

Возмущения проявлялись в виде конических скачков, перемещающихся вверх по потоку. Однако используемая экспериментальная техника не позволила достаточно полно выявить всю внутреннюю структуру течения, возникающего в этом случае, что, в свою очередь, затруднило аргументированное объяснение наблюдаемых явлений. Так, в [5] отмечено, что не у всех возмущенных скачков во главе скачка находится частица и что в некоторых случаях, когда в вершине конического скачка нет частицы, вершина скачка не замкнута. Как следует из проведенных расчетов, такие скачки формируются на системе вихрей, возникающих в следе частицы, и если скорость на оси следа частицы не достигает сверхзвуковой, то вершина скачка не замкнута. В [5] также установлено, что полууглы растворов конусов возмущений с частицами в вершине меньше полууглов раствора скачков, во главе которых частиц нет. Это же подтвердили вышеописанные расчеты: фронт УВ, формирующийся на вихрях, круче конического скачка, возникающего на частице (см. рис. 1, 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Благосклонов В. И., Кузнецов В. М. и др. О взаимодействии гиперзвуковых неоднородных течений // ПМТФ.— 1979.— № 5.
2. Гриднев Н. П. Разностная схема 3-го порядка точности для расчета сложных газодинамических и магнитогидродинамических течений // Вопросы магнитной газодинамики.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1979.
3. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика.— М.: Наука, 1969.
4. Dunbar L. E., Courtney J. F., McMillen L. D. Heating augmentation in erosive hypersonic environments // AIAA J.— 1975.— V. 13, N 7. Рус. пер. // РТК.— 1975.— Т. 13, № 7.
5. Hove D. T., Smith A. A. Holographic analysis of particle-induced hypersonic bow-shock distortions // AIAA J.— 1975.— Т. 13, N 7. Рус. пер. // РТК.— 1975.— Т. 13, № 7.

Поступила 14/1 1986 г.

УДК 539.893 + 62—987/—988

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ КУМУЛИРУЮЩЕЙ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ

С. Г. Алиханов, В. П. Бахтин

(Москва)

Актуальность получения высоких давлений общеизвестна. Особенно большие успехи в этом направлении научных исследований достигнуты с помощью динамических методов, основанных на использовании мощных ударных волн, генерируемых тем или иным способом [1—4]. Однако, даже если отбросить специфические трудности, присущие этим методам, они не всегда могут быть использованы, так как во многих случаях требуется плавное (неударное) нарастание давления. Проблема получения таких давлений относительно легко решается применением магнитных полей. Так, в [5] описаны эксперименты по изэнтропическому сжатию органического стекла до 400 ГПа магнитным полем, направленным вдоль оси медной трубки, внутри которой располагался исследуемый образец. Усиление магнитного поля до величины, соответствующей давлению 400 ГПа (~10 МГс), осуществлялось путем сжатия его стальной трубой, ускоренной продуктами детонации взрывчатого вещества и расположенной коаксиально с медной трубкой. Аналогичная геометрия использовалась и в [6], где сообщается о фазовом переходе кварца в сверхплотное состояние при давлении 125 ГПа, который не наблюдался в опытах с ударными волнами. Применение ВВ в экспериментах подобного рода может тем не менее ограничить широкое распространение описанного способа создания высоких давлений. Поэтому привлекает внимание и другая возможность использования импульсных магнитных полей: сжимать исследуемое вещество оболочкой, ускоренной давлением магнитного поля электрического тока, протекающего по оболочке при разряде на нее конденсаторной батареи. Авторам [7] в цилиндрической геометрии удалось сжать газообразный гелий до давления 8 ГПа. В [8] в аналогичной геометрии получен уже более высокий результат: газообразный водород сжимался до ~20 ГПа. Однако и этот метод получения высоких давлений обладает недостатками: оболочка, некоторые части рабочей камеры и сам образец, даже если первоначально он был в твердом состоянии, разрушаются, и зафиксировать удастся лишь сам факт достижения высокого давления в образце, а не его результат. В этом смысле более выгодными могут оказаться системы с небольшим уровнем энергии

в «толкающем» элементе, в которых используется концентрация плотности энергии в передающей среде.

