

упругой волны и возмущения диффузионного характера. Существование электромагнитного сигнала, предшествующего акустическому (в ближней зоне), связано с наличием эффективного магнитного момента возникающих токов, а также обусловлено диффузией токовой системы. На больших расстояниях наиболее существенны возмущения, распространяющиеся вместе с продольной волной. Их амплитуда убывает как r^{-1} , а зависимость от времени скоррелирована с акустическими величинами, но сдвинута «по фазе». Такой характер сигнала отвечает экспериментальным данным. Отмеченные закономерности свойственны любому виду функций сейсмического источника.

Автор выражает благодарность С. З. Дунину за ряд полезных советов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов С. В., Гохберг М. Б. и др. Короткопериодные колебания электромагнитного поля Земли при промышленном взрыве // ДАН СССР. — 1985. — Т. 281, № 3.
2. Гохберг М. Б., Гуфельд И. Л. и др. Исследование возмущений естественных и искусственных электромагнитных полей источниками сейсмического происхождения // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1987. — № 2.
3. Гохберг М. Б., Гуфельд И. Л. и др. Электромагнитное излучение горной среды в условиях взрывного нагружения // ДАН СССР. — 1987. — Т. 295, № 2.
4. Гульельми А. В. Магнитоупругие волны // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1986. — № 7.
5. Гульельми А. В. Возбуждение колебаний электромагнитного поля упругими волнами в проводящем теле // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1986. — Т. 27, № 3.
6. Горбачев Л. П., Сурков В. В. Возмущение внешнего магнитного поля поверхностной волной Рэлея // Магнит. гидродинамика. — 1987. — № 2.
7. Гульельми А. В., Гохберг М. Б. и др. Индукционное сейсмомагнитное зондирование земной коры // ДАН СССР. — 1987. — Т. 293, № 4.
8. Роден Г. Неупругие процессы в сейсмических волнах при подземных взрывах // Нелинейные волновые процессы. — М.: Мир, 1987. — (Новое в зарубежной науке. Сер. Механика; № 42).
9. Барсуков О. М., Сковородкин Ю. П. Магнитные наблюдения в районе взрыва в Медео // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1969. — № 5.

г. Москва

Поступила 21/IV 1988 г.

УДК 533.6.011

С. Д. Савров

О МЕХАНИЗМЕ ДЕФОРМАЦИИ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ЕЕ ДВИЖЕНИИ В КАНАЛЕ

Деформация ударного фронта мощной ударной волны (УВ) у стенок канала, заполненного инертным газом, обнаружена Шреффлером и Христианом [1]. Количественное описание этого явления и тем более прогнозирование условий его возникновения малоизвестны и до настоящего времени. Неожиданным, например, оказалось обнаружение такой деформации ударного фронта в лабораторной ударной трубе [2].

Первая попытка удовлетворительного объяснения явления деформации фронта предпринята Г. И. Тагановым [3] на основе аналогии пристеночного искривления фронта с явлением отрыва вязкого пограничного слоя. Исходным пунктом в этой модели было предположение о наличии «теплого слоя» перед фронтом УВ вблизи нагреваемой излучением стенки. Такая модель хорошо согласуется с экспериментами, в которых «теплый слой» создан искусственно — путем теплопередачи от нагретой горелкой или разрядом металлической стенки [4—7]. В этих условиях возникновение «теплого слоя» явно отличается от условий его возникновения в ударных трубах или при мощном взрыве над поверхностью Земли. В ударной трубе [2] перед фронтом УВ обнаружено испарение стенок канала при весьма умеренных яркостных температурах (~ 15 кК). Наличие паров осложняет задачу.

Детальное исследование показало [8], что слой паров является тонким относительно диаметра канала, и это на первый взгляд позволяет применить для описания деформации фронта бифуркационную модель, являющуюся развитием схемы, приведенной в [3].

