

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ МАГНИТНОЙ КУМУЛЯЦИИ

С. Д. Гилёв

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, 630090 Новосибирск, gilev@hydro.nsc.ru

С целью исследования механизма ударно-волновой магнитной кумуляции проведены эксперименты с порошками алюминия, меди и кремния. Для всех исследованных веществ зависимость магнитного поля от площади полости описывается степенной зависимостью с постоянным показателем  $\alpha$ . Найденный показатель  $\alpha$  существенно зависит от пористости вещества и размера частиц. Для порошков меди, кремния, а также мелкого алюминиевого порошка показатель  $\alpha$  соответствует отношению массовой скорости  $u$  к волновой  $D$ , как и предсказывается простой моделью магнитной кумуляции. Для пудры и крупного алюминиевого порошка показатель  $\alpha$  заметно меньше отношения  $u/D$ . Меньшая эффективность магнитного сжатия объясняется недостаточно высокой электропроводностью (пудра) и возникновением проводимости при неполном сжатии вещества (крупный порошок). В первом случае заметными являются диффузионные потери магнитного потока в сжатом веществе. Во втором случае работу против сил магнитного поля совершает слой в области ударного перехода, обладающий меньшей массовой скоростью. Механизм магнитной кумуляции состоит в металлизации вещества при ударном сжатии и вытеснении части магнитного потока в непроводящую область перед ударным фронтом. Известный по литературе двухступенчатый механизм кумуляции (металлизация в упругом предвестнике, «дожатие» поля в основной волне) не находит подтверждения в экспериментах по измерению массовой и волновой скорости, электропроводности и в опытах по магнитной кумуляции.

Ключевые слова: магнитная кумуляция, ударная волна, модель магнитного сжатия, мегагауссные магнитные поля, электрическая проводимость, металлизация.

### ВВЕДЕНИЕ

Ударно-волновая кумуляция магнитного поля является методом получения сверхсильных магнитных полей и высоких плотностей электромагнитной энергии [1–19]. Метод основан на свойстве большой группы материалов приобретать высокую электрическую проводимость при ударном сжатии. Сходящаяся система ударных волн в таком веществе способна осуществлять захват магнитного потока и его эффективную кумуляцию. Метод ударно-волновой кумуляции имеет ряд преимуществ по сравнению с известными методами: упрощение системы инициирования и создания начального магнитного поля, повышение устойчивости процесса сжатия, защита области измерений и т. д. В экспериментах с высокопористым алюминием зарегистрировано магнитное поле  $\approx 3.5$  МГс [10–12], что соответствует плотности электромагнитной энергии  $\approx 5 \cdot 10^4$  Дж/см<sup>3</sup> и магнитному давлению

$\approx 50$  ГПа. Первые исследования по этому методу проведены в Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (Россия) и университете г. Кумамото (Япония). Дальнейшее изучение различных аспектов ударно-волновой магнитной кумуляции [20–28] внесло важный вклад в обоснование метода. Существенным для понимания возможностей техники явился вывод об отсутствии роста коротковолновых возмущений ударного фронта [24].

В первых исследованиях [3, 4, 6, 8, 10–12] основные усилия были сосредоточены на получении максимальных магнитных полей и теоретическом анализе кумуляции в простейших модельных постановках. При этом, поскольку параметры состояния вещества были неизвестны, эксперименты и модельные задачи оказались не связаны между собой. Предложенная в [3–8] модель магнитной кумуляции основывается на ряде допущений: 1) сжимаемость вещества не зависит от давления ударной волны, 2) электропроводность вещества появляется непосредственно после сжатия в ударном фронте, постоянно по толщине слоя и не зависит от давления ударной волны, 3) электропро-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-02-16398).

водность ударно-сжимаемого вещества столь велика, что диффузионные потери магнитного потока в сжимаемой области пренебрежимо малы. Такая модель приводит к простой зависимости магнитного поля от площади сжимаемой области

$$B(t) = B_0 \left( \frac{S_0}{S(t)} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где  $B_0$  — начальное магнитное поле,  $S_0$  — начальная площадь области,  $S(t)$  — площадь области в момент времени  $t$ ,  $\alpha$  — коэффициент, равный для рассматриваемой модели отношению массовой скорости  $u$  к волновой  $D$ .

Экспериментальные исследования магнитной кумуляции, представленные в работах [5, 13], дали ожидаемые результаты лишь для порошка кремния. Для металлических порошков (особенно тяжелых) регистрируемый сигнал не описывался моделью. В качестве возможных причин расхождения в [13] отмечены неравновесность магнитного поля внутри металлической частицы и вне ее, а также электрический пробой перед ударным фронтом. Поскольку предложенная модель не учитывает влияния сжимаемости, электропроводности и динамики движения волны, справедливость модели для реальных материалов не ясна. При сжатии цилиндрической ударной волны скорость фронта может увеличиваться в несколько раз, а ударное давление — на порядок величины. Трудно ожидать *a priori*, что в таких условиях сжимаемость и электропроводность останутся постоянными. С другой стороны, предположение о запаздывании появления проводимости по сравнению с ударным сжатием также не имеет надежного обоснования. При ударном сжатии металлического порошка заметная проводимость может возникать в зоне ударного перехода при неполном сжатии вещества. Для разрушения тонких оксидных пленок на поверхности металлических частиц может потребоваться малое сжатие вещества.