Цель данной работы — показать особенности, возможности и ограничения магнитно-импульсной генерации кумулирующей волны давления на конкретном примере возбуждения волны в конической полости, заполненной водой.

Если изобразить зависимость плотности энергии от давления для воды (рис. 1), воспользовавшись [9] $p = p_0[(\rho/\rho_0)^2 - 1]$ ($p_0 = 0,3$ ГПа, ρ_0, ρ — начальная и текущая плотность воды), то видно, что увеличение плотности энергии в 100 раз приводит к росту p более чем на порядок при исходном давлении, например, в 30 МПа ($p/p_0 = 0,1$). И хотя зависимость между плотностью энергии и давлением нелинейная, увеличение начального давления в импульсе сжатия может быть значительным даже при разумной концентрации энергии, что нетрудно осуществить, применив соответствующую геометрию.

Генерация и усиление волны давления в воде с помощью импульсного магнитного поля осуществлялись в устройстве, схема которого приведена на рис. 2. При разряде конденсаторной батареи (18 банок типа ИК-50-3) на однослойную катушку 1 с внутренним диаметром 30 и длиной 70 см, состоящую из 14 секций по 10 витков в каждой, включенных параллельно, магнитный поток проваливается через 2 продольные щели (не показаны) «магнитного молотка» 2 вовнутрь его. Поскольку толщина поршня 3 (дюралюминий) больше толщины скин-слоя, то магнитный поток концентрируется в зазоре, образованном торцом молотка и поршнем. Если форма торцевой поверхности молотка такова, что $r\delta = \text{const}$ (δ — величина зазора (с учетом скин-слоя) между торцом и поршнем на расстоянии r от оси системы), то магнитное поле в зазоре постоянно. В этом случае при пропускании тока через катушку поршень подвергается воздействию давления, равного $\mu_0 H^2/2$, равномерно распределенного по всей поверхности. Здесь μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, H — магнитное поле в зазоре, измерение которого проводилось магнитным зондом 4. В данном упрощенном рассмотрении пренебрегается влиянием кривизны магнитных силовых линий. Поскольку поля порядка 200 кГс (это соответствует давлению на диафрагму 160 МПа) выдерживают обычные конструкционные материалы, довольно просто создать систему с давлением 100—200 МПа вблизи поршня. В центральной области условие $r\delta = \text{const}$ не выполняется, поэтому оказалось необходимым введение внутреннего конуса 5 с диаметром основания 5 и длиной 45 см. Телесный угол для кумулирующей волны в результате этого сократится всего на 6%.

Под действием магнитного поля поршень, имеющий форму шарового сегмента радиусом 50 см и диаметром основания 20 см с центральным отверстием 5 см (для конуса), смещается, и в воде 6, заполняющей концентратор 7 с конической полостью и со сменной вставкой 8, возбуждаются импульс сжатия или волна давления со сферическим фронтом, ограниченными коническими поверхностями концентратора и конуса. Амплитуда волны и ее длина определяются в конечном счете параметрами электрической цепи и скоростью звука в воде и в принципе могут варьироваться

