

7. Е.Е.Мешков. (2018) ЖЭТФ, том 153, вып.1, стр. 150–156.
8. Е.Е.Meshkov et al, (2006) Proc. of 10th IWPCTM, Paris, France, p.p. 238-243.
9. Е.Е.Meshkov, (2013) Phil. Trans. R. Soc. A2013 371, 20120288.
10. R.I. Kanygin et al. (2018), Phys.Scr. , v.93, #2.
11. Е.Е.Мешков, Р.В.Мокрецов, И.Р.Смагин. (2019) Сб.тез.докладов Межд.Конф. ХНЧ 2019, с.224.
12. Е.Е.Мешков. (2006) Исследования гидродинамических неустойчивостей в лабораторных экспериментах. Саров, 138 с.
13. Е.Е.Мешков, В.В.Никифоров, А.И.Толшмяков. (1990) ФГВ, N 3, 71.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦАХ СЛОЙКИ ВОЗДУХ-КСЕНОН-ВОЗДУХ ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*Е.В. Бодров, В.В. Змушко, Н.В. Невмержицкий
А.Н. Разин, Е.Д. Сеньковский, Е.А. Сотсков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

Существует ряд подходов и более десятка физических моделей для расчета турбулентных течений. Однако, используемые в них алгоритмы и математические модели далеки от совершенства. Каждый подход имеет свои достоинства и недостатки, а область их эффективного применения изучена недостаточно хорошо.

Значительную трудность для моделирования представляют задачи, в которых турбулентное перемешивание (ТП) возникает на контактных границах (КГ) слоев разноплотных газов под действием ударных волн (УВ) [1-6]. Из проблем математического моделирования подобных течений, прежде всего, отметим отсутствие сходимости решения на фронте конечно-разностной УВ [7, 8]. Не изученной остается задача взаимодействия УВ с турбулентным потоком [9].

Таким образом, сложность решаемых практических задач и нерешенные математические проблемы, присущие современным численным методикам, выдвигают на первый план задачи повышения точности вычислений и обоснования результатов математического моделирования. В [5, 10] на основе аналитического решения задачи о взаимодействии УВ с наклонной КГ и анализа результатов вычислительного эксперимента сформулирована математическая постановка опытов с трехслойными системами и приведены некоторые результаты моделирования. Результаты выполненных в РФЯЦ-ВНИИЭФ экспериментов [11-13] продемонстрировали, что полученная в опытах информация является чрезвычайно полезной для тестирования численных методик.

Цель работы состоит в сравнении экспериментальных данных и результатов прямого численного моделирования опыта, в котором на первой контактной границе трехслойной газовой системы ТП развивается при доминирующей роли неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, на второй контактной границе – под влиянием неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Моделирование задачи выполнено по методике МИД, являющейся дальнейшим развитием методики МИМОЗА [14].

Методика экспериментальных исследований

Эксперименты проведены на ударной трубе, составленной из камер высокого (драйвер) и низкого давления, канала и измерительной секции [15]. Камера высокого давления и камера низкого давления разделяются мембраной, изготовленной из целлофана. В камеру высокого давления закачивается сжатый воздух до избыточного давления $\approx 27 \cdot 10^5$ Па. Мембрана разрушается при помощи электровзрыва наклеенной на нее нихромовой проволоочки. После разрыва мембраны по камере низкого давления распространяется стационарная УВ, которая затем проходит канал и входит в измерительную секцию.

Измерительная секция состоит из нескольких отсеков, скрепленных непрозрачными шпильками. Отсеки секции изготовлены из оптически прозрачного оргстекла. Внутреннее сечение секции (40×40) мм. Для формирования контактных границ в измерительной секции устанавливаются две разделительные полимерные пленки толщиной $\tau = (0,3 - 1)$ мкм, которые предотвращают взаимодиффузию газов до начала проведения опыта. Выходной торец секции соединяется с атмосферой. Объем измерительной секции между полимерными пленками (центральный слой) заполняется ксеноном, между второй полимерной пленкой и открытым концом трубы – воздухом. В камере низкого давления и в канале (перед первой пленкой) находится воздух при атмосферных условиях. Контроль чистоты газов перед проведением опытов выполнен с помощью интерферометра с погрешностью $\sim 3\%$. Описание экспериментальной установки и принцип ее работы изложены в [13].

