

4. Масумото Т., Хашимото К., Нака М. // Быстрозакаленные металлы.— М.: Металлургия, 1983.
5. Глезер А. М., Молотилев Б. В., Утевская О. Л. и др. *Металлофизика*, 1980, 11, 4, 115.
6. Залуцкий В. П., Ефимова Т. В., Перекося А. Е. и др. // Там же, 1988, 10, 3, 117.

г. Красноярск

Поступила в редакцию 20/III 1989,  
после доработки — 22/I 1990

УДК 533.6.011.72

В. В. ДЕМЧЕНКО, И. В. НЕМЧИНОВ

### ТРЕХМЕРНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА ПРИ ПРОБОЕ В НЕСКОЛЬКИХ ТОЧКАХ НА ОКРУЖНОСТИ

Эффекты кумуляции при фокусировке сильных сходящихся ударных волн (УВ) [1, 2] позволяют достичь высоких температур и давлений плазмы. Быстрое энерговыделение при пробое газа лазерным излучением или электровзрыве дает возможность инициировать такие УВ. Если энерговыделение происходит в тонкой кольцевой области, течение двумерное. При движении УВ к центру (и после столкновения волн) происходит растекание из зоны кумуляции вдоль оси, однако амплитуда УВ достаточно сильно возрастает, хотя и медленнее, чем в одномерном (цилиндрически-симметричном) случае. Равномерное энерговыделение в пределах всего кольца затруднительно. Часто экспериментально осуществляется пробой в нескольких точках, расположенных в некоторой плоскости на окружности на равных расстояниях [3]. Возникшее нестационарное течение газа достаточно сложное для теоретического анализа, так как оно трехмерно.

Трехмерные течения газа встречаются не только в задачах множественного пробоя, но и во многих других физических явлениях, в том числе взрывного типа. Математическое моделирование, опирающееся на численные методы и современные ЭВМ, принципиально способно дать их описание в рамках той или иной физической модели. Однако в силу гораздо больших затрат машинного времени, необходимых для решения трехмерных задач по сравнению с одномерными или двумерными, даже отработка надежных многомерных методов и программ решения задач механики сплошной среды весьма трудоемка и представляется еще далекой от завершения. В данном случае применен сеточно-характеристический метод сквозного счета [4, 5].

При представлении результатов использовался специально созданный комплекс графических программ, позволяющий строить изолинии физических величин одновременно в трех плоскостях декартового трехгранника. Изолинии — это линии пересечения соответствующих изоповерхностей с плоскостями декартовой системы координат.

**Постановка задачи.** Трехмерное пространство, обладающее осевой симметрией, заполнено однородным покоящимся идеальным газом с плотностью  $\rho = \rho_0 = 1,29$  мг/см<sup>3</sup> и удельной внутренней энергией  $e = e_0 = 0,19$  кДж/г. Для простоты считалось, что показатель адиабаты  $\gamma = 1,2$  постоянен. В плоскости, перпендикулярной оси, в начальный момент энергия выделяется в 6 точках, расположенных на окружности радиуса  $r = r_0 = 0,25$  см с угловым расстоянием между ними 60°. Энергия каждого из шести пробоев  $E = 30$  Дж, что соответствует экспериментам [3]. Считалось, что энерговыделение равномерно в пределах малого объема 10<sup>-3</sup> см<sup>3</sup>. Область энерговыделения представляет собой часть коаксиальной цилиндрической оболочки высотой  $\Delta z = 0,1$  см, толщиной  $\Delta r = 0,1$  см и угловым размером  $\Delta\theta = 24^\circ$ . В области энерговыде-

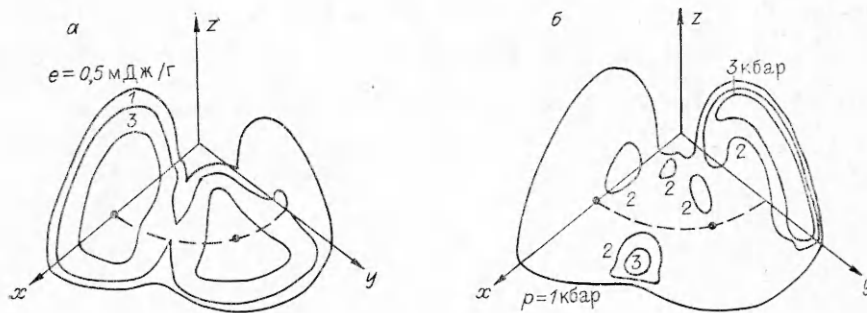


Рис. 1.

