

дорасширенной струи газа, истекающей из канала, с прилегающей поверхностью.— Тр. МФТИ, 1974.

10. Вознесенский Э. Н., Немченко В. И., Самсонов П. А. Некоторые особенности воздействия струи газа с сильным недорасширением на плоскую стенку.— Тр. МФТИ, 1975.

Поступила 28/II 1984 г.

УДК 532.517.4 + 532.593

О ТУРБУЛЕНТНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ТОЛКАЕМОГО И ТОЛКАЮЩЕГО ГАЗОВ В КАНАЛЕ УДАРНОЙ ТРУБЫ

Р. В. ВАСИЛЬЕВА, А. Д. ЗУЕВ, В. Л. МОШКОВ,
Л. Г. ТХОРИК, В. А. ШИПГАРКИНА

(Ленинград)

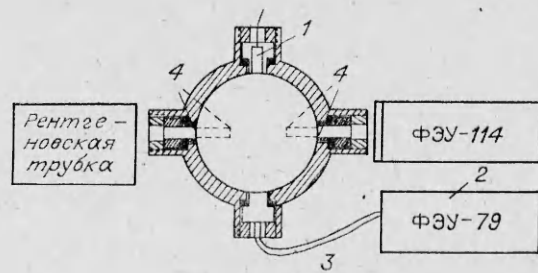
Явление турбулентного перемешивания газов на контактных поверхностях встречается во многих газодинамических задачах и устройствах, например в ударных [1—3] и электроразрядных [4] трубах, при цилиндрическом и сферическом взрыве [5]. Развитие турбулентного перемешивания в них в основном обусловлено неустойчивостью Рэлея — Тейлора. Теория турбулентного перемешивания вследствие развития релей-тейлоровской неустойчивости для изотермического случая изложена в [6], в [7] эта теория распространена на неизотермический случай.

В отличие от других устройств в ударной трубе существует начальная турбулентность, возникшая при разрыве диафрагмы. Процессу разрыва диафрагмы и формированию ударной волны посвящен ряд работ [8—13]. Однако вопросы формирования контактной области в процессе ее движения вдали от диафрагмы и ее влияние на параметры ударно-сжатого газа остаются невыясненными. Эта задача сложна физически и требует применения специальных методов измерения концентрации частиц, так как хорошо разработанные интерферометрические методы не могут быть использованы в турбулизированных потоках и, кроме того, они не могут выделить отдельные компоненты в смеси толкающего и толкаемого газов. Оптические методы исследований позволили только установить, что за горячей пробкой ударно-сжатого газа следует область турбулентного потока. Поэтому в практику ударных труб вместо понятия контактная поверхность было введено понятие контактная область. Вопрос об устойчивости границ этой области до сих пор не рассматривался, и перемешивание толкаемого и толкающего газов в этой области в литературе практически не обсуждалось. Впервые длина зоны перемешивания толкаемого и толкающего газов в ударной трубе на фиксированном расстоянии от диафрагмы была определена в [14] по поглощению инфракрасного излучения в молекулах CO_2 , а распределение средней плотности толкаемого газа в области перемешивания было получено в [15] по поглощению мягкого рентгеновского излучения, когда в качестве толкаемого газа использовался тяжелый инертный газ, а в качестве толкающего — легкий газ. Однако динамика процесса в этой работе не была изучена.

Данная работа направлена на исследование развития турбулентной зоны перемешивания по мере ее движения вдоль ударной трубы вдали от диафрагмы.

Эксперименты проводились в обычной диафрагменной ударной трубе. Использовались алюминиевые диафрагмы, раскрывающиеся под действием давления двумя способами: без ножа и с крестообразным ножом. Толщина диафрагм 0,45 и 0,35 мм. Внутренний диаметр канала низкого давления 50 мм, длина 5 м. Длина камеры высокого давления 1 м. В качестве толкаемого газа использовался ксенон в диапазоне начальных давлений 0,67—13,3 кПа.