В экспериментах специальные начальные возмущения на КГ не задавались, ими служили кусочки разрушающейся под действием проходящей УВ пленки. Их характерный размер зависит от свойств пленки и по оценкам изменяется от 0,1 до 2 мм. Регистрация течения производилась двухкадровой видеокамерой CCD шлирен-методом через теневую установку ИАБ-451. Для подсветки использовался двухимпульсный лазер с длительностью импульса 7 нс, длиной волны 532 нм. При этом в каждом опыте получалось два видеокadra на определенные (заданные) моменты времени.

На стенках измерительной секции наносились тонкие реперные линии, расположенные вдоль и поперек ударной трубы на некотором расстоянии друг от друга. Они предназначены для определения пространственного положения характерных особенностей течения, зафиксированных на фотокадрах. По положению реперных линий осуществлялась “привязка” результатов численного расчета к экспериментальной информации.

Постановка расчета и результаты моделирования

Математическое моделирование задачи выполняется с использованием уравнений Эйлера без привлечения каких-либо моделей учета ТП (прямое численное моделирование). Расчетная методика основана на лагранжево-эйлеровом подходе при решении уравнений газовой динамики, выделении веществ концентрациями (подробности в [15-18]). Такой подход является эффективным при моделировании задач механики сплошной среды с большими деформациями.

Схема математической постановки задачи приведена на рисунке 1. Труба заполнена газами разной плотности, которые находятся в состоянии покоя при атмосферном давлении и разделяются двумя тонкими пленками (контактными границами). Первая контактная граница (КГ1) наклонена под углом 45° к фронту ударной волны, вторая (КГ2) расположена параллельно фронту. Центральный слой системы заполняется “тяжелым” газом (ксеноном – Xe), перед первой и за второй контактными границами располагается воздух (Air). Ударная волна формируется на левом конце трубы и движется в сторону первой контактной границы. Число Маха ударной волны $M \approx 2,4$. Геометрия задачи плоская. Правая граница – вытекающий в атмосферу поток. Граничные условия на стенках трубы – скольжение потока. Уравнение состояния газов – “идеальный газ”.

Начальные параметры воздуха: $\rho = 0,00125 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ – плотность, $\gamma = 1,4$ – показатель адиабаты, $P = 1,01325 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{мс}^{-2}$ – давление, $E = 2026,5 \text{ см}^2 \cdot \text{мс}^{-2}$ – удельная внутренняя энергия, $c = 33,7 \text{ см} \cdot \text{мс}^{-1}$ –

скорость звука. Начальные параметры ксенона: $\rho = 0,0055 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, $\gamma = 1,667$, $P = 1,01325 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{мс}^{-2}$, $E = 276,2 \text{ см}^2\cdot\text{мс}^{-2}$, $c = 17,52 \text{ см}\cdot\text{мс}^{-1}$. Параметры сжатого воздуха за фронтом УВ: $P_2 = 6,64 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{мс}^{-2}$, $\rho_2 = 0,004015 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, $u_2 = 55,7 \text{ см}\cdot\text{мс}^{-1}$.

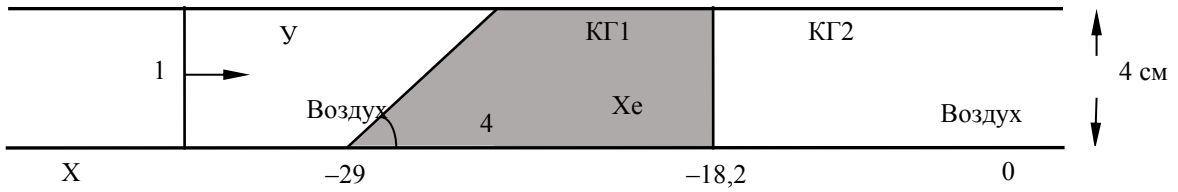


Рисунок 1. Схема постановки расчета: 1 – воздух за ударной волной

Моделирование задачи выполнено на сетках с различным числом точек 1N, 2N, 3N, 4N. Наибольшее число точек (22×10^6) содержала сетка 4N. Расчет начинается при $t = 0$, когда УВ находится на расстоянии $X = 0,6$ см от точки пересечения КГ1 с нижней стенкой трубы.