ления удельная внутренняя энергия  $e_1 = 23,2$  мДж/г, т. е.  $e_1 \gg e_0$ , и возникающие УВ являются сильными. Поскольку расстояние между точками пробоя заметно превосходит начальные размеры зоны энерговыделения, то к началу взаимодействия УВ ее точные размеры и форма перестают играть существенную роль. Отметим, что если бы «размазать» всю выделившуюся энергию по сфере радиуса  $r$ , то все равно было бы  $e \gg e_0$ . Это означает, что волны остаются сильными весь процесс взаимодействия, что дает возможность пересчитывать по подобию полученные результаты на другие значения  $E$ ,  $\rho_0$  и  $r_0$ .

В силу того что поставленная задача обладает осевой (ось системы координат) и плоскостной симметрией (плоскость начального энерговыделения) и периодична (шесть периодов в плоскости), можно рассматривать не все пространство, а только его часть, ограниченную осью цилиндрической системы координат, плоскостью симметрии, к ней перпендикулярной, в которой первоначально выделилась энергия, и двумя плоскостями, пересекающимися по оси системы координат, перпендикулярными к плоскости симметрии и имеющими между собой угол, равный половине периода ( $30^\circ$ ). В расчетах использовалась разностная сетка с 50 точками по  $r$ , 35 точками по  $z$  и 21 по углу  $\theta$ , т. е. всего имелось  $\approx 37\,000$  узлов, с равномерным шагом по каждой из координат. Если бы не соображения симметрии и периодичности, то для достижения той же разрешающей способности разностной сетки пришлось бы использовать 400 000 узлов.

**Результаты численных расчетов.** На рис. 1, а, б представлены изолинии удельной внутренней энергии и изобары на момент 50 нс после начала развития газодинамических процессов. Плоскость  $xy$  совпадает с плоскостью симметрии, в которой произошло инициирующее энерговыделение, в частности два из шести центров пробоев расположены на оси  $x$ . Штриховой линией показана часть окружности, на которой расположены центры пробоев, два из них отмечены точкой. Ось  $z$  отвечает оси симметрии цилиндрической системы координат. Плоскость симметрии  $yz$  равноудалена от областей начального энерговыделения и составляет с одной из них угол  $30^\circ$ , а с другой  $90^\circ$ .

В начальные моменты вокруг каждой из шести областей энерговыделения формируются УВ, которые распространяются во всех направлениях почти сферически симметричным образом. До момента взаимодействия между ними течение в возмущенных областях развивается практически по законам одномерной газодинамической задачи о мгновенном взрыве. Первое взаимодействие происходит в плоскости симметрии  $yz$  между зонами энерговыделения — в точке на прямой пересечения плоскостей  $xy$  и  $yz$ , перпендикулярной ей. Столкновение УВ приводит к слиянию фронтов и их распространению в азимутальном направлении и возникновению области с повышенным  $p$  (и  $\rho$ ) в той зоне, где УВ сталкиваются под косыми углами (см. рис. 1, б). Линия объединения фронтов УВ от двух ближайших областей становится близкой к окружности, и с течением времени ее радиус увеличивается, что видно по изобарам (см. рис. 1, б) и изолиниям плотности.