На фиг. 1 показаны измерительное сечение и схема измерений. Давление за фронтом ударной волны и скорость фронта ударной волны измерялись пьезодатчиками 1. Производилась регистрация собственного свечения газа, нагретого ударной волной, фотоумножителем 2; 3 — световод. Плотность газа измерялась по поглощению мягкого рентгеновского излучения [15]. В основной части экспериментов все датчики и окна были заделаны заподлицо со стенками трубы. Для измерения плотности в ядре потока



Фиг. 1.

были сделаны специальные вставки, имеющие в поперечном сечении обтекаемую форму и выступающую в поток на 1 см. Толщина вставок в середине 5 мм, диаметр внутреннего смотрового отверстия 2 мм, на торец вакуумно наклеен бериллий, используемый в качестве окон 4 для рентгеновских лучей. Положение вставок показано штриховыми линиями. Измерения проводились в трех сечениях ударной трубы на 15, 50 и

92 калibraх от диафрагмы. Источником рентгеновского излучения служила нестандартная трубка с напряжением 11,5 кВ. Приемником рентгеновских лучей служил фотоумножитель ФЭУ-114 со сцинтиллятором NaJ. В эксперименте регистрировалась интенсивность падающего рентгеновского излучения I_0 и прошедшего через поглощающий слой I . Для монохроматического рентгеновского излучения

$$I/I_0 = \exp\left(-\mu \int_0^h \rho(y) dy\right).$$

Луч направлен по оси y поперек ударной трубы; h — толщина поглощающего слоя; $\rho(y)$ — распределение плотности; μ — коэффициент поглощения, сильно зависящий от порядкового номера элемента z ($\mu \sim z^3$); μ определяется в процессе градуировки измерительной системы. Градуировка системы производилась при статическом заполнении канала низкого давления исследуемым газом. Таким образом, из отношения I/I_0 в эксперименте непосредственно определяется суммарная масса газа, заключенная в поглощающем слое, ограниченном диаметром пучка 2 мм. При однородном распределении плотности поперек трубы отсюда может быть получена действительная плотность газа, при неоднородном распределении поток можно характеризовать средней плотностью

$\langle \rho \rangle = \frac{1}{h} \int_0^h \rho(y) dy$. Сильная зависимость коэффициента поглощения рентгенов-

ских лучей от порядкового номера элемента позволяет надежно разделять области с толкаемым и толкающим газами. С этой целью использовались следующие пары толкаемого и толкающего газов: 1) ксенон — гелий (поглощение обусловлено Xe, поглощение в толкающем газе отсутствует); 2) воздух — смесь (98,8% $N_2 + 1,2\%$ Xe) (поглощение обусловлено компонентом Xe в толкающем газе, поглощение в воздухе пренебрежимо мало); 3) ксенон — смесь (98,8% $N_2 + 1,2\%$ Xe) (поглощение в толкаемом и толкающем газах обусловлено Xe).