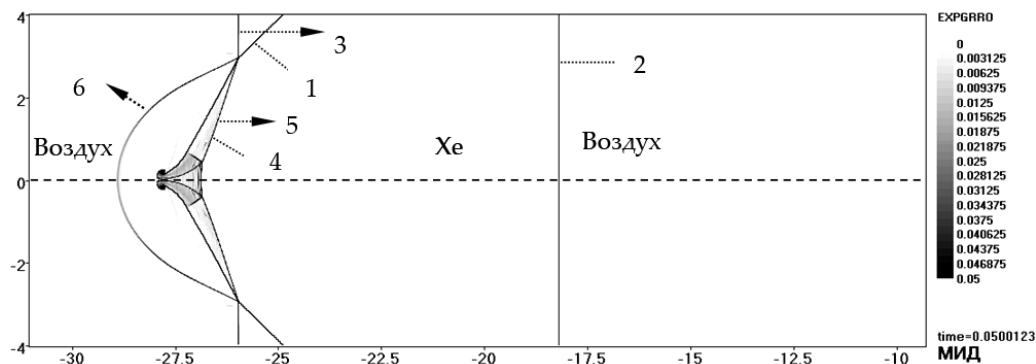
Для визуализации течения использовалась функция $F = \exp(\nabla p)$. Картина течения, полученная в численном расчете на ряд моментов времени, показана на рисунке 2. На графике пунктирной линией отмечено положение нижней стенки трубы. Ниже пунктирной линии приводится зеркальное отражение области решения задачи. Характерные особенности течения, формирующегося на момент времени $t \approx 0,05$ мс при взаимодействии УВ с КГ1, можно наблюдать на рисунке 2а. На графике используются обозначения: 1 – невозмущенная часть КГ1, 2 – положение КГ2, 3 – падающая (основная) УВ, 4 – возмущенная часть КГ1, 5 – прошедшая через контактную границу УВ, 6 – отраженная от КГ1 ударная волна.

После окончания взаимодействия УВ с КГ1 ($t \approx 0,063$ мс) основная УВ распространяется по ксенону (см. рисунок 2б) в направлении КГ2, а волна 6 отражается от верхней стенки трубы и движется в направлении нижней стенки (волна 7 на рисунке 2б). В результате взаимодействия прошедшей через наклонную контактную границу УВ (5 на рисунке 2а) с нижней стенкой трубы образуется прямая маховская конфигурация, состоящая из ножки Маха (8 на рисунке 2б), тангенциального разрыва и скачка. Поскольку касательные скорости слева и справа от КГ1 различны, на контактной границе развивается неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Первый вихрь на контактной границе образуется в окрестности нижней стенки трубы (см. рисунок 2а). После отражения падающей УВ от верхней стенки трубы в верхней части наклонной КГ1 формируется второй вихрь (см. рисунок 2б), который движется вдоль КГ в направлении нижней стенки трубы (см. рисунок 2б и 2в). Впоследствии между первым и вторым вихрями на КГ1 формируются новые (см. рисунок 2в).

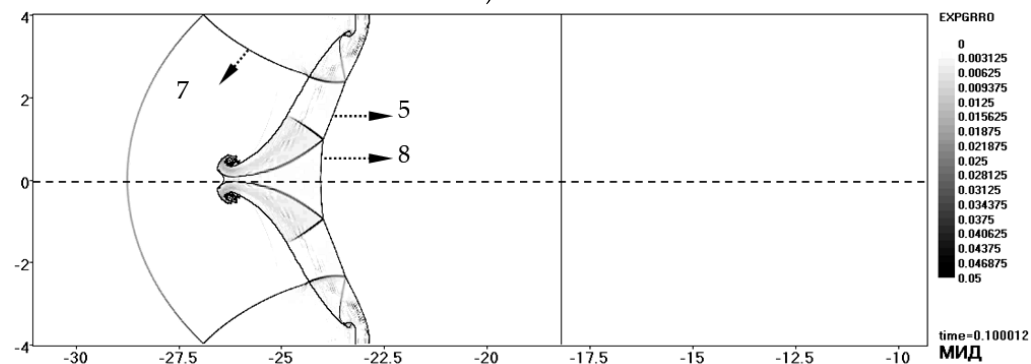
В момент времени $t \approx 0,19$ мс основная УВ выходит на КГ2 (см. рисунок 2в), а волна 7, отразившись от нижней стенки трубы, движется вверх (волна 9 на рисунке 2в) и взаимодействует с первым вихрем. При взаимодействии скачка 9 с вихрем ($t \approx 0,185$ мс), фронт скачка разрушается (газодинамические величины перестают быть разрывными), а после прохождения вихря ($t \approx 0,19$ мс) начинает восстанавливаться.

