

22. Dolling D. S., Bogdonoff S. M. Upstream influence in sharp fin-induced shock wave turbulent boundary layer interaction. — AIAA J., 1983, v. 21, N 1.
23. Корнилов В. И., Харитонов А. М. Экспериментальное исследование сжимаемого пограничного слоя вблизи линии пересечения двух пластин, образующих прямой угол. — Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, 1974, № 8, вып. 2.
24. Бродецкий М. Д., Максимова А. И., Харитонов А. М. К исследованию интерференционных и дифракционных явлений при сверхзвуковом обтекании продольных уступов. — В кн.: Аэродинамическая интерференция при обтекании пространственных тел. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1980.

Поступила 29/X 1984 г.

УДК 533.6.011

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПРИСТЕНОЧНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН В ТРУБАХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. И. Киселев, В. А. Клунов, В. Б. Рождественский,  
В. Л. Юрьев  
(Москва)

Пристеночное возмущение плоского фронта ударной волны (УВ) при ее распространении в трубах с инертными газами впервые рассмотрено авторами [1]. Проводя эксперименты, в которых вдоль оси трубы была натянута медная проволока, они наблюдали возмущение фронта УВ и вдоль проволоки. Эта область пристеночного возмущения УВ обладала значительной разрушительной силой, распространялась с большей скоростью, чем основная УВ, но излучала с меньшей яркостью. Такое явление последовало также в [2, 3]. Проведя эксперименты в толстостенных трубах, авторы [2] показали, что для образования пристеночных возмущений существенно наличие стенки, а не ее разрушение, а также присутствие в излучении УВ высокоэнергетических квантов. В [3] отмечено опережающее фронт УВ испарение материала стенок трубы под действием излучения УВ. Авторы этих работ предложили несколько механизмов образования пристеночного возмущения, однако вопрос о том, какой из них реализуется в действительности, остался нерешенным. В данной работе на основе проведенных экспериментов дается объяснение этого явления и рассматривается картина возникающего газодинамического течения.

В экспериментах, схема которых представлена на рис. 1, УВ распространялась в трубе 1, заполненной ксененом нормальной плотности. Внутри трубы помещались плоские стеклянные пластинки 2 с покрытием из различных материалов. УВ генерировалась при выходе детонационной волны на торец заряда из гексогена массой 800 г. Для получения плоского фронта УВ применялась линза специальной формы из смеси тротила и гексогена. Излучение с фронта УВ регистрировалось пироэлектрическим приемником 3. Возникновение и распространение области пристеночного возмущения регистрировалось камерой СФР-2М в режиме целевой развертки за фиолетовым фильтром (432 нм) и камерой ВФУ-1 в режиме киноспектрографа с дифракционной решеткой. Камера СФР-2М также наводилась на боковые стеклянные окна 4 с помощью системы зеркал 5. Скорость центральной, невозмущенной, части УВ измерялась в отдельном опыте, где обгоняющие волну пристеночные возмущения отсекались специальными выступами на стенке трубы. Скорость УВ менялась от 7,5 в начале до 6,5 км/с в конце пути длиной 160 мм. Плотность потока излучения с фронта невозмущенной УВ возрастала от 0 до 4,2 МВт/см<sup>2</sup> за 2,5 мкс, к 10 мкс спадала до 3,5 МВт/см<sup>2</sup> и оставалась постоянной до 25 мкс. Плотность потока излучения, воздействующего на стенку, по расчетам изменялась от 0 до 1,8 МВт/см<sup>2</sup>, а плотность энергии излучения, падающего на конец каждой пластинки, составляла соответственно 8,0; 10,3; 12,5 Дж/см<sup>2</sup>.