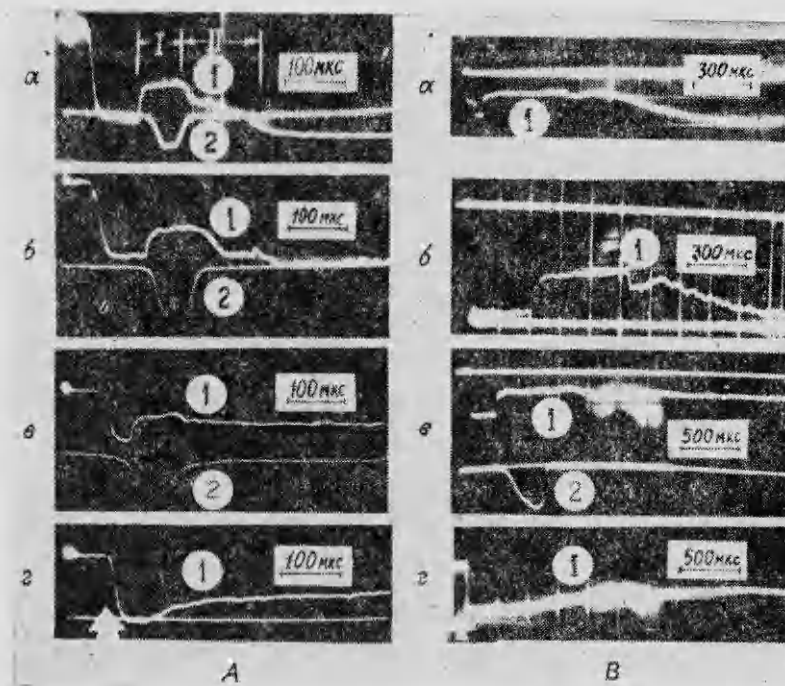
Используемая методика проведения эксперимента позволила получить распределение как толкаемого, так и толкающего газов в турбулентной контактной области, оценить степень однородности этой области поперек ударной трубы и проследить развитие турбулентной контактной области по мере ее движения вдоль ударной трубы.

Набор осциллограмм на фиг. 2 иллюстрирует основные особенности эксперимента. Здесь представлены рентгеновские сигналы I и сигналы собственного излучения пробки ударно-сжатого газа 2 в сечениях $X = 15d$ (A) и $X = 92d$ (B) при различных режимах и условиях проведения эксперимента: a — Xe — He, $p_0 = 1,7$ кПа, $M_0 = 9$, без вставок; b — Xe — He, $p_0 = 1,7$ кПа, $M_0 = 9$, со вставками; c — Xe — смесь ($N_2 + Xe$), $p_0 = 1,7$ кПа, $M_0 = 9$, без вставок; d — воздух — смесь ($N_2 + Xe$), $p_0 = 1,7$ кПа, $M_0 = 5$, без вставок; стрелки указывают положение фронта ударной волны. До прихода ударной волны наблюдается рентгеновский сигнал отрицательной полярности, ослабленный по сравнению с сигналом в вакууме на величину поглощения ксенона в канале низкого давления. Приход ударной волны характеризуется резким изменением рентгеновского сигнала, соответствующим возрастанию плотности на фронте ударной волны. Одновременно появляется собственное свечение плазмы. Далее величина поглощения рентгеновского сигнала определяется распределением плотности в пробке ударно-сжатого газа (область 1, фиг. 2, A — a). Концу горячей пробки соответствует возрастание рентгеновского сигнала (фиг. 2, a, б) и прекращение свечения плазмы. Далее следует область контактного перемешивания (область 2, фиг. 2, A — a), длина которой сравнима с длиной горячей пробки. Если в качестве толкающего газа используется гелий, то после контактной области рентгеновский сигнал приближается к сигналу поглощения в вакууме I_0 . При использовании в качестве толкающего газа смеси $N_2 + Xe$ поглощение в толкающем газе, обусловленное компонентом Xe, близко к поглощению в пробке ударно-сжатого газа (фиг. 2, в). Распределение толкающего газа в контактной области легко интерпретировать, если в качестве толкаемого газа использовать такой слабо поглощающий рентгеновские лучи газ, как, например, воздух (фиг. 2, г). Из фиг. 2, г видно, что область проникновения толкающего газа в толкаемый увеличивается по мере движения вдоль трубы.

На фиг. 3 показаны полученные из обработки осциллограмм распределения средней плотности толкаемого газа 1 и плотности в ядре потока 2 на различных расстояниях от диафрагмы: a — $X = 15d$, b — $X = 92d$. Штрихпунктирными линиями отмечены передняя и задняя границы контактной области перемешивания. При переходе от

временных интервалов, регистрируемых в эксперименте, к пространственным $\left(x = \int_0^t u_{\text{сп}} dt\right)$ требуется знание скорости спутного потока $u_{\text{сп}}$ в измерительном сечении.