Модель [3–8] явилась первой попыткой описания ударно-волновой магнитной кумуляции. Позднее было предложено несколько более сложных моделей [9, 14, 18, 20, 21, 23, 25–27]. Они сводятся к МГД-уравнениям, дополненным уравнением состояния вещества и законом изменения электропроводности при сжатии и нагреве. Такие модели являются более содержательными, чем [3–8], и в принципе дают более точное описание магнитного сжатия.

Вместе с тем подбор констант уравнения состояния вещества является достаточно сложной задачей, поэтому подобные модели также нуждаются в серьезном обосновании и экспериментальной проверке. Существенно, что известные модели не учитывают ряд особенностей рабочих материалов (зернистый характер вещества, механизм разрушения оксидного слоя, динамика роста электропроводности и т. д.) и поэтому не могут дать описание возможных физических явлений. В настоящее время физически обоснованная модель ударно-волновой магнитной кумуляции отсутствует. Построение такой модели необходимо для понимания механизма ударно-волновой кумуляции, физических процессов при кумуляции и предельных возможностей метода. Модель [3–8] отличается крайней простотой, отсутствием «подгоночных» констант и максимально доступна для проверки. По этим причинам она выбрана для сравнения с результатами экспериментов.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процесса ударно-волновой магнитной кумуляции в перспективных материалах и сравнение опытных данных с простой моделью магнитной кумуляции [3–8]. Нас интересовала возможность использования модели для описания процесса магнитного сжатия в реальных веществах. Для решения поставленной задачи использовались новые данные об электропроводности и ударной сжимаемости алюминиевых порошков [29, 30].

Эксперименты по ударно-волновой магнитной кумуляции проводились с материалами, основные характеристики которых приведены в табл. 1. Использовались алюминиевая пудра ПАП-1, ПАП-2, отдельные фракции полидисперсного алюминиевого порошка ПА-4, а также порошки кремния и меди.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО МАГНИТНОЙ КУМУЛЯЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ОБРАБОТКИ

Для исследования процесса ударно-волновой магнитной кумуляции использовались две основные схемы. В первой схеме (рис. 1) инициатор посредством шести отрезков пластического взрывчатого вещества (ВВ) возбуждает детонацию в точках А пластического ВВ, имеющего форму кольца (диаметр 210 мм). Детонация распространяется по пластическому ВВ, далее по 12 цилиндрическим каналам, заполненным ВВ, и основному заряду ВВ в виде ци-

Таблица 1

Характеристики рабочих веществ

Порошок	Обозначение	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Форма частиц	Размер частиц, мкм
Алюминиевая пудра ПАП-1	Al-1	0.5	Пластинки	≈20; ≈1
Алюминиевая пудра ПАП-2	Al-2	0.37	—//—	≈20; ≈1
Алюминиевый порошок	Al-3*	1.64	Сферическая	<50
Алюминиевый порошок	Al-4*	1.4	—//—	63 ÷ 100
Алюминиевый порошок	Al-5*	1.37	—//—	100 ÷ 160
Кремниевый порошок	Si**	1.16	Квазисферическая	1 ÷ 30
Медный порошок ПМА	Cu	1.68	—//—	20 ÷ 50

Примечания. \* Порошки получены разделением на фракции алюминиевого порошка ПА-4.

\*\* Порошок получен разломом поликристаллического кремния КП-1.

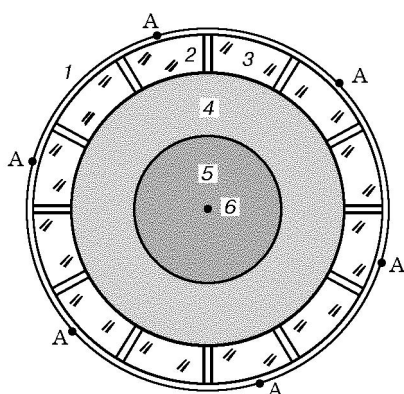


Рис. 1. Схема эксперимента по ударно-волновой магнитной кумуляции в квазицилиндрической геометрии (разрез устройства):

А — точки иницирования, 1 — пластиковое ВВ, 2 — цилиндрические каналы, заполненные ВВ (12 каналов равномерно по кругу), 3 — форма из оргстекла, 4 — основное ВВ, 5 — исследуемый порошок, 6 — индуктивный датчик