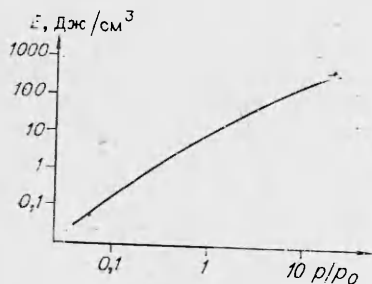


Рис. 1

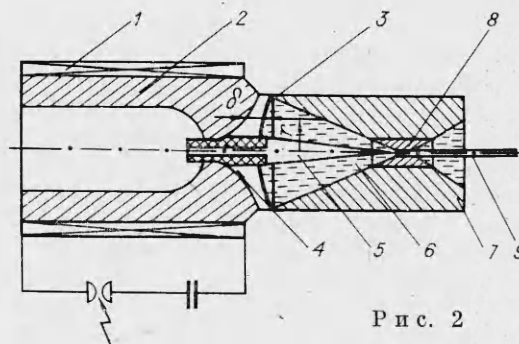


Рис. 2

в широких пределах. Поскольку при фиксированных параметрах ток через катушку всегда один и тот же, давление в волне, по крайней мере, вблизи поршня будет всегда одним и тем же, если только поршень после каждого опыта возвращается в исходное состояние, что легко осуществить конструктивно.

По мере удаления волны давления от поршня ее амплитуда увеличивается, так как за счет кумуляции растет плотность энергии в волне. Наибольшего значения давление достигает на выходе концентратора, вблизи геометрического центра кумуляции, где расположен пьезоэлектрический датчик 9.

Амплитуду волны на любом расстоянии от центра кумуляции R_1 легко оценить, зная амплитуду вблизи поршня, т. е. на расстоянии R_0 от центра. Для этого достаточно приравнять энергии импульса сжатия на расстоянии R_0 и R_1 , что предполагает слабую диссипацию. Без учета дисперсии после ряда преобразований получается соотношение

$$\frac{E_1}{E_0} \simeq 2 \frac{R_0^3 - (R_0 - \lambda)^3}{R_1^3 - (R_1 - \lambda)^3},$$

где E_0 и E_1 — плотность энергии в импульсе на расстоянии R_0 и R_1 ; λ — длина импульса сжатия. В этом соотношении учтено то обстоятельство, что при остановке волны ее плотность энергии возрастает в 2 раза, ибо кинетическая энергия импульса давления примерно равна энергии сжатия. В описываемом устройстве $R_0 = 50$ см, $\lambda \simeq 3$ см, волна останавливалась на расстояниях $R_1 = 3$ см и $R_2 = 1,5$ см, которые задавались размером отверстия под датчик давления у вставки 8 (см. рис. 2). Это отвечает кумуляции плотности энергии примерно в 300 и 500 раз и увеличению давления в 18 и 30 раз соответственно при начальной амплитуде волны давления 20 МПа согласно рис. 1.

Начальное давление в импульсе сжатия измерялось вблизи поршня тремя пьезоэлектрическими датчиками, расположенными на различных расстояниях от оси системы. В качестве чувствительного элемента в каждом датчике использовался диск из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 5 мм (или 2 мм) и толщиной 1 мм. Этот диск через свинцовые прокладки толщиной 0,5 мм механическим образом закреплялся между воспринимающим (длина 0,5 см) и согласующим (длина 30 см) латунными стержнями такого же диаметра, помещенными в медную трубку с внешним диаметром 8 мм (или 5 мм). Этим размером определялось пространственное разрешение датчиков. Временное разрешение, найденное экспериментально, 2 мкс. Более подробно конструкция датчиков описана в [10]. Формы кривых давления совпадали для всех трех расстояний, но амплитуды отличались; давление на расстоянии 3,5 см от оси в 1,3 раза меньше, чем давление на расстояниях 6 и 8,5 см, где амплитуды примерно равны. В абсолютных величинах $p(3,5) \simeq 15$ МПа, $p(6) \simeq p(8,5) \simeq 20$ МПа. Это различие обусловлено погрешностью изготовления поршня и обработки торца магнитного молотка. Однако, как будет ясно из дальнейшего, такая степень неоднородности не оказывает существенного влияния на конечный результат.

