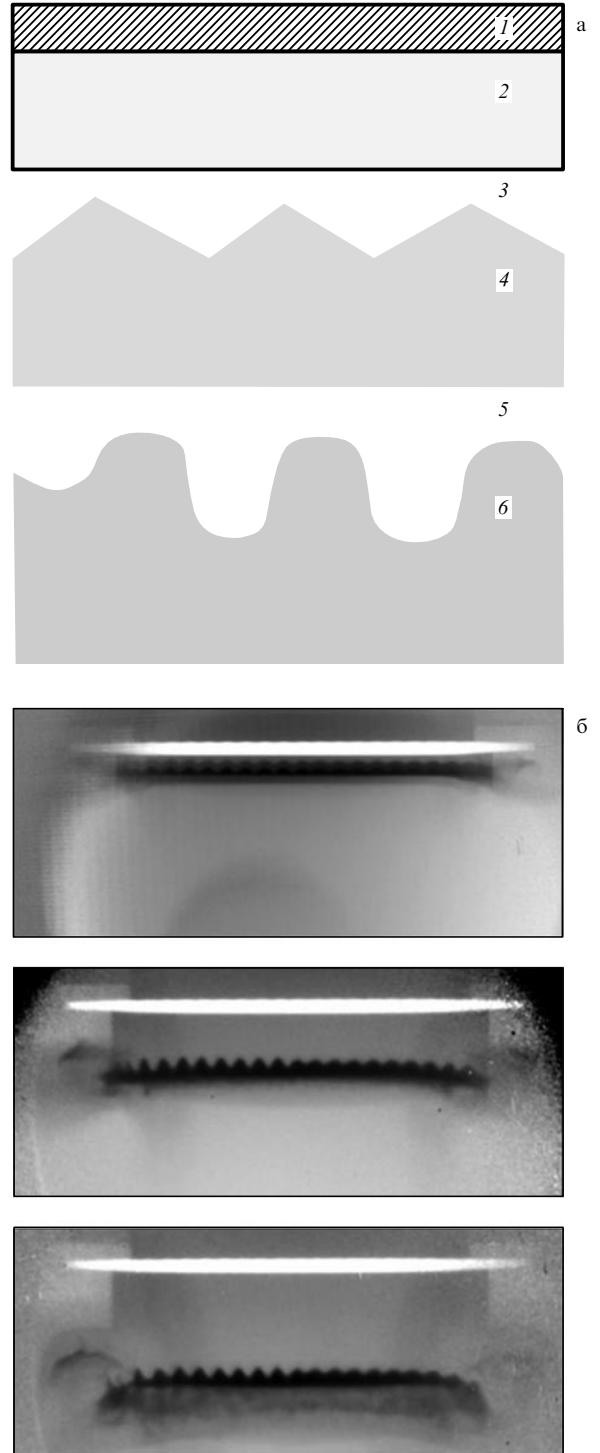


Рис. 5. (а) Схематическая иллюстрация процесса импульсного ускорения лайнера: 1 — генератор плоской детонационной волны, 2 — взрывчатое вещество, 3 — вакуумный зазор, 4 — образец в исходном состоянии, 5 — продукты взрыва, 6 — образец в полёте. (б) Протонографические изображения лайнера.

геометрии находить параметры определяющего уравнения материала  $Y_d = f(\sigma, T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, \dots)$  в диапазонах давлений  $p \approx 10 - 300$  ГПа, скоростей деформирования  $\dot{\varepsilon} \approx 10^5 - 10^9$  с<sup>-1</sup> в области температур от нормальных до температур плавления металла.

Сейчас этот метод взят на вооружение многими лабораториями мира, имеющими дело с экстремаль-

ными состояниями вещества [23, 24] и использующими не только взрывные, но и другие системы.

Одним из принципиальных результатов, полученных методом возмущений, стало обнаружение заметного превышения динамического предела текучести ряда металлов при квазизэнтропическом нагружении ( $\dot{\varepsilon} \approx 10^5 - 10^6 \text{ с}^{-1}$ ,  $p \approx 30 - 50 \text{ ГПа}$ ) над таковым при ударно-волновом нагружении ( $\dot{\varepsilon} \approx 10^8 \text{ с}^{-1}$ ). Сразу за фронтом УВ металл как бы теряет прочность на время  $\approx 0,1 - 0,5 \text{ мкс}$  и затем быстро её восстанавливает. Объяснение этому, как видится сейчас, заключается в "мгновенной потере прочности" в узких ( $l \approx 1 \text{ мкм}$ ) полосах локализованного сдвига с периодом между ними  $\approx 10 \text{ мкм}$  с последующей быстрой ( $\approx 1 \text{ мкс}$ ) релаксацией течения. Гетерогенность течения металла за фронтом УВ подтверждается независимой регистрацией скорости свободной поверхности методами лазерной доплеровской диагностики [25].