На рис. 1 дана схема течений для такой модели, где 1 — тангенциальная поверхность, 2 — невозмущенный ударный фронт, 3 — вторичный ударный фронт, 4 — косая УВ, 5 — граница срыва потока, 6 — пристеночный слой паров.

На рис. 2 представлена характерная картина развития бифуркаций в лабораторной ударной трубе. Диаметр трубы 150 мм, длина канала, заполненного ксеноном, 1000 мм. Материал стенки — нержавеющая сталь. Начальное давление в ксеноне 13,3 кПа, число Маха УВ $M = 17$. В конце канала УВ сталкивается со стеклянной пластинкой, что позволяет зафиксировать форму ее фронта при наблюдении процесса на целевой фоторазвертке с торца УВ (рис. 2, где 1 — момент входа УВ в ксенон через разделительную диафрагму из лавсана, 2 — изображение на фоторазвертке траектории линии пересечения флангов фронта УВ со стенками канала, 3 — удар фронта по стеклянной пластинке). Несмотря на четкую картину явления деформации ударного фронта, количественный расчет параметров по схеме на рис. 1 встречается трудности.

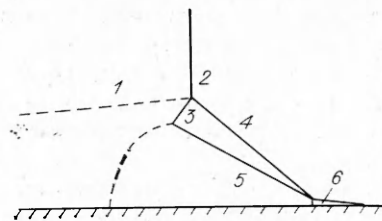


Рис. 1

Из дополнительных экспериментов видно, что в длинном канале (3 м) при тех же начальных условиях распространение деформации фронта к оси канала прекращается после прохождения УВ расстояния в 6—8 калибров канала трубы. Деформированная поверхность ударного фронта выходит на стационарный режим. Такого режима в схеме на рис. 1 ранее не предполагалось. В [1, 4—10] деформация ударного фронта была нестационарной.

Эксперименты с облицовкой стенок канала медной фольгой показали, что размер деформированных флангов фронта УВ уменьшился в несколько раз, однако угол их наклона остался тем же самым ($\sim 45^\circ$). Различие в атомном весе паров железа и меди и в температурах их кипения невелико, чтобы дать большую разницу в скоростях деформации фронта. Наблюдается также сильное влияние на деформацию фронта увеличения яркости волны. При $M = 23$ бифуркации перекрывают все сечение канала на расстоянии трех калибров от разделительной диафрагмы. Поскольку более мощное облучение неионизованных паров не может существенно увеличить в них скорость звука, этот факт тоже необъясним.

Встречает аналогичные трудности и объяснение сильного влияния на деформацию увеличения сечения канала [8]. Все это заставляет более детально проанализировать корректность применения бифуркационной модели [3, 8] для описания деформации ударного фронта. Наблюдение факта [2, 8], что «теплый слой» состоит из паров стенок канала, существенно меняет условия применения этой модели относительно ранее предполагаемого нагрева тонкого слоя рабочего газа у стенки теплопроводностью. Главное условие для развития бифуркации — меньшая плотность газа у стенки, которая позволяет флангам ударного фронта обгонять центральную часть. Выполнение этого условия для горячих паров у стенки не самоочевидно. Существенным оказываются соотношение атомных весов рабочего газа и паров, температура кипения материала стенки и, что наиболее важно, интенсивность испарения стенки. При очень мощном ее облучении интенсивное испарение способно создать самостоятельную