Измерения скорости потока в пробке ударно-сжатого газа, выполненные в [16, 17], показали, что в реальной ударной трубе в фиксированном сечении скорость спутного потока увеличивается вдоль пробки. Скорость фронта ударной волны также меняется, однако, как показали измерения, при переходе от $X = 50d$ к $X = 92d$ скорость фронта



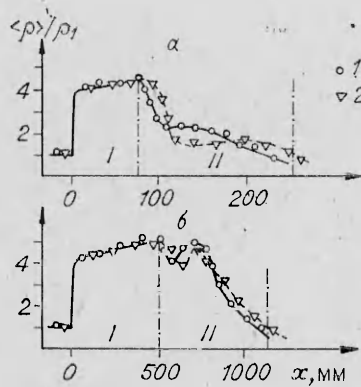
Фиг. 2.

упала не более чем на 2%. Следовательно, можно полагать, что скорость фронта $u_s = \text{const}$. Тогда в первом приближении, пренебрегая расходом газа через пограничный слой, возрастание скорости слутного потока можно оценить из условия $\langle \rho \rangle (u_s - u_{сп}) = \text{const}$, где $\langle \rho \rangle$, u_s — экспериментально определенные величины. Скорость в области контактного перемешивания и в области толкающего газа полагалась равной скорости толкаемого газа у передней границы контактной области. Как следует из проведенных оценок, ошибка в определении пространственной координаты не превышает 10%.

На фиг. 3 цифрой I обозначена ударно-сжатая пробка, II — область контактного перемешивания. Конец пробки и начало области перемешивания определялись по окончании собственного свечения толкаемого газа и по резкому изменению производной $\partial \langle \rho \rangle / \partial x$. Предполагалось, что конец зоны перемешивания находится там, где рентгеновский сигнал восстанавливался до 0,9 от величины сигнала в вакууме. За сигнал в вакууме I_0 можно принять рентгеновский сигнал в области толкающего газа — гелия.

Представление о степени однородности потока поперек трубы может быть получено из сопоставлений измерений плотности, сделанных с помощью вставок ($h = 3$ см) и без них ($h = 5$ см). Влияние вставок на результаты измерений в ядре потока оценивается из анализа измерений плотности в пробке ударно-сжатого газа, где распределение плотности поперек пробки сравнительно однородно. Возрастание вдоль пробки обусловлено затратами энергии на ионизацию, радиационным охлаждением, влиянием пограничного слоя и потерями тепла на счет электронной теплопроводности [3]. Из фиг. 3 видно, что в пробке ударно-сжатого газа значения плотности, измеренные со вставками и без них, близки друг другу. Это свидетельствует о том, что вставки не вносят существенных возмущений в поток, протекающий между ними.

По мере распространения по каналу область турбулентного перемешивания не только увеличивается, но в ней, как это видно из фиг. 3, происходит изменение в распределении плотности толкаемого газа. На расстоянии $15d$ от диафрагмы отмечается заметный спад плотности толкаемого газа у границы между горячей пробкой и контактной областью. В начале и в конце зоны перемешивания средняя плотность, измеренная при наличии вставок, больше, чем средняя плотность, измеренная без них. Это говорит о том, что на краях зоны перемешивания средняя плотность толкаемого газа в ядре потока несколько больше, чем у стенок. В сечении B ($X = 92d$) плотность толкаемого газа у передней границы контактной области сравнима с плотностью в конце горячей пробки, кроме того, значения $\langle \rho \rangle$, измеренные при двух различных значениях h , мало отличаются друг от друга. Отсюда можно сделать вывод о сравнительно однородном распределении плотности толкаемого газа поперек трубы в начале зоны перемешивания и о некотором увеличении неоднородности к концу зоны. Ввиду того что при уменьшении h флуктуации плотности заметно не возросли, размер неоднородностей в поперечном сечении, вероятно, в несколько раз меньше h , т. е. не превосходит 1 см. Таким образом, по мере распространения ударной волны уменьшается спад плот-



Фиг. 3.