Представляет практический интерес частный случай неустойчивости Рихтмайера – Мешкова при выходе УВ на свободную границу конденсированного вещества, который проявляется в микрокумулятивном выбросе опережающего облака мелкодисперсных частиц. Основные причины этого эффекта — начальные возмущения регулярного и стохастического характера: шероховатость свободной поверхности, структурные неоднородности материала, отмеченная выше гетерогенность течения за фронтом УВ [26]. На рисунке 6 представлен видеокадр выброса частиц со свободной поверхности свинца под действием УВ интенсивностью 15 ГПа, полученный высокоскоростной микроскопической электронно-оптической съёмкой с импульсной лазерной подсветкой [27].

Гравитационные неустойчивости играют доминирующую роль и при эксплозивном объёмном расширении, разрушении и диспергировании металлов после их плавления в УВ и последующей волне разрежения [25].

Неустойчивость Кельвина – Гельмгольца в металлах в чистом виде (чистое скольжение) описана в [28], но

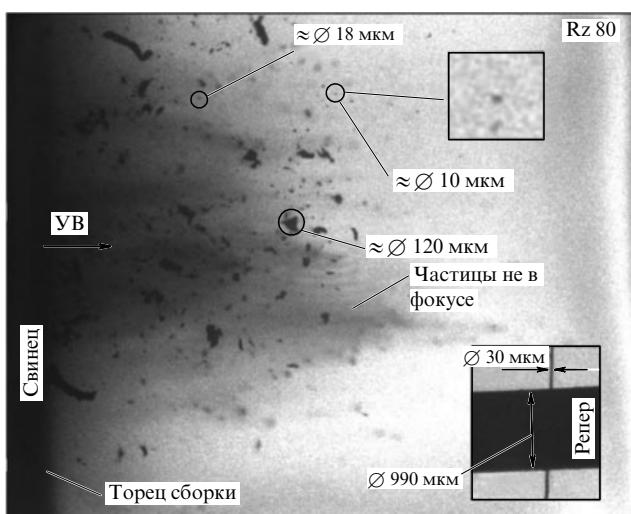


Рис. 6. Видеокадр выброса частиц со свободной поверхности свинца под действием УВ интенсивностью 15 ГПа. На вставке в правом нижнем углу рисунка изображен репер для определения размеров выбрасываемых частиц. Rz 80 — параметр шероховатости поверхности.

гораздо чаще она регистрируется в режимах сварки взрывом — при косом соударении пластин с фазовой скоростью точки соударения (контакта)  $U_c < c_0$ , где  $c_0$  — объёмная скорость звука в свариваемых металлах.

Для ряда металлов получена зависимость амплитуды возмущений сдвиговой природы, генерируемых в сходных условиях сварки взрывом, от числа Маха,  $a = f(M)$ . Из зависимости следует, что её максимум лежит вблизи значений  $M \approx 1,3 - 1,5$ , при которых режим течения с отсоединенными ударными волнами сменяется режимом с присоединенными к точке соударения волнами.

Наиболее впечатляющими результатами этих исследований явились неожиданно высокая и динамическая пластичность хрупкого в статике бериллия, а также способность тонких ( $\approx 10 \text{ мкм}$ ) гальванических покрытий гасить развитие сдвиговых возмущений [29].

Авторы благодарят всех сотрудников Института экспериментальной газодинамики и физики взрыва (ИФВ) РФЯЦ–ВНИИЭФ, чьими трудами и в сотрудничестве с которыми получены результаты, представленные в статье.