Рассмотрим результаты опыта, в котором в качестве покрытия стеклянных пластинок применялся напыленный висмут. На рис. 2 представлена фоторегистрограмма опыта, полученная с помощью камеры СФР-2М. На ее части (а) видно, как через 2 мкс после возникновения УВ в ксеноне

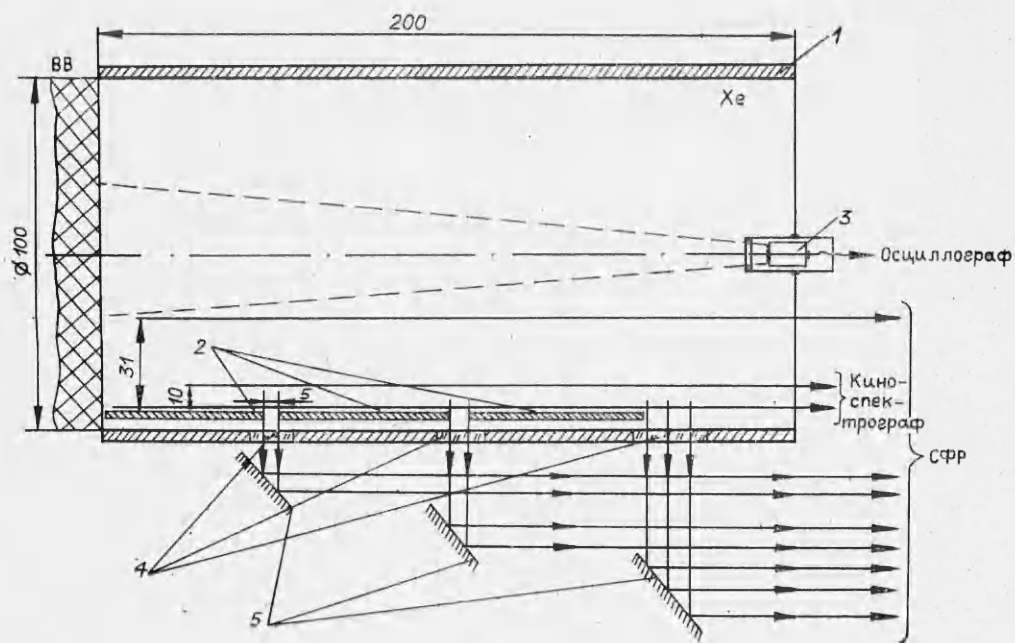


Рис. 1

от пластинок с висмутом к оси трубы начинает распространяться область возмущения, имеющая меньшую яркость, чем фронт основной УВ. Скорость расширения области пристеночного возмущения от стенки к оси трубы менялась от 0,8 до 0,4 км/с. При проходе щелей между пластинками возникали пульсации яркости и скорости расширения области возмущений. Моменты прихода пристеночного возмущения на концы пластинок видны на части б рис. 2, они отмечены цифрой 1. В эти же моменты времени в узкой зоне, вблизи стенки, регистрировалось повышение яркости 2. В моменты времени 3 происходило «прогорание» слоя висмута. В данном опыте поверхностная плотность напыленного на пластинки слоя висмута составляла  $3,2 \text{ мг/см}^2$ . Скорость распространения пристеночного возмущения вдоль пластинок превышала скорость основного фронта УВ и менялась от 8,4 до 8,0 км/с.