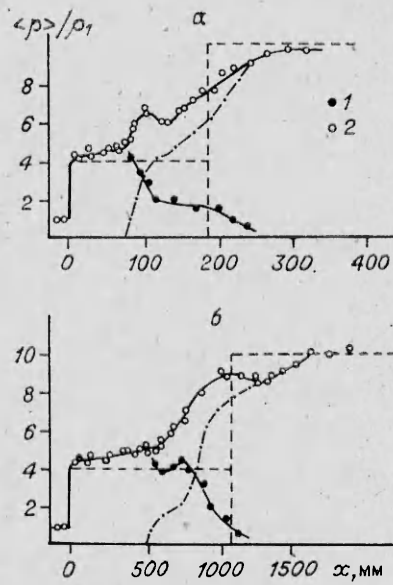
пости у передней границы контактной области, а сама граница становится более плоской. Задняя граница области перемешивания сохраняет вышуклую форму. Средняя плотность толкаемого газа вдоль области перемешивания меняется немонотонно.

Распределение плотности толкающего газа было получено из экспериментов, в которых камера высокого давления заполнялась не гелием, а смесью 98,8% $N_2 + 1,2\%$ Xe, имеющей скорость звука, близкую к скорости звука в гелии; при этом распределение плотности толкаемого газа считалось известным из предыдущей серии опытов. На фиг. 4 представлено распределение средней плотности толкаемого 1 и толкающего (штрихпунктирная кривая) газов и суммарной плотности 2 в горячей пробке, в контактной области перемешивания газов и в потоке толкающего газа за областью перемешивания. Давление во всей рассматриваемой зоне потока, как показали измерения, постоянно. Наиболее сильные изменения плотности толкаемого и толкающего газов наблюдаются у передней границы области перемешивания, это должно сопровождаться резким падением температуры. Следует обратить внимание на немонотонное распределение суммарной плотности в области перемешивания. Штриховой линией на фиг. 4 показано распределение плотности толкающего газа в идеальной пробке. Видно, как сильно она сокращается за счет турбулентного перемешивания газов. Расчет выполнен для числа Маха $M_0 = 9$.

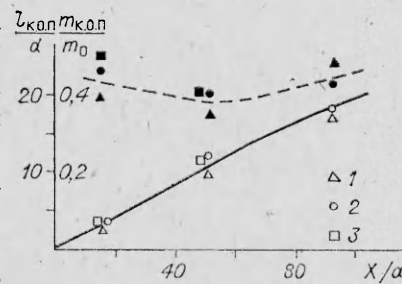
Отношение массы газа в контактной области перемешивания к массе идеальной пробки $m_{к.о.п}/m_0 = \int_{II} \langle \rho \rangle dx / \rho_0 X$ (ρ_0 — начальная плотность, X — расстояние от диа-

фрагмы до измерительного сечения) в трех сечениях ударной трубы (темные точки), а также увеличение длины контактной области (светлые точки) по мере ее движения вдоль ударной трубы для различных режимов представлены на фиг. 5: 1 — $p_0 = 5,5$ кПа, $M_0 = 10$; 2 — $p_0 = 1,7$ кПа, $M_0 = 9$; 3 — $p_0 = 13,3$ кПа, $M_0 = 6$. В контактной области находится от 35 до 50% массы идеальной пробки. Длина турбулентной контактной области растет примерно пропорционально пройденному расстоянию. Рост контактной области, как это следует из фиг. 5, слабо зависит от условий эксперимента. Увеличение области перемешивания газов свидетельствует о неустойчивости передней границы контактной области. Ударная волна по мере своего движения сжимает и увлекает в пробку ударно-сжатого газа все новые слои, а в результате турбулентного перемешивания на границе с контактной областью часть газа переходит в область перемешивания, что и приводит к ее возрастанию. Следует отметить, что в ядро области мог продиффундировать газ, который выносится из горячей пробки через пограничный слой. Теория Майрлса [18] позволяет оценить расход газа через пограничный слой. Чтобы определить точность этой теории, нами был поставлен специальный эксперимент [19]. Очевидно, что теория Майрлса дает завышенную (максимальную) оценку роли пограничного слоя. Для определения доли газа, поступающего в контактную область перемешивания из пограничного слоя, требуется проводить дальнейшее исследование. В данной работе выявлен сам факт турбулентного перемешивания толкаемого и толкающего газов.

