

- [1] Кащенко М.П. Волновая модель роста мартенсита при  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращениях в сплавах на основе железа. Екатеринбург: Наука, 1993. 224 с.
- [2] Кащенко М.П., Летучев В.В., Коновалов С.В. и др. // ФММ. 1993. Т. 76. № 3. С. 90–101.
- [3] Коновалов С.В., Яблонская Т.Н., Кащенко М.П. // Материалы с эффектом памяти формы. СПб., 1995. С. 109–112.
- [4] Кащенко М.П., Коновалов С.В., Яблонская Т.Н. // Изв. вузов. Физика. 1994. Т. 37. № 6. С. 64–67.
- [5] Okamoto H., Oka M., Tamura S. // Trans. Jap. Instr. Met. 1978. Vol. 24. N 12. P. 674–684.

03;04

Журнал технической физики, т. 66, в. 11, 1996

## ВОЛНЫ ЗАРЯДА В ИОНИЗОВАННОМ ГАЗЕ ПЕРЕД ГИПЕРЗВУКОВЫМ ТЕЛОМ

© Ю.Л.Серов, М.П.Явор

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 27 сентября 1995 г.)

Несмотря на многолетние исследования физических процессов при движении гиперзвуковых тел и ударных волн, остается малоизученным целый ряд явлений, связанных с движением ударных волн с большими числами Маха, при которых может происходить полная деструкция волны [1]. Аналогичные явления происходят при сверхзвуковом движении тел и ударных волн в плазме. Наблюдаются значительные изменения обтекания [2], аномально высокая скорость распространения и сложная структура ударной волны [3]. Внимание к этим проблемам в последние годы связано с разработками в области создания гиперзвуковых самолетов, движущихся со скоростями, соответствующими числу Маха  $M > 10$ . Упомянутые выше эффекты не получили удовлетворительного объяснения вследствие ограниченности экспериментального материала, раскрывающего картину физических процессов при движении тел и ударных волн в плазме. В работе [4] было обнаружено, что перед гиперзвуковым телом существует протяженный электрический предвестник, состоящий из электронов, движущихся вместе с телом и значительно опережающих ударную волну. В настоящей работе более детально исследован указанный эффект и обнаружено, что в предвестнике происходят процессы, связанные с неустойчивостью волн в плазме перед головной ударной волной.

Эксперименты проводились на баллистической установке, описанной в работе [5]. Дюралюминиевая модель диаметром 20 мм выстреливалась со сверхзвуковой скоростью в барокамеру длиной  $\sim 7$  м с контролируемой атмосферой. Внутри заземленной металлической барокамеры диаметром 30 см (рис. 1) располагались кольцевые экранированные электростатические датчики диаметром 10 см. Экраны представляли собой заземленные металлические диски с наружным диаметром 12 см и отверстием диаметром 5 см, между которыми располагался датчик. Методика измерений подробно описана в работе [4].

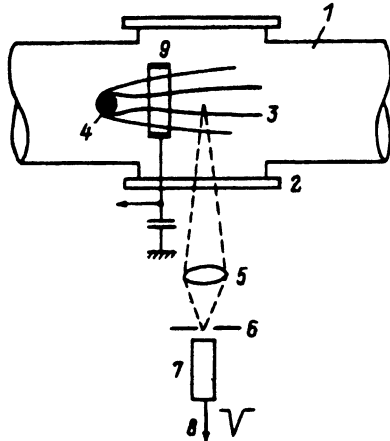


Рис. 1. Схема измерений.

1 — барокамера, 2 — окно, 3 — след от модели, 4 — модель, 5 — фокусирующая линза, 6 — вертикальная щель, 7 — ФЗУ, 8 — выход ФЗУ, 9 — электростатический датчик.

Пространственное разрешение такого датчика составляет 5 см. Гиперзвуковое движение с числами Маха  $M = 10-13$  моделировалось при полете модели в барокамере, наполненной ксеноном. В этих условиях перед фронтом головной ударной волны образуется плазма за счет фотоионизации излучением из фронта. Предпринимались специальные меры для исключения влияния фотоэффекта на датчик при движении модели. Датчик был расположен внутри экрана таким образом, что до момента пролета модели излучение от фронта головной ударной волны на него не попадало. Наружная поверхность экрана закрывалась черной бумагой, чтобы снизить долю рассеянного излучения. Кроме того, специально изучалась рассеивающая роль стенок барокамеры при моделировании излучения от движущейся модели с помощью дуговой ртутной лампы. Измерения показали, что рассеянным от стенок излучением в наших экспериментах можно пренебрегать.