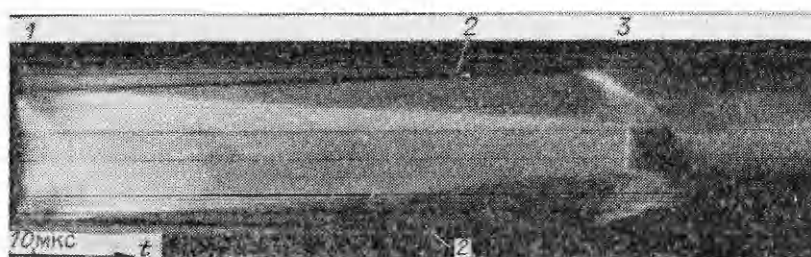


Рис. 2

косую УВ. Плотность толкающих ее паров может превышать плотность невозмущенного рабочего газа, и условие для развития бифуркации не будет выполняться. При использовании для изготовления стенок канала неметаллических материалов (стекло, пластмасса, картон [1] и др.), в которых коэффициент поглощения света в ультрафиолетовой области спектра относительно мал, температура кипения может достигаться почти одновременно в сравнительно толстом слое (~ 10 мкм) и процесс испарения будет носить взрывной характер даже при умеренных яркостных температурах. Для металлических материалов важную роль играют наличие окисной пленки, теплопроводность, а также загрязнение поверхности канала микронными слоями органических веществ, неизбежное при эксплуатации высокоэнтальпийных труб с большими габаритами.

В динамике развития слоя паров необходимо учитывать и экранировку парами светового потока высокой яркости, возникающей вследствие их фотоионизации [10]. Экранировка от облучения свежих слоев конденсированного вещества и дополнительный нагрев паров, ускоряющий их расширение, способствуют достижению низкой плотности для развития бифуркации вслед за косой УВ, созданной расширяющимися парами. Природу пристеночных возмущений в экспериментах с мощными УВ ($T_{я} \sim 30$ кК) трудно определить и прямыми наблюдениями, и сопутствующим расчетом, поскольку поглощательная способность стенок канала в широком спектральном интервале неизвестна. В свете этого остается по-прежнему неясной трактовка механизма пристеночных искривлений фронта [1].

В вопросе рассогласования результатов экспериментов, проведенных в лабораторных ударных трубах по схеме рис. 1, на первый план выступает другое обстоятельство. При невысокой скорости испарения стенок канала в них ($T_{я} \sim 15$ кК) условия для развития бифуркаций выполняются относительно легко. Через некоторое время после вхождения УВ в канал с инертным газом ее фронт встречается у стенки с только что образовавшимся тонким слоем паров с низкой плотностью, что приводит к началу развития бифуркации. Фаза начала испарения стенки движется перед фронтом УВ со скоростью, превышающей скорость фронта, поскольку на больших расстояниях от диафрагмы стенка нагревалась излучением более длительное время, чем на начальном участке. Эта фазовая скорость в условиях плохой светопередачи по каналу в ультрафиолетовой области спектра ненамного превышает скорость УВ. Поэтому в большинстве случаев начальный участок бифуркации у стенки успевает следовать за начальной областью возникновения паров на стенке. Скорость движения пристеночных возмущений оказывается фазовой. При постепенном сокращении поверхности яркого недеформированного фронта УВ эта фазовая скорость должна падать и с некоторого момента стать равной скорости невозмущенного ударного фронта. Деформированная волна должна выйти на стационарный режим, что и наблюдалось в упомянутом выше эксперименте. Расстояние фазы испарения стенки от невозмущенного ударного фронта зависит от поглощательной способности стенки и ее теплопроводности. Для медной стенки она будет находиться ближе к фронту, чем для стальной, следовательно, произойдет меньшая деформация фронта в медных стенках.

При увеличении яркости волны или сечения канала начальная фаза испарения отодвигается от фронта, что и объясняет отмеченную выше большую деформацию фронта в данных случаях. Поэтому превышение скорости пристеночных возмущений относительно скорости невозмущенного ударного фронта заметно только на начальном этапе движения волны и для теории явления в ударных трубах есть факт второстепенный. В то же время практически во всех предыдущих работах эксперименты проводились с короткими каналами (менее десяти калибров) и измерению этого превышения скорости уделялось большое внимание.