Из экспериментальных данных можно оценить основные характеристики турбулентного потока в зоне перемешивания. При режиме $p_0 = 1,7$ кПа, $M_0 = 9$ расчетная скорость потока за фронтом ударной волны $u_{ср} = 1,2 \cdot 10^5$ см/с. Полагая для оценок скорость распространения кон-



Фиг. 4.



Фиг. 5.

тактной области постоянной и равной скорости спутного потока, определим скорость расширения v_p турбулентной зоны. В сечении $X = 4,6$ м длина зоны перемешивания $l_{\text{к.о.п}} = 90$ см, тогда $v_p = \frac{l_{\text{к.о.п}}}{t_{\text{смеш}}} = 2,4 \cdot 10^4$ см/с. Пульсационная скорость v' обычно сравнима со скоростью расширения и, очевидно, в несколько раз меньше скорости потока ($v' = (2-3) \cdot 10^4$ см/с). В данном эксперименте недостаточно сведений, чтобы определить длину пути смешения. Для ее оценки можно воспользоваться рекомендациями [6]: $l_{\text{смеш}} \approx 0,1 l_{\text{к.о.п}} \approx 9$ см. Коэффициент турбулентной диффузии определяется как $D_T \approx v' l_{\text{смеш}} \approx 2 \cdot 10^5$ см²/с, он на порядок превышает коэффициент молекулярной диффузии. Так как скорость расширения турбулентной зоны практически постоянна, то отсюда может быть сделан вывод, что коэффициент турбулентной диффузии со временем увеличивается.

Для установления причин, вызывающих увеличение длины зоны перемешивания и увеличения массы толкаемого газа, вовлеченной в эту зону, в первую очередь надо выяснить, является ли это прямым следствием начальных возмущений, возникающих при разрыве диафрагмы, или вдали от диафрагмы существуют факторы, приводящие к неустойчивости контактной поверхности и турбулизации потока вследствие этого. Начальная турбулентность создается при разрыве диафрагмы и истечении струи толкаемого газа через раскрывающуюся диафрагму. Кроме того, как показано в [10], в области диафрагмы генерируется серия ударных волн. Опираясь на результаты [20] по взаимодействию ударных волн с турбулентной контактной областью, можно предположить, что эти ударные волны усилят турбулентное перемешивание газов. Очевидно, что все эти факторы действуют до тех пор, пока не закончился процесс раскрытия диафрагмы. Как следует из результатов [21], используемые в данном эксперименте диафрагмы раскрываются за время около 300 мкс. Таким образом, в первое измерительное сечение контактная область приходит уже после того, как закончилось раскрытие диафрагмы, а время прихода в последнее измерительное сечение в 15 раз больше, чем время раскрытия диафрагмы. Насколько быстро вырождается начальная турбулентность, можно представить на примере вырождения турбулентности, вызванной ускорением границы раздела после того, как ускорение прекратилось. Такая задача теоретически рассматривалась в [6]. Оказывается, что, если время после выключения ускорения в 2—4 раза больше времени действия ускорения, турбулентная зона продолжает увеличиваться со временем как $l \sim t^{1/2}$, если время после ускорения на порядок больше, то $l \sim t^{1/4}$. В эксперименте $l \sim t$, следовательно, наблюдаемое увеличение длины области перемешивания происходит скорее всего не вследствие инерции начальной турбулентности, а в результате подключения каких-то дополнительных механизмов.