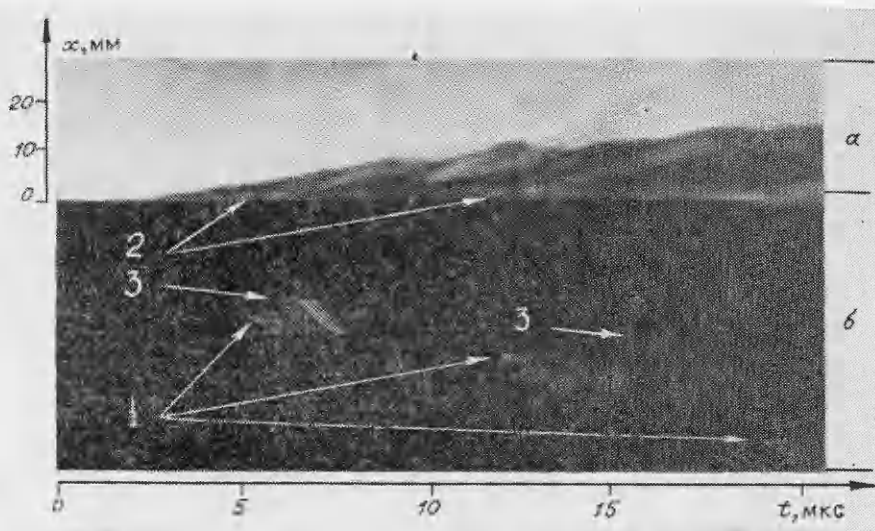


Рис. 2

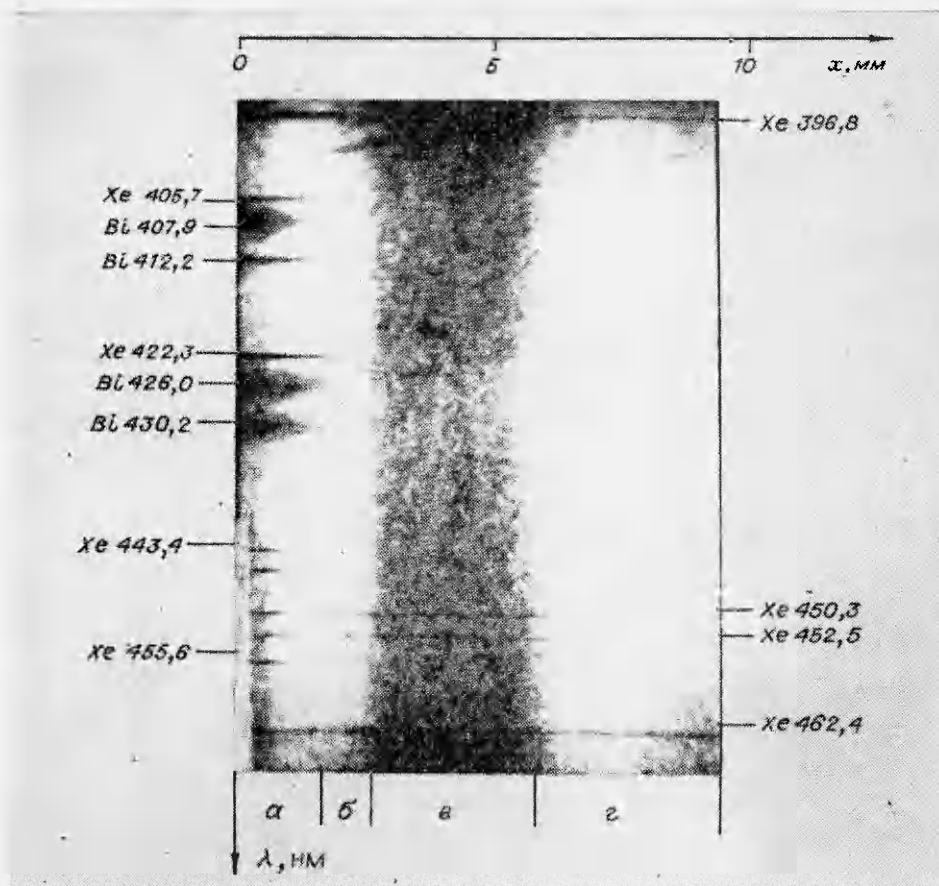


Рис. 3

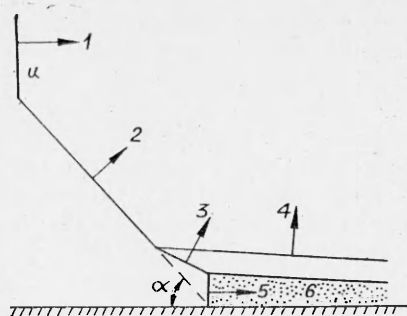
На кадре киносpectрографа (рис. 3) свечение явления разрешено по высоте  $x$  от пластинок с висмутом и по длине волны излучения  $\lambda$ . Время экспозиции кадра 2 мкс. Пластины с висмутом расположены слева. По всей ширине кадра на фоне свечения сплошного спектра видны четыре линии поглощения ксенона. Область  $г$  соответствует свечению неискаженного фронта УВ. Его температура в данный момент 30 кК. Участок пристеночного возмущения УВ состоит из областей  $а$ ,  $б$ ,  $в$ . В области  $а$  на фоне свечения сплошного спектра видны уширенные линии поглощения висмута, что указывает на наличие в ней перед плазменным образованием с температурой 19 кК слоя паров висмута с температурой 15 кК. В областях  $а$  и  $б$  наблюдается появление новых линий поглощения ксенона. Область  $в$  по излучаемому спектру не отличается от свечения фронта невозмущенной части УВ, но имеет меньшую температуру  $\sim 15$  кК.