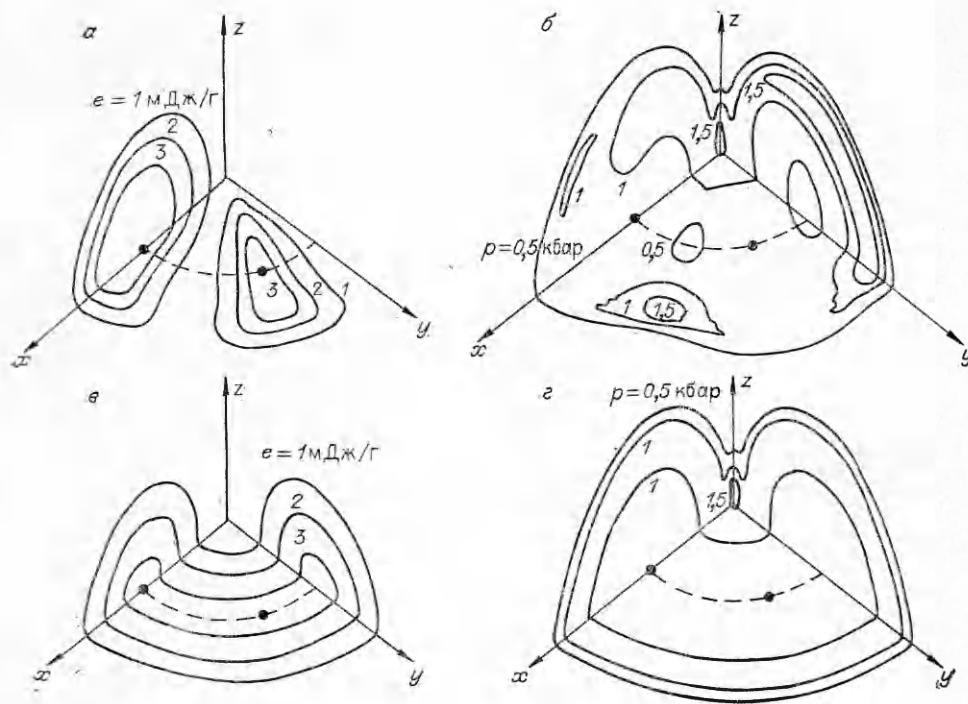


Рис. 2.

На рис. 1, б изображена изобара в 2 кбар, имеющая сложную форму. Локальные повышения давления объясняются тем, что после первого столкновения УВ рост  $p$  вызван и встречей УВ от пробоев, составляющих между собой угол в  $120^\circ$  в плоскости  $xy$ . Центр второго взаимодействия расположен ближе к оси цилиндрической системы координат, а его интенсивность меньше по сравнению со столкновением от ближайших источников в плоскости  $yz$ , поскольку УВ к этому моменту уже один раз взаимодействовали, охватили большую массу вещества и стали затухать. В указанный момент времени УВ вплотную подошли к оси  $z$ .

Распределения величин  $e$  и  $p$  на момент 90 нс после взрыва изображены на рис. 2, а, б. Область возмущенного газа еще более увеличилась, различия между разными направлениями в плоскости  $xy$  уменьшились, фронт расширяющейся УВ стал меньше отличаться от окружности. Интенсивность первого взаимодействия УВ от ближайших источников падает. Области  $e_{\max}$  приобрели вытянутую форму из-за второго взаимодействия УВ (см. рис. 2, а). Это подтверждает и поведение изобары 1 кбар в плоскости  $xz$  на рис. 2, б, указывающее на распространение линии столкновения УВ от более удаленных пробоев. На основе анализа поведения изобар (см. рис. 2, б) и изолинии  $p$  вблизи оси симметрии  $z$  можно утверждать, что произошло слияние УВ в центре и сформировалась область повышенных величин  $\rho$  и  $p$ . В результате образуется струя, движущаяся вдоль оси  $z$  в положительном и отрицательном направлениях, ослабляющая эффект кумуляции.