## Список литературы

1. Taylor G *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **201** 192 (1950)
2. Richtmyer R D *Commun. Pure Appl. Math.* **13** 297 (1960)
3. Мешков Е Е *Изв. АН СССР Мех. жидкости и газа* (5) 151 (1969) [Meshkov E E *Izv. Acad. Sci. USSR Fluid Dyn.* **4** (5) 101 (1969)]
4. Helmholtz H L F "Über discontinuirlich Flüssigkeits-Bewegungen" *Monatsberichte Königl. Preuß. Akad. Wiss. Berlin* 215 (1868)
5. Беленький С З, Фрадкин Е С *Труды ФИАН* **29** 207 (1965)
6. Сахаров А Д и др. *ДАН СССР* **159** 1019 (1964) [Sakharov A D et al. *Sov. Phys. Dokl.* **9** 1091 (1965)]
7. Дудин В И и др. "Исследование развития возмущений и турбулентного перемешивания на границе газ–газ методом лазерного ножа", Препринт № 49-96 (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996)
8. Невмержицкий Н В и др. *Вопр. атом. науки и техн. Теор. и прикл. физика* (3) 44 (2009)
9. Невмержицкий Н В и др., в сб. *IX Харитоновские тематические научные чтения* (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007) с. 612
10. Read K I *Physica D* **12** 45 (1984)
11. Youngs D L *Physica D* **12** 32 (1984)
12. Youngs D L *Laser Part. Beams* **12** 725 (1994)
13. Невмержицкий Н В, Сотков Е А, Дреннов А О, в сб. *V Харитоновские тематические научные чтения* (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003) с. 357
14. Невмержицкий Н В и др., в сб. *XI Харитоновские тематические научные чтения* (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009) с. 583
15. Гаранин С Ф *Вопр. атом. науки и техн. Теор. и прикл. физика* (3/1) 12 (1994/1995)
16. Сотков Е А и др., в сб. *V Харитоновские тематические научные чтения* (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003) с. 362
17. Раевский В А, Синицына С Н, Янилкин Ю В, в сб. *VХаритоновские тематические научные чтения* (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003) с. 366
18. Mikhailov A L et al., in *Proc. of the Conf. of Am. Phys. Soc., SCCM-1995, Seattle, Washington*, 1995, p. 985
19. Lebedev A I et al., in *4th Intern. Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing*, Cambridge, 1993, p. 81
20. Drucker D C "Taylor instability" of the surface of an elastic-plastic plate" *Mech. Today* **5** 37 (1980) [Друкер Д "Тейлоровская неустойчивость поверхности упругопластической пластины", в сб. *Механика деформируемых твердых тел. Направления развития* (М.: Мир, 1983) с. 151]
21. Miles J W, General Atomics Report, GAMD-7335 (1960)
22. Антипов Ю М и др. *ПТЭ* (3) 5 (2010) [Antipov Yu M et al. *Instrum. Exp. Tech.* **53** 319 (2010)]
23. Kaul M Ann et al., в сб. *IV Харитоновские тематические научные чтения* (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003) с. 327
24. Covallo M R, in *Dynamic Strength Experiments, Joint US-Russia Conference on advance in Material Science*, 2009

25. Михайлов А Л *Физическая мезомеханика* **10** (5) 53 (2007)
26. Огородников В А и др. *ФГВ* **34** (6) 103 (1998) [Ogorodnikov V A et al. *Combustion Explosion Shock Waves* **34** 696 (1998)]
27. Невмержицкий Н В и др., в сб. *Межд. семинар по физике турбулентного перемешивания смесимаемых сред, Россия, Москва, 2010*
28. Михайлов А Л *ФГВ* **15** (2) 158 (1979)
29. Drennen O B et al., in *Proc. of the APS Conf. SCCM-2001, Atlanta, USA, 2001*, p. 595

PACS numbers: 05.70.Ce, **07.35.+k**, **47.40.-x**  
 DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104j.0416

## Исследования экстремальных состояний металлов с использованием ударных волн

Р.Ф. Трунин

### 1. Введение

Начало исследований, о которых пойдёт речь, относится к 1947 г., когда перед газодинамиками КБ-11 (сейчас Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ — ВНИИЭФ)) была поставлена задача исследования ударно-волновых свойств веществ, входящих в состав создаваемой в Советском Союзе атомной бомбы. Эти свойства нужны для проведения расчётного выбора её конструкции, поскольку созданное на их основе уравнение состояния, т.е. функциональная связь давления, плотности и энергии, замыкало систему уравнений движения и тем самым позволяло оценить параметры сжатия активных и других веществ.