В реальной ударной трубе скорость потока в конце пробки ударно-сжатого газа на границе с контактной областью может меняться при движении его вдоль ударной трубы. Имеющиеся сведения о замедлении фронта ударной волны при движении по каналу и об увеличении со временем скорости спутного потока в фиксированном сечении трубы не позволяют сделать однозначного заключения об изменении со временем скорости газа на границе. Есть данные по скорости распространения передней границы турбулентной области, полученные с помощью временных разверток теневых изображений на различных расстояниях от диафрагмы [1]. К концу трубы эта скорость увеличивалась на 30—40%, что интерпретировалось как ускорение потока в конце пробки ударно-сжатого газа, равное ускорению фронта контактной области. Однако очевидно, что эта скорость складывается из скорости распространения потока газа и скорости распространения по газу передней границы области перемешивания, так что результаты этой и других аналогичных работ не могут дать сведений о скорости потока на границе раздела. Таким образом, вопрос об ускорении газа на границе с контактной областью остается открытым. Если это ускорение противоположно градиенту плотности, то на границе раздела развивается рэлей-тейлоровская неустойчивость. Как показал эксперимент, плотность газа в контактной области меняется немонотонно. В центре области $\partial \langle \rho \rangle / \partial x < 0$, при ускорении потока здесь есть условия для развития неустойчивости. Вблизи передней границы области, где $\partial \langle \rho \rangle / \partial x > 0$, неустойчивость могла бы развиваться в случае замедления потока. Из анализа всей совокупности представлений о работе ударной трубы [1, 17] можно сделать вывод о том, что вдали от диафрагмы нет заметного замедления (2% на 1 м длины камеры низкого давления), а возможное ускорение не превышает 10% на 1 м длины канала низкого давления. Полезно оценить, какой могла бы быть длина турбулентной области в простейшем случае, если предположить, что начальные границы раздела плотностей плоские, поток невозмущенный, ускорение потока равно этим гипотетическим ускорениям. Для приближенного расчета можно воспользоваться изотермическим приближением [6]. Оценим длину турбулентной области при развитии рэлей-тейлоровской неустойчивости в двух случаях: при замедлении потока (неустойчивость развивается на передней границе контактной области); при ускорении потока (неустойчивость может развиваться в средней контактной области). Оказывается, что в обоих вариантах расчетная длина турбулентной области в последнем измерительном сечении не превышает 2 см, т. е. значительно меньше, чем наблюдаемая экспериментально. Это позволяет предположить, что если границы раздела газов изначально турбулизированы, то дальнейшая турбулизация при ускорении потока происходит быстрее, чем в случае начально не возмущенной границы.

Развитие турбулентной области существенно влияет на характеристики пробки ударно-сжатого газа. Оно приводит к сокращению горячей пробки [3, 15] и может влиять на результаты измерений, приводя к их разбросу в условиях, когда длина горячей пробки сравнима с калибром трубы или когда измерения проводятся в конце пробки. В [22] представлен материал по излучательной способности аргона, измеренной в различных ударных трубах, и дан содержательный анализ причин, приводящих к наблюдаемому разбросу экспериментальных данных. Очевидно, в число причин следует добавить и вышеприведенную. Кроме того, неустойчивость передней границы турбулентной области может приводить к возбуждению колебаний в горячей пробке.

