

УДК 533.6.011.72

© 1993 г. В. И. АРТЕМЬЕВ, В. И. БЕРГЕЛЬСОН, С. А. МЕДВЕДУК,
И. В. НЕМЧИНОВ, Т. И. ОРЛОВА, В. А. РЫБАКОВ, В. М. ХАЗИНС

ВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ТОНКИМИ КАНАЛАМИ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ И ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Теоретически и экспериментально исследуется динамика индуцированного тонкими каналами пониженной плотности вихревого течения в предвестниках, возникающих перед фронтами ударных волн в период распространения волн по каналу и после его окончания, вплоть до стадии восстановления невозмущенного течения. Обнаруженное удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных свидетельствует о приемлемости численного анализа процесса в рамках уравнений Эйлера.

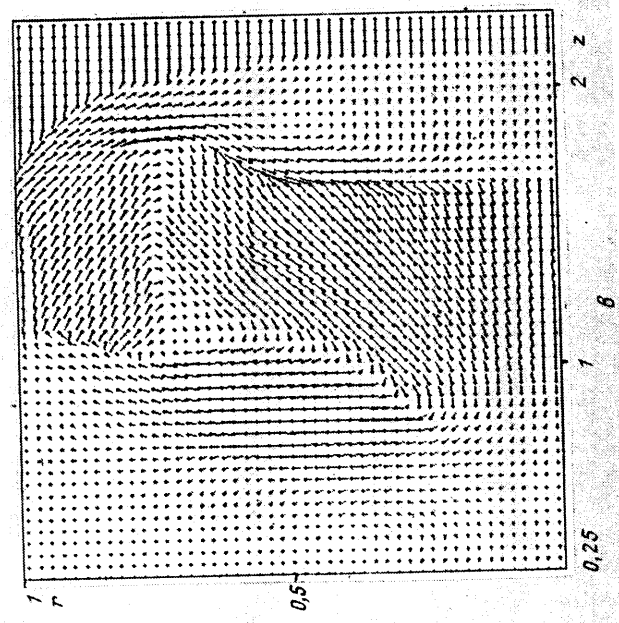
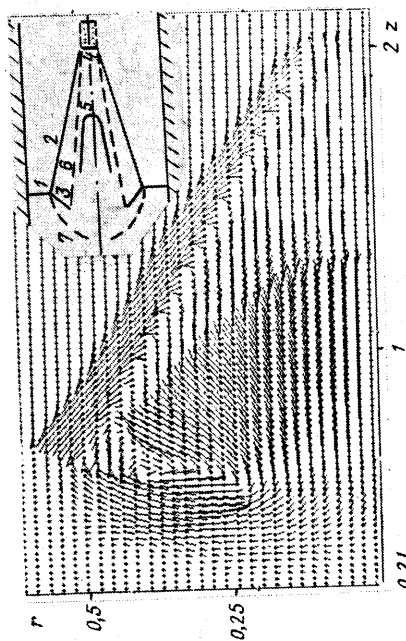
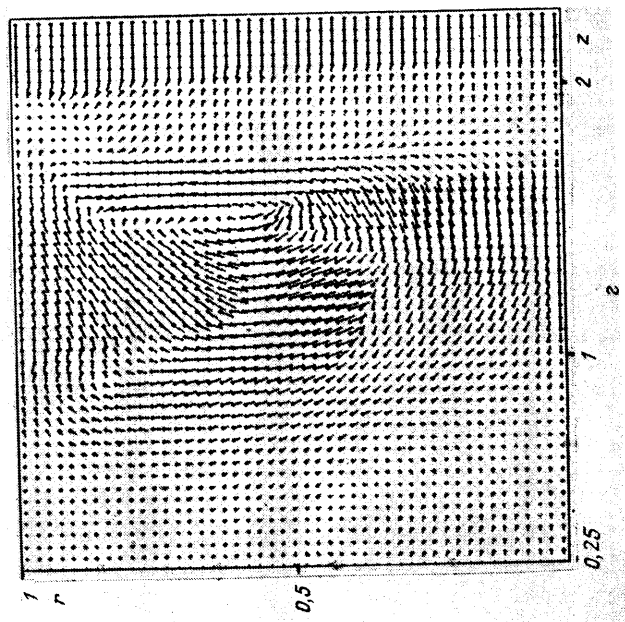
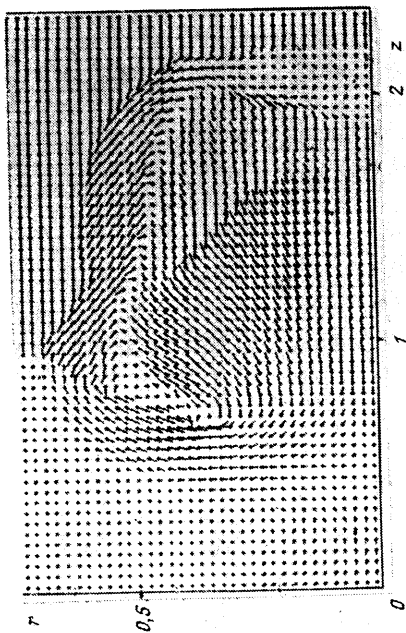
Взаимодействие ударной волны с тонким каналом пониженной плотности приводит к глобальной перестройке газодинамического течения. Перед ударным фронтом образуется крупномасштабное, непрерывно растущее коническое или клиновидное (в зависимости от геометрии канала — цилиндрической или плоской) возмущение — «предвестник». Проведенные исследования этого «эффекта теплого слоя» (см., например, [1, 2]) позволили получить качественную картину возмущенных течений и определить их количественные параметры.