Первопроходцами экспериментальных исследований этого направления у нас были Л.В. Альтшулер, К.К. Крупников, В.А. Цукерман, Б.Н. Леденёв, В.И. Жучихин, С.Б. Кормер и их сотрудники. Активно участвовали в разработке методов исследования и интерпретации получаемых результатов также сотрудники теоретических отделений Я.Б. Зельдович, Е.И. Забабахин, Г.М. Гандельман, Н.А. Дмитриев, В.П. Копышев и др. В научно-организационном плане неоценимой была роль Ю.Б. Харитона.

Предложенные способы определения параметров сжатых ударными волнами веществ позволили уже в 1947 г. провести первые измерения их характеристик.

Первым веществом, от знания свойств которого в определённый момент зависел результат испытания бомбы, было взрывчатое вещество (ВВ), входящее в её состав. Многим известна эпопея с получением параметров детонации этого ВВ (см., например, [1]), поэтому я не буду на ней останавливаться. Отметим лишь, что только благодаря Зельдовичу удалось устранить имеющиеся тогда различия в детонационных параметрах и тем самым снять острейший вопрос об испытании бомбы.

Первым, исследованным в 1947 г., металлом стал уран, сжатие которого было изучено при давлениях вплоть до 500 кбар.

**Р.Ф. Трунин.** ФГУП "Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ  
 E-mail: root@gdd.vniief.ru

Измерения сначала проводились с использованием метода "откола", который, вследствие его небольшой точности, вскоре уступил место абсолютному методу "торможения" [2] и основанному на его принципах методу "отражения" [3].

Большинство измерений, результаты которых частично будут представлены в разделах 3–5, проведено двумя последними методами. Согласно им в опытах определяются два кинематических параметра: скорость ударной волны в образце  $D$  и скорость перемещения вещества за фронтом — так называемая массовая скорость  $U$ .

Скорость ударной волны в обоих методах определяется легко — надо лишь на пути её распространения в исследуемом образце установить датчики любого типа, реагирующие на высокие давления фронта, и зарегистрировать время прохождения волны между ними.

Для определения массовой скорости разработаны специальные способы, позволяющие косвенно определить этот параметр. Ознакомиться с ними можно по первоисточникам [2, 3]. Здесь мы лишь напомним, что в методе торможения, предложенном Альтшулером, скорость  $W$  подлетающего к мишени ударника в точности равна удвоенному значению массовой скорости  $U$  в мишени (если ударник и мишень состоят из одного материала). При применении метода отражения (Альтшулер, Крупников, Гандельман) должно быть известно уравнение состояния материала экрана, прикрывающего образцы со стороны подходящей к ним ударной волны, и параметры этой волны в экране. Массовая скорость  $U$  в исследуемом веществе находится из рассмотрения распада произвольного разрыва на диаграмме давление — массовая скорость.

Термодинамические параметры сжатого вещества — давление, плотность и энергия ударного сжатия — находятся через эти кинематические величины из законов сохранения импульса  $P - P_0 = DU/V_0$ , массы  $V/V_0 = (D - U)/D$  и энергии  $E - E_0 = 0,5(P + P_0)(V_0 - V)$ . Здесь  $P$ ,  $V$  и  $E$  — давление, удельный объём и внутренняя энергия, индекс "0" относится к начальным значениям этих величин. Температура ударно-сжатых веществ непосредственно не измеряется, а находится из уравнения состояния (УРС), сконструированного на основе этих параметров.

Уравнения сохранения определяют так называемую адиабату Гюгонио — адиабату исследуемого вещества  $P_H = P_H(V, P_0, V_0)$ , представляющую собой совокупность термодинамических состояний, возникающих в результате ударного сжатия вещества, находившегося в исходном состоянии при  $P_0$  и  $V_0$ .

Адиабата Гюгонио — основной источник экспериментальной информации, на основе которой находятся уравнения состояния веществ. Другие ударно-волновые характеристики веществ: скорости звука за фронтом ударной волны, адиабаты расширения и двукратного сжатия, температуры ударного сжатия и т.п. непосредственно связаны с ударной адиабатой и во многом ею определяются. Именно поэтому при нахождении уравнений состояния веществ основное внимание уделяется исследованиям ударных адиабат.

Замечательным свойством ударных адиабат является то, что в  $D-U$ -координатах в широких диапазонах изменения этих параметров они аппроксимируются линейными или близкими к линейным зависимостями.