На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов с электростатического датчика, а также с фотоумножителя, регистрирующего излучение из области, расположенной на расстоянии 15 мм перед датчиком. Пик излучения от головной ударной волны на осциллограммах отмечен стрелкой. Эксперименты проводились в ксеноне при давлении  $P = 6-40$  Тор и скорости модели в диапазоне  $V = 2060-2200$  м/с. Поэтому регистрация сигналов с датчика и фотоумножителя происходит с некоторым временным сдвигом. Сигналы с датчика носят сложный характер и свидетельствуют о том, что вблизи модели наблюдается колебательная структура в распределении зарядов, причем поскольку пространственное разрешение электростатического датчика сравнительно невелико, то можно наблюдать колебания с длиной волны порядка нескольких сантиметров или одиночные солитоны. Как показывает сигнал с датчика, перед телом существует область отрицательного заряда длиной 10-30 см, причем максимум его не совпадает с положением ударной волны, а располагается перед ней, что, вероятно, связано с существованием электронной волны разрежения связанной с остыванием электронов за фронтом головной ударной волны. Этот предвестник существует во всех проведенных экспериментах, однако длина его нестабильна. Аналогичные по форме

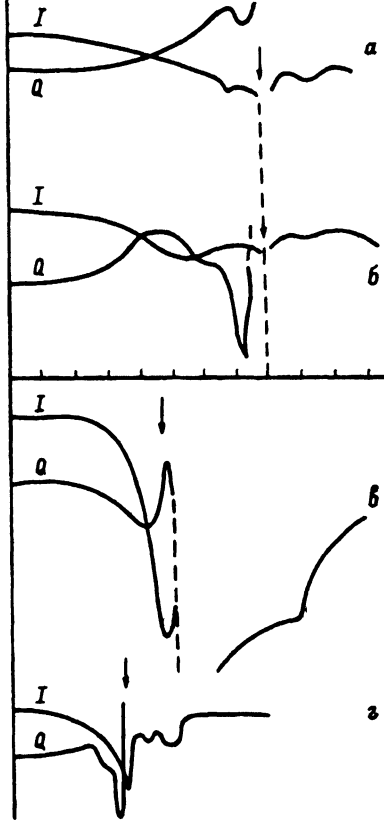


Рис. 2. Осциллограммы сигналов с электростатического датчика  $Q$  и ФЗУ  $I$ .  $a, b$  — 20;  $c, z$  — 50 мкс/дел.

предвестники электронной плотности регистрировались СВЧ методом при движении ударной волны в распадающейся газоразрядной плазме А.И.Климовым [6].

В наших экспериментах в дальней прекурсорной области наблюдается также неустойчивый сигнал положительной полярности. Если отрицательный сигнал в ближней к ударному фронту зоне достаточно стабилен по месту расположения, сигнал положительной полярности постоянно меняется по расположению и амплитуде от выстрела к выстрелу и представляет собой ионно-звуковой солитон, регистрируемый в различные фазы своего существования. Как известно, распространение слабонеодномерных акустических волн в диспергирующих средах описывается уравнением Кадомцева-Петвиашвили

$$\partial_t(\partial_t \Phi + \Phi \partial_z \Phi + \partial_z^3 \Phi) = \sigma \nabla_{\perp}^2 \Phi$$

где  $\Phi = e\varphi/T_e$ ,  $\sigma = \pm 1$  определяет знак дисперсии.

Это уравнение в средах с отрицательной дисперсией имеет двумерные и трехмерные солитонные решения. Анализ этих решений показывает, что как двумерные, так и трехмерные солитоны неустойчивы [7].

В настоящих экспериментах возмущение концентрации положительных ионов также неустойчиво. В некоторых экспериментах оно имеет

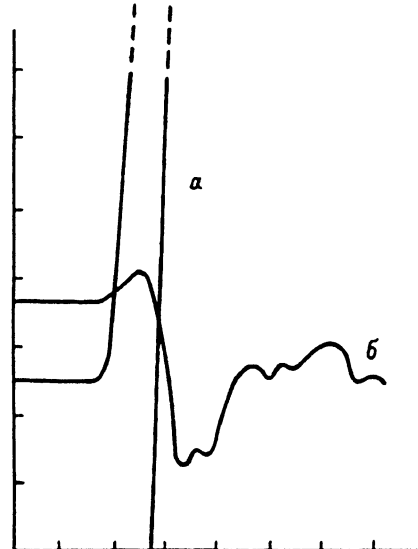


Рис. 3. Осциллограммы сигналов с электростатического датчика в распадающейся плазме разряда в ксеноне. Чувствительность осциллографа:  $a$  — 0.001,  $b$  — 0.02 в/дел, развертка 100 мкс/дел.