На рис. 3 приведена осциллограмма давления (кривая 1), полученная пьезодатчиком, расположенным на расстоянии 3,5 см от оси. Второй максимум давления, отстоящий от первого примерно на 45 мкс, связан с отрицательной полуволной магнитного поля. Параметры электрической цепи таковы, что разряд батареи через катушку носит периодический характер с умеренным затуханием. Осциллограмма магнитного поля в зазоре между торцом магнитного молотка и поршнем, полученная с помощью магнитного зонда, расположенного на расстоянии 4 см от оси, показана кривой 2. Длительность волны давления, согласно рис. 3, на половине амплитуды ~ 20 мкс, что соответствует эффективной длине импульса сжатия ~ 3 см ($v_{зв} \simeq 1,5$ км/с). Запаздывание максимума давления по отношению к максимуму магнитного поля обусловлено временем про-

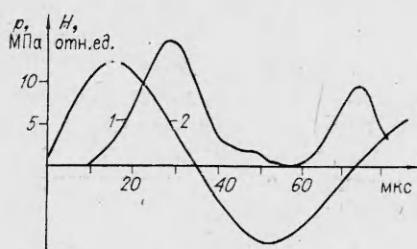


Рис. 3

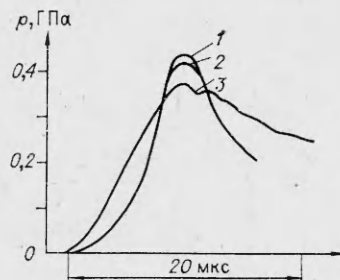


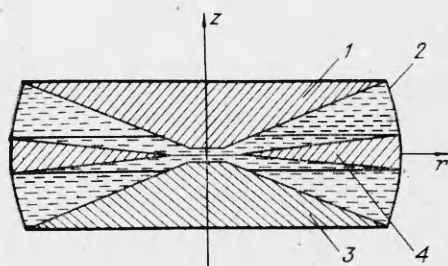
Рис. 4

хождения волны давления от поршня до торца пьезодатчика, который в данном случае располагался на расстоянии 2 см от поршня.

На рис. 4 приведена осциллограмма давления на выходе концентратора на расстоянии 3 см от центра кумуляции (кривая 3). Небольшой провал в максимуме давления обусловлен паразитными колебаниями, возбуждаемыми в пьезоэлементе резким и сильным ударом — так называемый «звон» датчика. Сигнал датчика давления увеличился в ~ 20 раз по сравнению со случаем, когда этот же датчик располагался вблизи поршня. Пьезомодуль пьезокерамики, как известно, уменьшается при росте давления, что связано с переориентацией доменов, но на основании этого нельзя делать вывод о том, что в эксперименте получено более чем 20-кратное усиление давления (30-кратное, например). Дело в том, что уменьшение пьезомодуля происходит при больших временах нагружения, при маленьких же (порядка 1 мкс) пьезомодуль ЦТС не изменяется вплоть до 1,1 ГПа [11]. В эксперименте время нарастания давления 9 мкс, что больше, чем время в [11], но измерения давления кварцевым датчиком дали тот же самый коэффициент усиления, что и пьезокерамическим. Так что пьезомодуль ЦТС, по-видимому, не изменяется и при данных временах нагружения, и можно считать, что давление, как и сигнал датчиков, увеличилось в 20 раз и равно ~ 370 МПа.

Неоднородность в распределении давления в импульсе сжатия около поршня не должна оказывать существенного влияния на величину давления на выходе концентратора, так как время распространения импульса сжатия от поршня до центра кумуляции (~ 320 мкс) гораздо больше времени распространения звука по поверхности фронта волны, и давление в импульсе сжатия успевает выравняться. Поэтому давление на выходе концентратора при неоднородном распределении его в начальном импульсе сжатия не будет сильно отличаться от случая равномерного распределения, если в последнем в качестве значения давления в импульсе сжатия вблизи поршня взять среднее по площади поршня значение неоднородного распределения. Численные расчеты подтвердили это. Расчетная кривая 2 на рис. 4 показывает временную зависимость давления на выходе концентратора на расстоянии 3 см от центра кумуляции при неоднородном распределении давления в импульсе сжатия вблизи поршня, примерно соответствующем экспериментально измеренному. Как видно, максимальная величина давления не очень сильно отличается от измеренной (линия 3). Расчетная кривая 1 изображает временную зависимость давления в импульсе сжатия на выходе концентратора для равномерного распределения его в импульсе вблизи поршня. Значение давления при этом бралось равным полученному при усреднении по площади поршня равномерно распределенного давления — 17 МПа. Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что различие в максимальных давлениях незначительно.