Отличительная особенность таких течений — охватывающее весь объем предвестника интенсивное вихревое движение с сильным перемешиванием вещества. Индуцированный тонким разреженным каналом ограниченной длины вихрь должен сохраняться и в течение некоторого времени после прохождения ударной волной всей длины канала, вплоть до восстановления ударным фронтом своей первоначальной формы (при достаточной силе ударной волны).

Исследование динамики этого процесса проводится с помощью численных расчетов (аналогичных описанным в [1, 2]) задачи о стационарном поршне в цилиндрической трубе радиуса R_0 , заполненной идеальным невязким, нетеплопроводным газом плотности ρ_0 с показателем адиабаты γ . В момент времени $t = 0$ инициированная поршнем плоская ударная волна набегаёт на торец созданного на оси трубы цилиндрического газового объема — «канала» радиуса $r_0 \ll R_0$ и длины L_0 , с пониженной плотностью $\rho_c = \omega \rho_0$, $\omega < 1$. Газ в канале предполагается нагретым (по сравнению с «буферным» газом в трубе) в ω^{-1} раз, т. е. давление перед фронтом ударной волны выровнено.

В постановке, близкой к описанной, эффект экспериментально изучался на взрывных ударных трубах [3]. Нагретый и разреженный канал в буферном газе возникал «естественно» под действием теплового излучения, испущенного фронтом сильной ударной волны, на тонкую проволоку ограниченной длины, натянутую вдоль трубы. На приведенных в [3] кадровых фотографиях отчетливо видны стадии образования конического предвестника вдоль проволоочки и постепенного восстановления плоского ударного фронта после окончания проволоочки (отметим, что под действием теплового излучения предвестник одновременно распространялся и по стенкам трубы). Внутренняя структура течения экспериментальными методами [3] не могла быть выявлена, так как плазма была оптически непрозрачной.