На рисунке 2г показана картина течения на момент времени $t \approx 0,21$ мс, когда после взаимодействия основной УВ с КГ2 в воздух распространяется УВ, а по ксенону – волна разрежения.

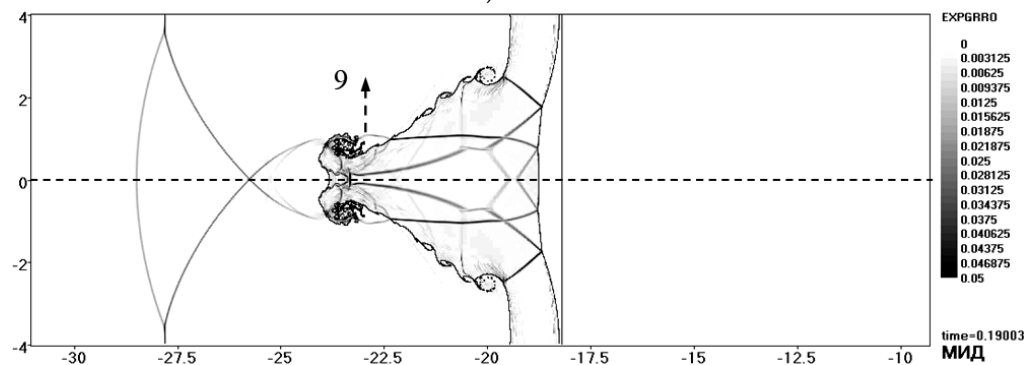
На рисунке 2д и 2е показаны мгновенные поля течений на моменты времени $t \approx 0,3$ мс и $t \approx 0,35$ мс, когда КГ2 прошла расстояние $\Delta X \approx 5,7$ см и $\Delta X \approx 8,4$ см соответственно. На КГ1 наблюдается ряд устойчивых когерентных вихрей. Сложный вид КГ2 в значительной степени сформировался под действием скачков и поверхностей тангенциального разрыва.



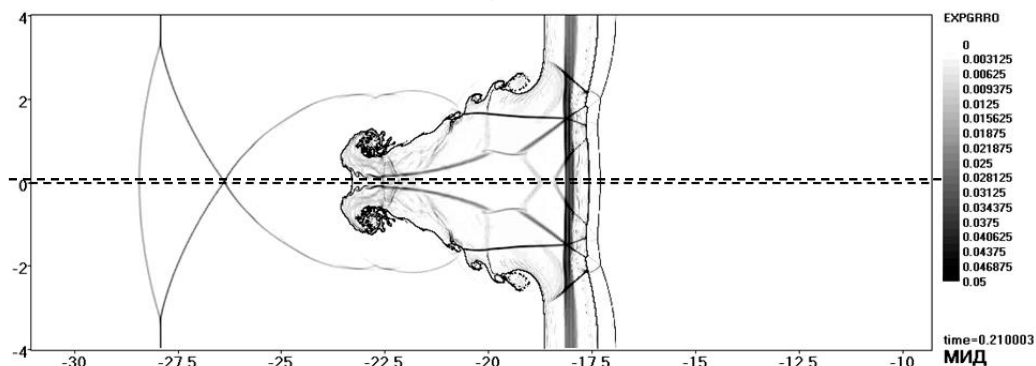
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2а,б,в,г. Визуализация течения с помощью функции F:

а) $t = 0,05$ мс; б) $t = 0,1$ мс; в) $t = 0,19$ мс; г) $t = 0,21$ мс

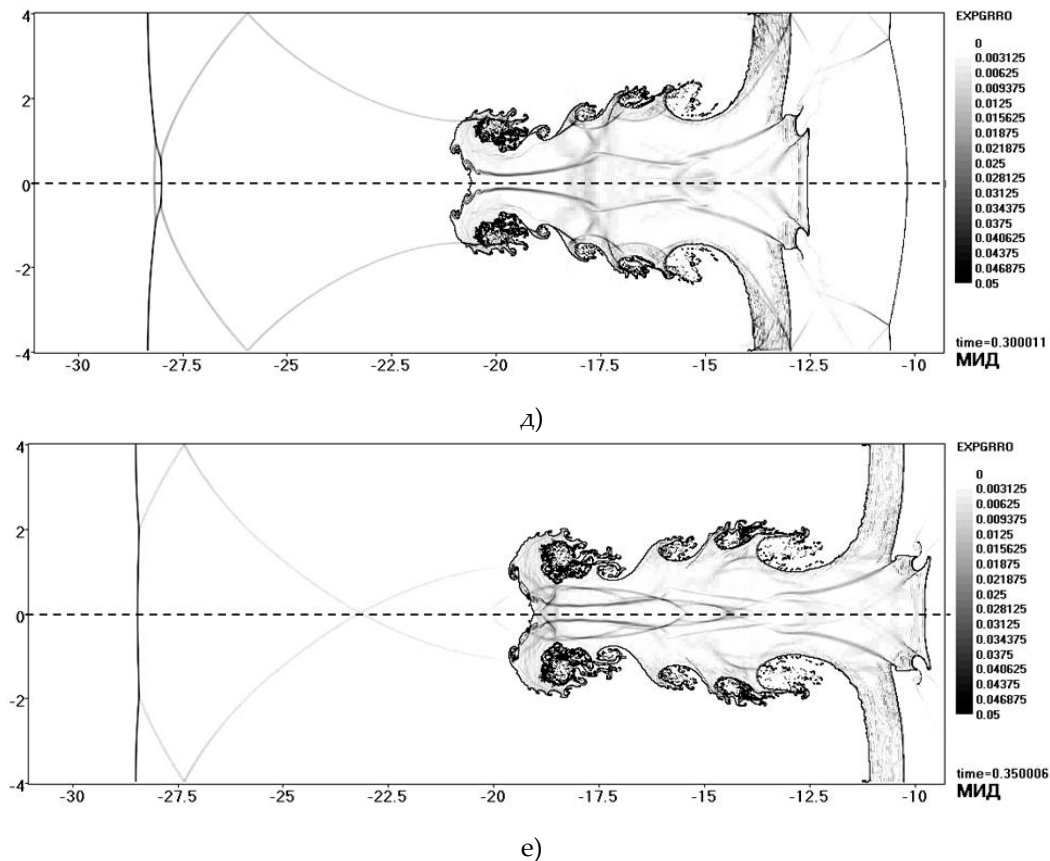


Рисунок 2д,е. Визуализация течения с помощью функции F:
д) $t = 0,3$ мс; е) $t = 0,35$ мс

Сравнение экспериментальной картины поля течения с данными численного моделирования представлено на рисунке 3 на момент времени $t \approx 0,345$ мс, когда КГ2 прошла расстояние $\Delta X \approx 8$ см. Из рисунка 3 можно заключить, что рассчитанная по методике МИД форма КГ2, а также положение и размеры вихрей на КГ1 удовлетворительно согласуются с экспериментальными; зона ТП на КГ2 в расчете, как и в опыте, развита слабо; положение и геометрия УВ, прошедшей КГ2, подобны экспериментальным. В отличие от опыта в расчете на КГ1 не происходит перемешивания газов между вторым вихрем и верхней стенкой измерительной секции, что требует проведения дополнительных численных расчетов с заданием начальных возмущений на КГ.

Выводы

Проведено расчетно-экспериментальное исследование развития турбулентного перемешивания, возникающего на контактных границах трехслойной газовой системы воздух-ксенон-воздух после прохождения ударной волны. Моделирование выполнено с использованием уравнений Эйлера по методике МИД.