Фоторегистрограммы и кадры киносpectрографа показывают, что начало образования пристеночного возмущения и начало испарения материала стенок трубы совпадают по времени. Пары висмута расширялись к оси трубы со скоростью примерно 0,4 км/с. Но до момента прихода пристеночного возмущения они поднимались над поверхностью пластинок не более чем на 2,5 мм. Спектрограмма пристеночного возмущения показывает, что ее область  $а$  является УВ, движущейся по разогретым излучением основной УВ парам висмута. Причем излучение УВ, движущейся по парам, заэкранировано прогретым слоем перед ее фронтом. В момент выхода этой УВ на границу паров с ксеноном, что реализуется на краю пластинок, происходило снятие экранировки УВ и ее температура в течение примерно 0,5 мкс увеличивалась с 19 до 23 кК. Область  $в$  есть УВ, движущаяся по ксенону. Ее меньшая яркость, по сравнению с яркостью

основной УВ, указывает на меньшее значение скорости распространения.

Моделью пристеночного возмущения УВ может служить распространение фронта УВ по газу, в котором у стенки есть некоторый слой с большей температурой. Согласно гипотезе [4], наличие такого «теплого слоя» приводит к возникновению сложного газодинамического течения, которое не сильно зависит от толщины этого слоя.

В нашем случае ударно-волновая конфигурация, объясняющая структуру пристеночного возмущения, представляется следующим образом. Под действием излучения с фронта основной



Р и с. 4

УВ 1 (рис. 4) происходит испарение материала стенок трубы, что приводит к появлению у стенки тонкого слоя паров 6. Пары интенсивно разогреваются излучением (в нашем опыте до 15 кК) и расширяются от стенки, генерируя в рабочем газе слабую УВ 4, которая регистрировалась в опыте по появлению за ее фронтом линий поглощения ксенона (область б на рис. 3). Вследствие значительного разогрева и расширения паров в них УВ 1 начинает распространяться с большей скоростью и образует УВ 5. Разгружаясь сначала в слой ударно-сжатого перед парами ксенона, а затем в невозмущенный ксенон, эта опережающая основную волну УВ 5 генерирует боковые УВ 3 и 2. Несмотря на то что слой паров занимает область у стенки всего в несколько мм, скорость УВ 5 в нем выше скорости УВ 1 и присоединенная УВ 2 может с течением времени перекрыть всю поверхность основной УВ 1. Скорость УВ 2 ниже скорости УВ 1. Ее величина определяется скоростью УВ 5. Если пренебречь размерами фронтов УВ 5 и 3, то связь скоростей УВ 5 и 2 можно выразить соотношением  $D_2 = D_5 \sin \alpha$ . Но  $\operatorname{tg} \alpha = u / (D_5 - D_1)$ , где  $u$  — скорость точки стыка УВ 2 с УВ 1. Поэтому  $D_2 = D_5 / \sqrt{1 + (D_5 - D_1)^2 / u^2}$ . Если подставить в эту зависимость измеренные в опыте величины  $D_5 = 8,5$  км/с,  $D_1 = 7$  км/с,  $u = 0,6$  км/с, то  $D_2 \approx 3,2$  км/с, ей по ударной адиабате ксенона [2] соответствует температура 16 кК, близкая к измеренной температуре УВ 2 — 15 кК, что подтверждает правильность предложенной выше ударно-волновой конфигурации пристеночного возмущения.

УВ 5 может иметь более сложную форму, чем показано на рис. 4. Это связано с тем, что излучением сплошного спектра пары интенсивно разогреваются обычно в тонком наружном слое, а вблизи испаряющейся поверхности их температура существенно меньше и здесь возможно присутствие значительного количества вещества стенки в виде мелкодисперсных капель.