Фигура 1 демонстрирует полученные в расчете одного из вариантов типичные



Фиг. 1

поля скоростей течения в различные моменты времени (в системе координат, связанной с поршнем). Начала векторов скорости отмечены точкой. Рассчитанный вариант соответствует числу Маха исходной невозмущенной ударной волны $M_0 = 32$ и величинам $\gamma = 1,4$, $\omega = 0,1$, $r_0/R_0 \sim 0,11$, $L_0/R_0 \sim 5,4$. Без введения дополнительных обозначений координаты r , z на рисунках нормированы на радиус трубы R_0 , времена — на величину R_0/U_0 , где U_0 — скорость поршня. В начальный момент времени невозмущенная ударная волна находится на расстоянии $z_0 \sim 0,11 R_0$ от поршня.

Время $t \sim 3,1$ на фиг. 1, а близко к моменту $t \sim 3,4$ выхода ударной волны 4 в вершине предвестника к концу канала, отмеченного точками на грубой схеме течения, приведенной в верхнем углу рисунка (при этом вершина предвестника располагается на расстоянии $z_p \sim 2 R_0$ от поршня). На рисунке видны характерные особенности течений с крупномасштабным предвестником: тройная ударная конфигурация — основная ударная волна 1, боковая ударная волна 2 предвестника и внутренняя ударная волна 3; еще одна внутренняя ударная волна 5, поверхность скольжения 6, а также циркуляционное движение газа в предвестнике, ограниченное поверхностью 7. При выбранных параметрах потока и размерах трубы и канала влияние стенок трубы еще не ощущается, а толщина канала уже «забывается» и предвестник развивается в автотельном режиме. При этом скорость распространения вершины предвестника по каналу в лабораторной системе координат составляет $D_p \sim 1,6 U_0$, а скорость основной ударной волны $D_0 \sim 1,2 U_0$.

После прохождения ударной волной 4 канала ($t \sim 4,3$) волна останавливается относительно поршня (фиг. 1, б). Предвестник деформируется и приобретает форму расширяющегося вбок цилиндра, от торца цилиндра внутрь предвестника распространяется «отраженная» ударная волна. Вихревой характер течения при этом сохраняется.

К моменту $t \sim 5,1$ боковая ударная волна предвестника доходит до стенки трубы и ударяется об нее. Поле скоростей в следующий за ударом момент $t = 5,5$ демонстрируется на фиг. 1, в. Передний фронт неподвижной относительно поршня ударной волны заметно вогнут лишь в области, прилегающей к стенке, «след» основной ударной волны и тройной конфигурации оказываются в возмущенном потоке и постепенно разрушаются, а зона кумуляции вблизи оси еще сохраняется. Неразрушенным оказывается и крупномасштабный вихрь, занимающий почти $2/3$ объема газа перед поршнем.

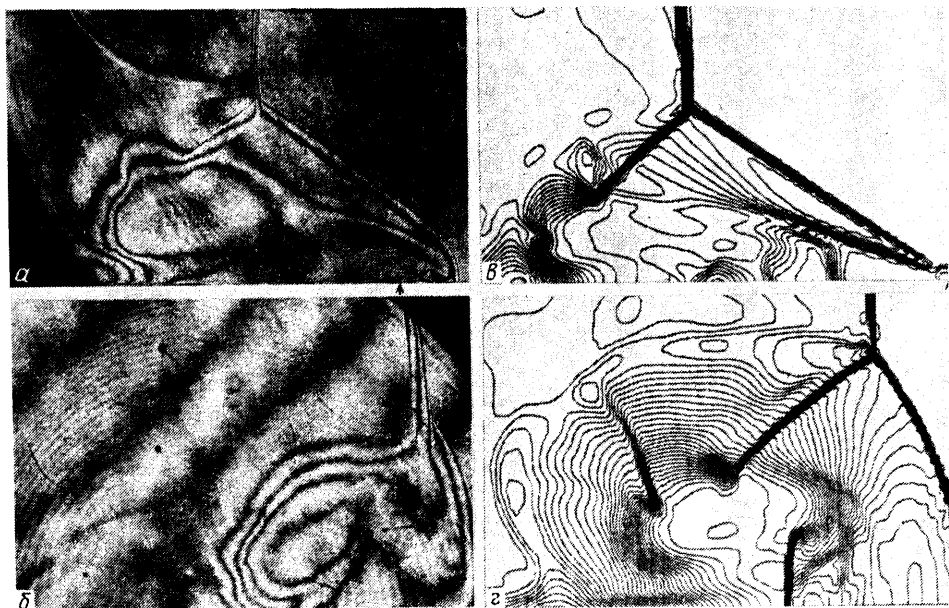
На фиг. 1, г в момент времени $t \sim 6,4$ передний ударный фронт уже почти плоский и еще неподвижный относительно поршня. Течение за фронтом по-прежнему сильно возмущено, вихрь занимает все сечение трубы и скорости газа в нем даже превосходят скорость поршня.