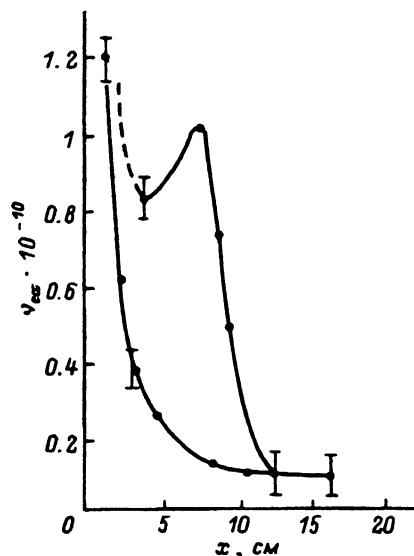


Рис. 4. Зависимости частоты столкновений  $\nu$  ( $\text{с}^{-1}$ ) электронов с атомами от расстояния перед фронтом ударной волны в ксеноне при давлении 4.3 Тор ( $M = 16.7$  [13]).

значительную амплитуду (рис. 2,б), в некоторых не наблюдается вообще (рис. 2,в). Электрические предвестники в виде отрицательного заряда перед фронтом ударной волны в ксеноне и аргоне в ударной трубе регистрировались также в работах [8,9]. Их авторы предполагали, что появление сигнала перед ударной волной связано с фотоэффектом и диффузией электронов из фронта. В данной серии экспериментов, как уже отмечалось, влияние фотоэффекта исключено. Кроме того, исключено влияние диффузии метастабильных атомов, которым требуется слишком большое время ( $10^{-2}$  с), чтобы достичь поверхности датчика. Таким образом, можно утверждать, что появление предвестника в виде нескомпенсированных зарядов перед головной ударной волной связано с процессами в фотоионизационной плазме, образовавшейся перед телом.

Как известно, в слабоионизованной плазме с  $T_e \gg T_a \approx T_i$  область сжатия заряженной компоненты опережает вязкий скачок уплотнения ударной волны на длину  $(T_e/T_a)l_{ea}$ , где  $l_{ea}$  — длина свободного пробега электрона. В наших условиях  $(T_e/T_a)l_{ea} \approx 10^{-1}$  см. Теплопроводный предвестник, создающий возмущение заряженной компоненты  $(M_a/m_e)^{1/2}l_{ea} \approx 0.2$  см [10,11]. Длина наблюдаемого электронного предвестника значительно больше этих величин. Возможно, что его протяженность связана с отражением электронов плазмы от скачка потенциала перед фронтом головной ударной волны. Наблюдаемые распределения заряда могут свидетельствовать о сложном распределении потенциала перед головной ударной волной, влияющем на процессы взаимодействия движущегося тела с набегающим потоком.

Наблюдается корреляция между осциллограммами изменения заряда и интенсивности излучения при прохождении модели. На осциллограмме излучения перед моделью наблюдается дополнительный всплеск излучения положение которого соответствует области без заряда между "горбами" на осциллограмме заряда, где напряженность электрического поля максимальна. При изменении взаиморасположения этих "горбов" меняется и характер распределения излучения из области перед фронтом головной ударной волны. Таким образом, при движении тела с гиперзвуковой скоростью перед головной ударной волной наблюдаются неустойчивые волны как заряда, так и интенсивности излучения. Повышение плотности плазмы перед фронтом головной ударной волны приводит к изменению характера распределения электрических сигналов при движении тела.