Возникновение явления пристеночного возмущения обусловлено прозрачностью среды перед основной УВ для квантов, способных ионизировать образующиеся пары вещества стенки. Образование свободных электронов способствует развитию «вспышки» поглощения в парах и их интенсивному разогреву при довольно низких плотностях падающего потока излучения, реализующихся в данных опытах. Для УВ в воздухе или инертном газе с примесью воздуха такое явление обычно не наблюдается из-за непрозрачности этих газов для ионизирующих квантов.

Проводились также опыты, где в качестве материала покрытия стенок трубы использовались стекло, соль ртути, алюминий. Во всех опытах зарегистрированы спектры испаренных и разогретых материалов стенки. Высота отхода паров от стенки не превышала 4 мм и была мала по сравнению с высотой распространения возмущений по поверхности основной УВ. Скорости развития области пристеночного возмущения менялись при изменении вещества. Так, в случае стенки с покрытием, напыленным

алюминием, скорости  $u$  и  $D_5 - D_1$  примерно в 2 раза меньше, чем в случае с покрытием из висмута. Замечено, что скорости развития пристеночного возмущения зависят от поверхностной плотности покрытия на стенке. При меньшей поверхностной плотности покрытия возмущения развиваются раньше и скорость их существенно возрастает, что связано, по-видимому, с более ранним началом испарения и разогревом до большей температуры меньшей массы висмута.

Необходимо продолжить эти эксперименты для более подробного выяснения влияния свойств стенки на развитие пристеночного возмущения интенсивно излучающей УВ. Представляет интерес также исследование излучательных свойств УВ  $\delta$ , распространяющейся по образующимся парам тяжелых металлов. Ожидается, что для такой УВ возможно уменьшение эффекта экранировки ее излучения под некоторыми углами к ее поверхности, что может привести к выходу в этом направлении мощного ультрафиолетового излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Shreffler R. G., Christian R. H. Boundary disturbance in high-explosive shock tubes. — J. Appl. Phys., 1954, v. 25, N 3.
2. Цикулин М. А., Попов Е. Г. Излучательные свойства ударных волн в газах. М.: Наука, 1977.
3. Савров С. Д., Агеев И. М. Лабораторная взрывная ударная труба. — ТВТ, 1980, № 6.
4. Губкин К. Е. Распространение взрывных волн. — В кн.: Механика в СССР за 50 лет. М.: Наука, 1970, т. 2.

Поступила 5/XI 1984 г.

УДК 532.593:532.529

### ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В ПОРИСТЫХ СЖИМАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ

Л. Г. Гвоздева, Ю. М. Фаресов

(Москва)

**Постановка задачи. Анализ расчетной модели.** Эластичные пенополиуретаны на основе простых и сложных полиэфиров [1] относятся к классу материалов, характеризующихся высокой пористостью (суммарный объем пор может достигать 98% общего объема образца) и невысокими значениями упругости скелета. Характерный размер пор пенополиуретана зависит от его марки и технологии изготовления и находится в диапазоне от долей до единиц миллиметров. Будем рассматривать пористый материал при достаточно больших линейных размерах образцов (сотни миллиметров и более) в виде смеси твердых частиц и газа, что может быть обосновано следующим образом. Упругость скелета большинства марок эластичных пенополиуретанов заметно меньше величины атмосферного давления при нормальных условиях (так, для широко распространенного пенополиуретана марки ППУ-ЭМ-1 с кажущейся плотностью 25–45 кг/м<sup>3</sup> напряжение сжатия при 40%-ной деформации составляет  $(0,4-1,0) \cdot 10^4$  Па [1]).

Это обстоятельство показывает, что возможно пренебречь упругостью скелета указанных материалов по сравнению с упругостью газа в порах при начальном давлении газа  $p^0 \sim 10^5$  Па и моделировать реальный пористый материал жидкостью с пузырьками газа либо однородной газозвесью твердых не взаимодействующих микрочастиц.

Динамика распространения акустических и ударных волн в подобных средах анализировалась в [2–6] на основе представления двухфазной среды в виде гомогенной смеси. Как отмечалось в [6], гомогенная смесь представляет собой простейшую модель двухфазной среды, в которой пренебрегают всеми эффектами, связанными с дискретностью струк-