Сразу же после этого момента возобновляется движение переднего фронта относительно поршня, волновые процессы и вихрь за фронтом постепенно затухают, однако скорость фронта примерно сравнивается с невозмущенной величиной D_0 лишь значительно позднее — к моментам времени $t \sim 10-15$, когда ударная волна уходит от поршня на расстояния $z_p \sim (3-4)R_0$ (слабая неоднородность газодинамических параметров за фронтом сохраняется и на этих временах).

Таким образом, время восстановления невозмущенного течения в этом случае не менее чем вдвое превосходит время действия возмущения, а расстояние в лабораторной системе координат, на котором восстанавливается невозмущенный плоский ударный фронт после окончания разреженного канала, в 2—3 раза превышает длину канала.

При расчете аналогичного варианта с меньшим разрежением в канале $\omega = 1/3$ относительные времена и расстояния восстановления невозмущенного течения снижаются примерно на 30—40% по сравнению с предыдущим случаем.

Описанный эффект исследовался также экспериментально с использованием ударной трубы диафрагменного типа, заполненной CO_2 при давлении 100 тор.



Фиг. 2

Часть нижней стенки трубы прямоугольного сечения нагревалась электрическим импульсом, в результате чего около нее возникал теплый слой (плоский канал) толщины $\Delta \sim 1$ мм и длины $L_0 \sim 40$ мм с характерной относительной плотностью $\omega \sim 0,25$. В трубе генерировалась ударная волна с числом $M_0 \sim 2,5$. На фиг. 2, а, б приведены интерферограммы течения в два момента времени. Фигура 2, а соответствует моменту, близкому ко времени выхода предвестника за границу теплового слоя (отмеченную стрелкой), когда еще не успевает разрушиться сложившаяся при взаимодействии ударной волны с каналом автомодельная конфигурация (в верхней части этого рисунка также видна «технологическая» пластина с острой передней кромкой и присоединенная ударная волна, начинающаяся на острие и незначительно искажающая течение за основной ударной волной). На фиг. 2, б показано течение в более поздний момент времени. Хотя плоский фронт ударной волны уже слабо возмущен, на кадре отчетливо виден «след» неразрушенного крупномасштабного вихря за ударной волной.

Аналогичные экспериментальным зависимостям поля изохор, полученные в расчете, моделирующем эксперимент (в близкие к экспериментальным моменты времени), представлены на фиг. 2, в, г (масштабы на фиг. 2, в, г различны). Видно неплохое совпадение расчетных и экспериментальных результатов, свидетельствующее о приемлемости численного анализа возмущенных течений данного типа в рамках уравнений Эйлера.

Отметим, что аналогичные вихревые течения возникают и в процессе сверхзвукового обтекания затупленного тела при наличии перед телом тонкого разреженного канала конечной длины (см. [4]) или более крупномасштабной нагретой области, создаваемой с помощью теплового источника (см. [5]).