Была проведена серия экспериментов по исследованию распределения зарядов перед головной ударной волной в распадающейся плазме различных газов. На рис. 3 приведена осциллограмма заряда, полученная при движении сферы в распадающейся ксеноновой плазме тлеющего разряда через 1.7 мс после обрыва тока разряда. Скорость модели  $V = 18509$  м/с давление ксенона  $P = 40$  Тор, число Маха  $M = 11$ . Электростатический датчик находился на расстоянии 27 см от разрядных электродов. Сигнал с датчика изменился по сравнению с сигналом, приведенным на осциллограммах рис. 2. Электронный предвестник в этих условиях не наблюдается. Исчезновение предвестника в распадающейся ксеноновой плазме связано с уменьшением дебаевского радиуса с ростом электронной концентрации, обусловленным разрядом. В этих экспериментах разделение зарядов происходит в распадающейся плазме в следе за телом. Возможность наблюдения некомпенсированных зарядов связана с небольшими концентрациями, однако вероятно, что плазменные колебания и неустойчивости могут наблюдаться и в достаточно плотной плазме. Вероятно, что два типа зависимостей частоты столкновений электрон-атом, полученные при движении ударных волн в аргоне [12] и ксеноне [13], свидетельствуют о развитии плазменных неустойчивостей в плотной плазме перед фронтом ударной волны. В качестве иллюстрации на рис. 4 показаны 2 типа зависимостей частоты электрон-атомных столкновений от расстояния перед фронтом ударной волны, полученные в одинаковых условиях [13]. Периодические возмущения при распространении ударной волны в ксеноне в диапазоне чисел Маха  $M = 10-15$  отмечаются также в работе [14]. Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что в фотоионизационной плазме перед головной ударной волной происходит разделение электрических зарядов, сопровождающееся развитием плазменных неустойчивостей в набегающем на тело потоке.

#### Список литературы

- [1] Ющенкова Н.И., Мишин Г.И., Рощин О.В. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 121. Вып. 9. С. 517-524.
- [2] Мишин А.И., Серов Ю.Л., Явор И.П. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 11. С. 65-71.
- [3] Климов Г.И., Коблов А.И., Мишин Г.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 8. Вып. 7. С. 439-443.
- [4] Серов Ю.Л., Явор И.П. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 9. С. 9-14.
- [5] Басаргин И.В., Менде Н.П. и др. // Физико-газодинамические баллистические исследования. Л.: Наука, 1980. С. 171-179.

- [6] Горшков В.А., Климов А.И. и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 10. С. 1893-1898.
- [7] Петвиашвили В.И., Похотелов О.А. Уединенные волны в плазме и атмосфере. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [8] Gloersen P. // Phys. Fluids. 1960. Vol. 3. N 6. P. 857-870.
- [9] Neumann H.D. // Phys. Fluids. 1960. Vol. 3. N 3. P. 545-548.
- [10] Ершов А.П., Клишин С.В., Кузовников С.В. и др. // ТВТ. 1990. № 2. С. 1041-1044.
- [11] Теслякин С.Ф. Кинетические и газодинамические процессы в неравновесных средах / Под ред. Прохорова. М., 1986. С. 99.
- [12] Pinegre M. // These. Univ. de Rouen, 1976.
- [13] Заварин Д.Г. Дис. Л., 1987.
- [14] Мукин В.А., Осипов А.И., Рязин А.П., Уваров А.В. // Хим. физ. 1994. Т. 12. № 3. С. 380-382.

01;05

Журнал технической физики, т. 66, в. 11, 1996

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ И УСТРОЙСТВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

© Ф.Трошу, В.Браиловский, Кян Яоян, П.Террьо, М.-А.Менье

Mechanical Engineering Department, Ecole Polytechnique of Montreal  
Montreal (Quebec), Canada

(Поступило в Редакцию 8 февраля 1996 г.)

Поскольку процесс проектирования приборов всегда итеративен, то становится невозможным создавать сравнительно сложные устройства методом проб и ошибок. Чтобы обеспечить конкурентоспособность, все более необходимым становится использование специальных проектных методов для ускорения цикла создания прибора. При применении сплавов, обладающих эффектом памяти формы (ЭПФ), недостаток соответствующего математического обеспечения является одной из причин, объясняющих, почему так мало коммерческих приложений реализовано вопреки большому числу существующих изобретений, связанных с неординарными свойствами сплавов с эффектом памяти формы.

Основная цель нашего исследования заключается в установлении связи между изготовлением, конструированием и промышленным внедрением сплавов с эффектом памяти формы (рис. 1). Основное внимание сосредоточено на разработке аналитических методов для сплавов с памятью формы, учитывающих температурную зависимость свойств и гистерезис материала. Моделирование зависимости напряжение-деформация при любой температуре выполняется с помощью билинейной зависимости, или кригинга, новой интерполяционной техники, включающей линейные конечные элементы и сплайны, как частный случай. Поведение деталей из сплавов с эффектом памяти формы анализируется с помощью конечных элементов. Параллельно с этим общим подходом были развиты методы проектирования для моделирования поведения простых деталей, таких как прямые проволоочки, спирали и пружины Belleville и осесимметричные разъемы. Другая сторона этого исследования состоит в интеграции влияния микроструктуры и