Следует отметить, что расчеты проводились в цилиндрической геометрии (рис. 5) с помощью разработанного ранее двумерного кода «РАДАКС» [12]. При этом полость концентратора образована двумя усеченными конусами 1 и 3, поршень 2 представлял собой шаровой слой ра-



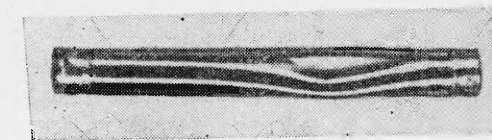
Р и с. 5

адекватность расчетной и экспериментальной схем незначительна, ибо средние давления в том и в другом случае отличаются совсем мало. Именно поэтому существует совпадение между расчетной и экспериментальной зависимостями давления в импульсе сжатия от времени на выходе концентратора.

Для увеличения начального давления без изменения параметров контура был уменьшен зазор между поршнем и торцом молотка. Степень неоднородности распределения давления магнитного поля по поршню при этом выросла, а среднее давление вблизи поршня увеличилось до 30 МПа. Вставка 8 (см. рис. 2) заменилась на другую, с меньшим диаметром отверстия, что позволило останавливать импульс давления на расстоянии 1,5 см от центра кумуляции. Максимальное давление, измеренное в такой геометрии, ~ 1 ГПа, т. е. получено более чем 30-кратное усиление одиночного импульса давления. Заметим, что передний фронт этого импульса укрутился в 7 раз по сравнению с его первоначальным значением вблизи поршня, в то время как на расстоянии 3 см от центра кумуляции фронт укручивается всего лишь в 2 раза.

При размещении на выходе концентратора какого-либо образца последний будет подвергаться воздействию усиленного импульса давления. Ясно, что если образец изготовлен из материала с более низкой, чем у воды, сжимаемостью, то давление в нем будет примерно равно давлению в воде в непосредственной близости от образца (предполагается, что длительность импульса больше времени распространения звука по образцу). Сложнее обстоит дело с образцом, обладающим высокой сжимаемостью (например, газ в тонкой упругой оболочке). Здесь однозначного ответа на вопрос о величине давления в образце уже нет, и в каждом конкретном случае необходимы соответствующие численные расчеты. В экспериментах сделана попытка воздействовать давлением в 1 ГПа на трубочку из нержавеющей стали с внешним диаметром 4 мм и толщиной стенки 0,5 мм. Трубка деформировалась, правда, несимметрично (рис. 6), что обусловлено развитием неустойчивости Лаврентьева — Ишлинского с модой $k = 2$. Таким образом, рассмотренная схема позволяет осуществлять сжатие и «мягких» материалов.

Для получения более высоких давлений необходимо увеличить давление на поршень и изменить геометрию концентратора с тем, чтобы увеличить степень кумуляции энергии. При этом не следует забывать, что более высокое начальное давление в импульсе сжатия приведет к быстрому укручению переднего фронта импульса и последний превратится в ударную волну. Чтобы избежать этого, можно либо увеличить длину волны давления, либо в качестве передающей среды использовать не воду, а более жесткий материал (например, галлий, который уже при 30°C находится в жидком состоянии). При применении галлия необходимость в поршне, естественно, отпадает, что упрощает конструкцию системы. Поскольку сжимаемость металлов гораздо меньше сжимаемости воды, то увеличение началь-



Р и с. 6

диусом 50 см, а кольцо 4 с коническими поверхностями имитировало внутренний конус 5 (см. рис. 2). Ясно, что для однородного распределения давления вблизи поршня расчетная и экспериментальная схемы идентичны, а для неоднородного — нет: в расчетной схеме неоднородность задается в направлении оси z , в экспериментальной (см. рис. 2) давление зависит от расстояния до оси симметрии. Однако данная не-