Если перед ударной волной создан не один канал пониженной плотности, а целая система таких каналов, расположенных на некотором фиксированном расстоянии друг от друга, то картина взаимодействия будет близка к исследованной здесь теоретически и экспериментально, когда теплый «шнур» или теплый слой конечной длины находятся внутри цилиндрической или плоской трубы. Система же каналов пониженной плотности, ориентированных в общем случае произвольно по отношению к ударному фронту и имеющих различную длину, должна приводить

к мощной турбулизации зафронтного течения и появлению в нем диссипирующих вихрей всевозможных размеров. При ограниченном источнике энергии, инициирующем ударную волну, индуцированная тонкими каналами турбулизация среды может приводить к полному «развалу» плоской волновой структуры и изменять закон затухания волнового фронта. Указанная выше система тонких каналов пониженной плотности в газе может быть создана в результате электрических или оптических пробоев («искры»).

Аналогичные эффекты для ударных волн достаточной интенсивности должны наблюдаться и в конденсированных средах, где численные расчеты также обнаруживают существование режимов течения с крупномасштабными предвестниками (см., например, [6]). При этом каналы пониженной плотности могут представлять собой систему разрезов, трещин или пор в конденсированном веществе, а также «следы» электрических или оптических пробоев. В отличие от турбулизации газовой среды, возникающей при взаимодействии ударной волны со сферическими образованиями пониженной плотности (см., например, [7, 8]), или аналогичных явлений в воде или другой жидкости с пузырьками воздуха, имеющими первоначальную форму, близкую к сферической, при взаимодействии ударной волны с разреженными каналами пренебрежимо малого диаметра характерный размер индуцированных вихрей оказывается порядка расстояния h между каналами («искрами») либо порядка длины канала l , если $l < h$. Суммарный объем квазисферических пузырьков с такими же характерными размерами будет значительно превышать суммарный объем каналов, т. е. искусственное инициирование эквивалентных возмущений в среде в последнем случае требует значительно более низких затрат энергии.

Предсказываемый эффект индуцированной турбулизации зафронтного течения и развала фронта ударной волны, с нашей точки зрения, может иметь место при высокоскоростном ударе крупных метеорных тел по поверхности Земли (или других планет) с естественными трещинами и разломами, играющими роль каналов пониженной плотности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьев В. И., Бергельсон В. И., Калмыков А. А. и др. Развитие предвестника при взаимодействии ударной волны со слоем пониженной плотности//Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 2. С. 158—163.
2. Артемьев В. И., Бергельсон В. И., Калмыков А. А. и др. Формирование новых структур газодинамических течений при возмущении плотности в тонких протяженных каналах перед фронтом ударной волны//Матем. моделирование. 1989. Т. 1. № 89. С. 1—11.
3. Shreffler R. G., Christian R. H. Boundary disturbances in high explosive shock tubes//J. Appl. Phys. 1954. V. 25. № 3. P. 324—331.
4. Артемьев В. И., Бергельсон В. И., Немчинов И. В. и др. Изменение режима сверхзвукового обтекания препятствия при возникновении перед ним тонкого разреженного канала//Изв. АН СССР. МЖГ. 1989. № 5. С. 146—151.
5. Георгиевский П. Ю., Левин В. А. Сверхзвуковое обтекание тел при наличии внешних источников тепловыделения//Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 8. С. 684—687.
6. Бергельсон В. И., Немчинов И. В., Орлова Т. И., Хазинс В. М. Влияние дискретности геофизической среды на движение вещества при высокоскоростном ударе по поверхности Земли//Докл. АН СССР. 1991. Т. 316. № 1. С. 77—79.
7. Андрущенко В. А., Горбунов А. А., Кестенбойм Х. С., Чудов Л. А. Численное исследование пространственного взаимодействия двух крупномасштабных термиком//Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 4. С. 53—59.
8. Андрущенко В. А., Ефимов С. Ю., Чудов Л. А. Встречное столкновение двух сферических ударных волн. Взаимодействие лазерных искр в газе//Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 5. С. 133—137.