В результате работы показано, что образованная при разрыве диафрагмы зона турбулентного перемешивания вдали от диафрагмы увеличивается по мере распространения вдоль канала. В зоне перемешивания измерены плотности толкаемого и толкающего газов, при этом обнаружено немонотонное распределение плотности вдоль зоны перемешивания. Оценена скорость расширения турбулентной области. Обсуждены возможные механизмы, приводящие к увеличению длины турбулентной зоны и массы толкаемого газа, вовлеченной в нее. Продемонстрировано, что полученные новые данные о работе ударной трубы позволяют более правильно интерпретировать результаты экспериментов на ударных трубах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ударные трубы/Под ред. Х. А. Рахматуллина, С. С. Семенова. М.: ИЛ, 1962.
2. Ступоченко Е. В., Лосев С. А., Осипов А. И. Релаксационные процессы в ударных волнах. М.: Наука, 1965.
3. Васильева Р. В., Зуев А. Д., Миришанов Д. Н. О распределении толкаемого газа в ударной трубе и структуре пробки за сильными ударными волнами.— ЖЭТФ, 1979, т. 49, № 2.
4. Levine M. A. Turbulent mixing at contact surface in a driven shock wave.— Phys. Fluids, 1970, vol. 13, N 5.
5. Давыдов А. Н., Лебедев Е. Ф., Перков С. А. Экспериментальное исследование газодинамической неустойчивости в потоке плазмы за цилиндрической ударной волной. Препринт ИВТАН 1246, 1979.
6. Беленький С. З., Фрадкин Е. С. Теория турбулентного перемешивания.— Тр. ФИАН, 1965, т. 29, с. 207.
7. Неуважаев В. Е., Яковлев В. Г. Турбулентное перемешивание границы раздела в численном газодинамическом расчете.— ЖВММФ, 1976, т. 16, № 2.
8. White D. R. Influence of diaphragm opening time on shock flows.— J. Fluid Mech., 1958, vol. 4, N 6.
9. Киреев В. Т. О движении ударной волны при не мгновенном раскрытии диафрагмы в ударной трубе.— Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение, 1962, т. 7, № 2.
10. Штеменко Л. С. Течение газа вблизи диафрагмы в ударной трубе.— Вестн. МГУ. Физика и астрономия, 1967, № 1.
11. Штеменко Л. С. Возникновение скачка уплотнения в начальный период течения газа вблизи диафрагмы в ударной трубе.— Вестн. МГУ. Физика и астрономия, 1968, № 3.
12. Ikui T., Matsuo K., Nagai N. Investigation of the aerodynamic characteristics of the shock tubes.— Bull. JSME, 1969, vol. 12, N 52.
13. Наумов А. М., Тугазаков Р. Я. Расчет течения в ударной трубе вблизи раскрывающейся диафрагмы.— Учен. зап. ЦАГИ, 1976, т. 7, № 2.
14. Hooker W. Testing time and contact-zone phenomena in shock tube flow.— Phys. Fluids, 1961, vol. 4, N 12.
15. Зуев А. Д., Миришанов Д. Н. Применение рентгеновской диагностики для изучения пробки ударно-сжатого газа и области контактного перемешивания.— ТВТ, 1981, т. 19, № 5.
16. Васильева Р. В. Измерение скорости слутного потока газа в ударной трубе по индуцированной э. д. с.— ПМТФ, 1965, № 5.
17. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977.
18. Mirels H. Boundary layer effect in shock tubes.— In: Shock Tube Research. London, 1971.
19. Зуев А. Д. О влиянии пограничного слоя на параметры потока в ударной трубе. Препринт ФТИ АН СССР, № 714, 1981.
20. Андронов В. А., Бахрах С. М. и др. Турбулентное перемешивание на контактной поверхности, ускоряемой ударными волнами.— ЖЭТФ, 1976, т. 71, вып. 2(8).
21. Rothkopf E. M., Low W. Diaphragm opening process in shock tubes.— Phys. Fluids, 1974, vol. 17, N 6.
22. Ткаченко Б. К. Особенности высокотемпературных течений в ударных трубах и разброс экспериментальных данных.— В кн.: Материалы Междунар. школы-семинара «Высокотемпературная газодинамика, ударные трубы и ударные волны». Минск, 1983.

Поступила 1/1 1984 г.