ного давления на порядок (до 300 МПа) при сохранении длины его волны приведет к увеличению давления вблизи центра кумуляции тоже примерно на порядок, ибо при этих условиях эволюция волны будет происходить подобным образом. Другими словами, уже сейчас вполне реальна система для создания высоких давлений на основе описанной выше схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б. и др. Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений // ЖЭТФ.— 1960.— Т. 38, вып. 3.
2. Альтшулер Л. В., Калиткин Н. Н. и др. Ударные адиабаты при сверхвысоких давлениях // ЖЭТФ.— 1977.— Т. 72, вып. 1.
3. Фортов В. Е. Динамические методы в физике плазмы // УФН.— 1982.— Т. 138, вып. 3.
4. Аврорин Е. Н., Водолага Б. К. и др. Ударная сжимаемость свинца, кварцита, алюминия, воды при давлении ~ 100 Мбар // Письма в ЖЭТФ.— 1980.— Т. 31, вып. 12.
5. Hawke V. S., Duere D. E. et al. Method of isentropically compressing materials to several megabars // J. Appl. Phys.— 1972.— V. 43, N 6.
6. Павловский А. П., Колокольчиков Н. П. и др. Изэнтропическое сжатие кварца давлением сверхсильного магнитного поля // Письма в ЖЭТФ.— 1977.— Т. 27, вып. 5.
7. Alikhanov S. G., Bakhtin V. P. et al. High-pressure generation by means of pulsed magnetic fields // High-Pressure Science and Technology: Proc. 6th AIRAPT Conf.— N. Y.; L.: Plenum-Press, 1979.— V. 2.
8. Прут В. В., Храбров В. А. и др. Метод металлического z-пинча: изэнтропическое сжатие водорода // Письма в ЖЭТФ.— 1979.— Т. 29, № 1.
9. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений— М: Физматгиз, 1963.
10. Alikhanov S. G., Bakhtin V. P. A piezoelectric pressure bar gauge with mechanical sandwiching of the piezoelement // J. Phys. E: Scient. Instr.— 1983.— V. 16.— P. 615.
11. Reynolds C. E., Seay G. E. Two-wave shock structure in the ferroelectric ceramics barium titanate and lead zirconate titanate (PZT) // J. Appl. Phys.— 1962.— V. 33, N 7.
12. Алиханов С. Г., Бахтин В. П. Использование $m = 0$ неустойчивости для трехмерного сжатия плазмы // ДАН СССР.— 1982.— Т. 263, вып. 2.

Поступила 20/1 1986 г.

УДК 532.59

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЗАДАЧ КЛАССИЧЕСКОЙ И ОБРАТНОЙ КУМУЛЯЦИИ

К. Ях

(Варшава)

Явление образования кумулятивной струи хорошо известно. Однако процесс этот настолько сложный, что он будет еще долго предметом многих исследований. Данная работа имеет теоретический характер. Результаты, представленные в ней, получены при помощи численного метода, который может быть полезным при изучении кумулятивных явлений.

Впервые теория образования кумулятивной струи предложена М. А. Лаврентьевым [1] и независимо Г. Биргхоффом [2]. Позднее эта теория рассматривалась рядом ученых и была дополнена новыми элементами (учет упругопластических свойств материала, обратная кумуляция и др.) [3—6]. Развитие численных методов выявило новые возможности для исследования кумулятивных процессов. С их помощью можно пытаться решить общую задачу двумерного неустановившегося процесса. Первые двумерные расчеты кумулятивного процесса приведены в [7]. В [8] дан пример расчета, в котором учитывается влияние процесса распространения детонационной волны ВВ на кумулятивную облицовку. В данной работе численные эксперименты выполнены при помощи оригинального метода, построенного в Институте физики плазмы и лазерного микросинтеза.

Физико-математическая постановка задачи. На рис. 1 показана общая схема кумулятивного заряда. Поведение ВВ и облицовки можно