Другой интересный вопрос в механизме формирования бифуркаций — роль толкающего газа (продукты взрыва [1, 9], буферный газ [2, 8]). При входе УВ в канал с инертным газом деформация флангов волны начинается

с задержкой в несколько микросекунд, когда слой ударно-сжатого ксенона или аргона еще мал. Очевидно, что в этих условиях в область за границей срыва потока (см. рис. 1) может проникнуть толкающий газ и заполнить ее при дальнейшем движении УВ по каналу. В таком случае имеет место эффект «нинчевания» рабочего газа вблизи оси канала и идеализированная схема (см. рис. 1) окажется малоприменимой.

Изложенные выше соображения и сомнения в правильности интерпретации предшествующих экспериментов в полной мере применимы и к работе [10], в которой схема бифуркации [3, 8] в упрощенном виде использована для исследования деформации фронта в разрушаемом взрывном канале, облицованном стеклами с напыленным слоем металла.

В заключение отметим, что обсуждаемое явление стало серьезной помехой на пути дальнейшего развития техники высокоэнтальпийных ударных труб и заслуживает дальнейшего изучения и обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shreffler R. G., Christian R. H. Boundary disturbances in high-explosive shock tubes // J. Appl. Phys.— 1954.— V. 25, N 3.
2. Савров С. Д., Агеев И. М. Лабораторная взрывная ударная труба // ТВТ.— 1980.— Т. 18, № 6.
3. Губкин К. Е. Распространение взрывных волн // Механика в СССР за 50 лет.— М.: Наука, 1970.— Т. 2.
4. Edmund J. Gion. Plane shock interacting with thermal layer // Phys. Fluids.— 1977.— V. 20, N 4.
5. Mirels H. Mach reflection flow fields associated with strong shocks // AIAA J.— 1985.— V. 23, N 4.
6. Артемьев В. И., Маркович И. Э. и др. Двумерное автомодельное движение сильной ударной волны над нагретой поверхностью // ДАН СССР.— 1987.— Т. 293, № 5.
7. Бергельсон В. И., Немчинов И. В. и др. Автомодельное развитие предвестника перед ударной волной, взаимодействующей с теплым слоем // ДАН СССР.— 1987.— Т. 296, № 3.
8. Савров С. Д. Исследование динамики возбуждения излучающих ударных волн // Механика быстротекучих процессов.— Новосибирск: ИГД, 1984.
9. Никулин М. А., Попов Е. Г. Излучательные свойства ударных волн в газах.— М.: Наука, 1977.
10. Киселев Ю. Н., Клунов В. А. и др. Исследование образования пристеночных возмущений при распространении ударных волн в трубах из различных материалов // ПМТФ.— 1986.— № 1.

г. Москва

Поступила 4/V 1988 г.

УДК 534.222.2+535.211

В. В. Зосимов, М. Ю. Кукушкин, К. А. Наугольных, О. В. Пученков

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЖИДКОСТЯМИ

В многочисленных экспериментальных и теоретических работах к настоящему времени рассмотрены различные аспекты взаимодействия интенсивного оптического излучения с сильно поглощающими жидкостями [1—7]. Традиционной экспериментальной методикой исследования этого взаимодействия является регистрация акустических возмущений, возникающих под действием оптического излучения в жидкости и в прилегающем к ней газе. Такая регистрация проводится датчиками давления различной конструкции [3, 6], а также с помощью оптических теневых методов [1, 2, 5]. Однако из-за отсутствия общепризнанной теоретической модели процесса взаимодействия интенсивного оптического излучения с сильно поглощающими жидкостями эксперименты, связанные с акустическими измерениями, не получают в работах разных авторов единой интерпретации [4, 6, 7]. Поэтому возникает необходимость в получении новых дополнительных данных о физике происходящих явлений.

В настоящей работе исследуются сопровождающие процесс взаимодействия гидродинамические возмущения границы раздела жидкость — газ. Временной масштаб развития этих возмущений значительно превосходит характерное время форми-