Анализ опытных данных позволяет заключить, что в окрестности наклонной контактной границы (КГ1) происходит интенсивное перемешивание воздуха и Хе с образованием когерентных вихрей. На фотокадрах опыта на КГ1 наблюдаются области как гетерогенного, так и гомогенного перемешивания, КГ2 под действием ударных волн принимает сложную форму, турбулентное перемешивание на ней развито слабо.

Результаты моделирования опыта показали, что при выбранной технологии расчета получено удовлетворительное описание экспериментальных данных.

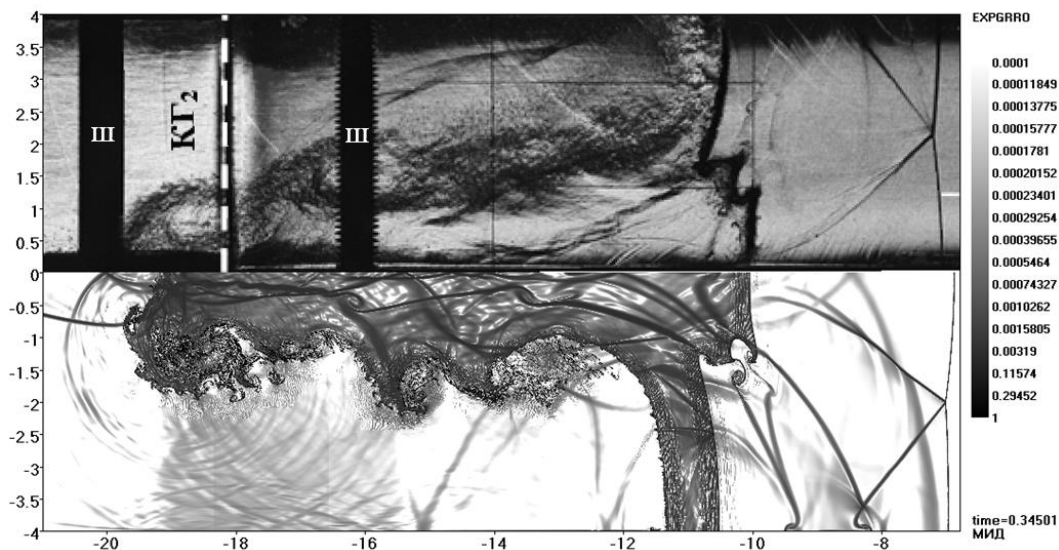


Рисунок 3. Поле течения в опыте (верхняя половина) и в расчете (нижняя половина – зеркальное отражение области расчета), $t = 0,345$ мс; на экспериментальных кадрах: Ш – шпилька крепления, КГ₂ – начальное положение прямой контактной границы (КГ₂)

Список литературы

- 1 И.Г.Лебо, В.Ф.Тишкин. Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза методами математического моделирования. М.: Физматлит, 2006. 304 с.
- 2 Н.А.Иногамов, А.Ю.Демьянов, Э.Е. Сон. Гидродинамика перемешивания. Изд-во МФТИ, 1999. 464 с.
- 3 В.Е.Неуважаев. Математическое моделирование турбулентного перемешивания. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. 157 с.
- 4 Ю.В.Янилкин, В.П.Стаценко, В.И.Козлов. Математическое моделирование турбулентного перемешивания в сжимаемых средах. Саров: Изд-во ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. 507 с.
- 5 А.Н.Разин. Моделирование неустойчивости и турбулентного перемешивания в слоистых системах. Саров: Изд-во ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. 414 с.
- 6 К.Н.Волков, В.Н.Емельянов. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 364 с.
- 7 А.Н.Разин, И.В.Большаков. Расчеты неустойчивости и турбулентного перемешивания по модели Никифорова // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т.21. № 4. С.425–438.
- 8 Д.И.Бобровский, И.В.Большаков, А.Н.Разин. О сходимости разностного решения уравнений турбулентного перемешивания при взаимодействии зоны перемешивания с ударной волной // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2012. Вып. 2. С.16–24.
- 9 А.Н.Разин, Н.В.Невмержицкий, Е.А.Сотсков, Е.Д.Сеньковский, О.Л.Кривонос, Е.В.Левкина, С.В.Фролов, Е.В.Бодров, К.В.Анисифоров. Экспериментальное исследование взаимодействия ударных волн с контактной границей и зоной турбулентного перемешивания различных газов // ПМТФ. 2017. Т.58. №2. С.16–25.
- 10 А.Н.Разин. Взаимодействие ударной волны с наклонной контактной границей // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2008. Вып. 2. С.3–11.
- 11 Н.В.Невмержицкий, А.Н.Разин, Е.Д.Сеньковский, В.И.Дудин, Е.А.Сотсков, А.А.Никулин, Л.В.Точилина, О.Л.Кривонос. Исследование турбулентного перемешивания в трехслойных