Для выявления трехмерных эффектов проведен расчет на той же разностной сетке осесимметричной задачи, в которой область первоначального выделения энергии — кольцо той же толщины и высоты, что и рассмотренные отдельные пробой. Величина общей энергии в нем равнялась суммарной энергии шести областей (180 Дж) и была однородно распределена по всему объему кольца. Распределения  $e$  и  $p$  на момент 90 нс после равномерного энерговыделения в кольце представлены на рис. 2, в, г.

Размеры возмущенных областей в этих двух вариантах при таких достаточно больших временах незначительно отличаются между собой.

В плоскости  $xz$ , где в первом случае находился центр пробоя, наблюдается несколько опережающее распространение фронта УВ, область  $e_{\max}$  имеет вид кольца и более обширна по сравнению с осесимметричным случаем. В плоскости  $yz$  — обратная картина: фронт расширяющейся УВ отстает, но давление за фронтом выше; величина  $e$  в несколько раз меньше, а  $p$  больше. Изобары на оси симметрии  $z$  в обоих случаях практически совпадают. Значительное отличие наблюдается в поведении изолиний плотности, что вызвано неодновременным достижением оси симметрии фронтами УВ по разным угловым направлениям в первом случае. В результате формируется неоднородная по плотности струя вдоль оси  $z$ . На рис. 2, *а* видна зона повышенного давления вблизи центра кольца, аналогичная таковой для множественного пробоя (см. рис. 2, *б*). Ее характерные размеры и величины достигнутых в ней давлений того же порядка, что и в случае кольцеобразного взрыва. Таким образом, несмотря на неоднородное начальное распределение энергии удается реализовать эффекты кумулятивного типа.

В случае однородного по кольцу энерговыделения создается кольцеобразная область высоких температур (см. рис. 2, *в*). Для множественных пробоев области наибольших температур остаются локализованными, не сливаясь между собой. Отметим, что это справедливо лишь в рассматриваемом чисто газодинамическом приближении. При больших же величинах  $E$ , намного больших рассматриваемых, когда оптическая толщина достаточно велика, тепловое излучение плазмы будет способствовать выравниванию температуры [6]. Распределения величин  $p$  и  $e$ , сходные с приведенными выше, имеют место и в других задачах одновременного взрыва в нескольких точках, например при сферической детонации системы зарядов обычных ВВ.

**Выводы.** В стадии взаимодействия УВ распределение газодинамических параметров в возмущенной области в трехмерном варианте отличается от соответствующего осесимметричного случая: возникают локальные максимумы давления, плотности и температуры, связанные со столкновением УВ, от ближайших, а затем и более удаленных точек пробоя. Наиболее обширные области  $e_{\max}$  (и температур) находятся в плоскостях начального энерговыделения и расположены вблизи точек пробоя. Эффекты кумуляции в центре в случае пробоя в нескольких точках, а не равномерно по кольцу, по-прежнему существуют.

При больших временах и при одинаковом суммарном энерговыделении трехмерный вариант мало отличается от осесимметричного по внешней конфигурации фронта расширяющейся УВ. Граница возмущенной области с течением времени стремится к сферической форме. В обоих вариантах формируется струйное течение вдоль оси симметрии в двух противоположных направлениях от плоскости начального энерговыделения, ослабляющее кумулятивные эффекты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Забабахин Е. П. Явления неограниченной кумуляции // Механика в СССР за 50 лет.— М.: Наука, 1970.— Т. 2.
2. Захаров И. С., Коробейников В. П. Изв. АН СССР. МЖГ, 1988, 6.
3. Бархударов Э. М., Косый П. А., Мдивнишвили М. О и др. Изв. АН СССР. МЖГ, 1988, 2.
4. Белоцерковский О. М., Демченко В. В., Косарев В. П. и др. ЖВММФ, 1978, 18, 2.
5. Магомедов К. М., Холодов А. С. Сеточно-характеристические методы.— М.: Наука, 1988.
6. Маркелова Л. П., Немчинов П. В., Шубадеева Л. П. Квантовая электроника, 1987, 14, 9.

г. Москва

Поступила в редакцию 24/XI 1989,  
после доработки — 20/III 1990