- газовых системах лазерным методом // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2009. Вып. 3. С.44–54.
- 12 Н.В.Невмержицкий, А.Н.Разин, Е.Д.Сеньковский, Е.А.Сотсков, Л.В.Точилина, О.Л.Кривонос, С.В.Фролов, Е.В.Бодров. Развитие зон турбулентного перемешивания в трехслойных газовых системах в условиях регулярного и нерегулярного взаимодействия ударной волны с контактной границей // Труды XVII Харитоновских тематических чтений. Саров. 2015. С.722–734.
- 13 Н.В.Невмержицкий, А.Н.Разин, Е.Д.Сеньковский, Е.А.Сотсков, А.А.Никулин, Л.В.Точилина, О.Л.Кривонос, Е.В.Шапоренко. Экспериментальное и численное исследование процесса турбулентного перемешивания на контактных границах трехслойных газовых систем // ПМТФ. 2015. Т.56. № 2. С.32–42.
- 14 В.В.Змушко, Ф.А.Плетенев, В.А.Сараев, И.Д.Софронов. Методика решения трехмерных уравнений газовой динамики в смешанных лагранжево-эйлеровых координатах // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1988. Вып.1. С.22–27.
- 15 Е.В.Бодров, В.В.Змушко, Н.В.Невмержицкий, А.Н.Разин, Е.Д.Сеньковский, Е.А.Сотсков. Расчетно-экспериментальное исследование перемешивания газов на контактных границах трехслойной системы под действием ударных волн // Известия РАН. МЖГ. 2018. № 3. С.54-62.
- 16 И.Д.Софронов, Е.А.Афанасьева, О.А.Винокуров, А.И.Воропинов, В.В.Змушко, Ф.А.Плетенев, П.В.Рыбаченко, В.А.Сараев, Н.В.Соколова, Б.Н.Шамраев. Комплекс программ МИМОЗА для решения многомерных задач механики сплошной среды на ЭВМ “Эльбрус-2” // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1990. Вып.2. С.3–9.
- 17 V.V.Zmushko. Computation of convective flows and their realization in MIMOZA code // International Workshop “New Models of Numerical Codes for Shock Wave Processes in Condensed Media”/ Oxford / September 15–19. 1997.
- 18 В.К.Ладагин, А.М. Пастушенко. Об одной схеме расчета газодинамических движений // Численные методы механики сплошной среды. Новосибирск. 1977. Т.8. №2. С.66–72.

О РАЗВИТИИ ВОЗМУЩЕНИЙ НА КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЕ АЛЮМИНИЙ – МЕДЬ В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ КОСОГО СОУДАРЕНИЯ

О.Б. Дреннов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Описание физических процессов скользящего нагружения проводится обычно для стационарной фазы движения метаемой пластины. В этом случае скорость полета пластины зависит только от относительной массы $R = \frac{m_{BB}}{m_{нл}}$ и метательной способности ВВ, учитываемой в полуэмпирических формулах через скорость детонации D [1].

Принято считать, что разворот ударника до постоянного значения угла γ осуществляется на базе полета $d^* = (3-5)\delta$ (δ - толщина метаемой пластины) [2].

При $d < d^*$ соударение пластин будет происходить под углом, отличным от расчетного. Это, в свою очередь, может привести к изменению режима нагружения и изменению параметров образующихся в зоне контакта волн.

В ряде случаев, однако, необходимо знать состояние контактной границы металлов, соударение которых происходит на начальной стадии движения, до установления стационарного