линдра (внешний диаметр 130 ÷ 140 мм). Внутри цилиндрической полости (диаметр 50 ÷ 63 мм, высота 50 мм) располагается исследуемый порошок. На оси системы находится индуктивный датчик (диаметр 5 ÷ 6 мм), напряжение с которого регистрируется осциллографом. На форму из оргстекла 3, содержащую заряд ВВ и исследуемый порошок, с обеих сторон накладываются катушки Гельмгольца, выполненные в виде медных пластин. Диаметр полости в пластинах 100 мм, расстояние между пластинами 70 мм. Конденсаторная батарея (максимальная энергия 80 кДж) разряжается на ка-

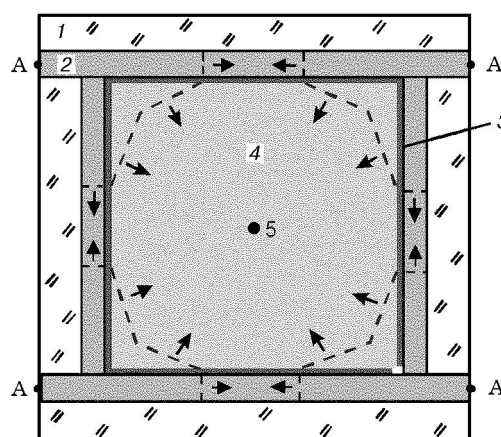


Рис. 2. Схема эксперимента по ударно-волновой магнитной кумуляции с использованием генератора квадратной геометрии (разрез устройства):

А — точки иницирования, 1 — форма из оргстекла, 2 — ВВ, 3 — медный лайнер, 4 — порошок, 5 — индуктивный датчик; штриховой линией показано положение ударного фронта в порошке при детонации ВВ

тушки; протекающий ток создает в порошке поперечное магнитное поле. При детонации заряда ВВ в исследуемом порошке генерируется квазицилиндрическая ударная волна.

Во второй схеме (рис. 2) используется генератор квадратного сечения, применявшийся в [10–12]. Одновременное иницирование заряда ВВ в точках А создает систему детонационных волн, движущихся вдоль медного лайнера. Лайнер имеет квадратное сечение (сторона 126 мм, высота 50 мм, толщина 2 мм) и раз-

рез в одном из углов для создания начального магнитного поля в порошке. Скользящая детонационная волна ускоряет лайнер. После смыкания детонационных волн в порошке образуется система ударных волн, близкая к правильному восьмиугольнику. Начальное магнитное поле создается накладными катушками Гельмгольца. Индуктивный датчик находится на оси системы. Поскольку схема имеет большую перестройку сжимаемой полости, диапазон изменения напряжения с датчика также большой. Поэтому на осциллографе регистрировалось напряжение с выхода интегрирующей РС-цепочки.

На рис. 3 приведены характерные записи

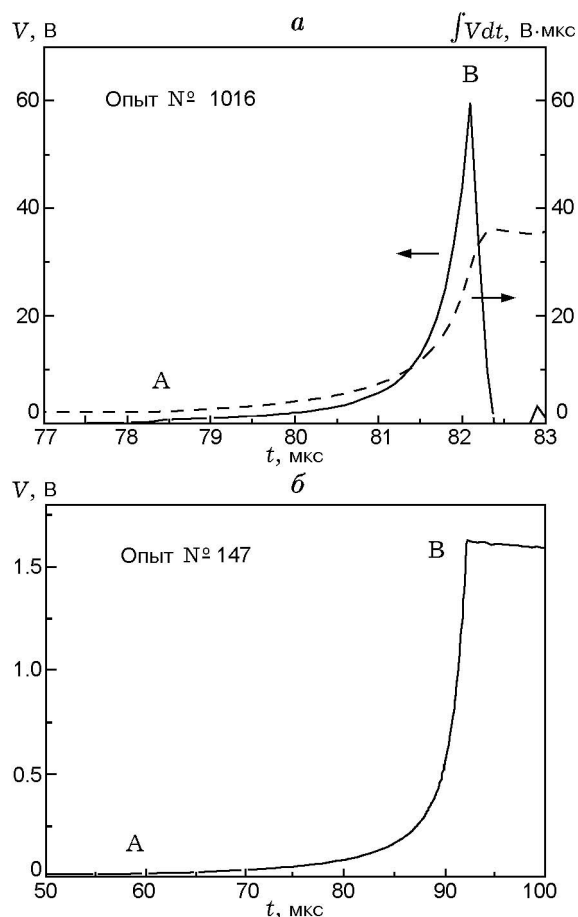


Рис. 3. Запись напряжения в опытах с использованием первой (а) и второй (б) измерительных схем:

а — алюминиевая пудра ПАП-2, сплошная линия — напряжение с датчика, штриховая — результат интегрирования; б — алюминиевая пудра ПАП-1; А — начало магнитного сжатия, В — приход ударной волны на измерительный узел

напряжения  $V(t)$ , полученные с использованием первой и второй экспериментальных схем. Для первой схемы регистрируемое напряжение  $V(t)$  пропорционально производной магнитного поля, для второй — магнитному полю на оси системы. На рис. 3, а показан также результат численного интегрирования напряжения, который пропорционален магнитному полю.

Экспериментальная зависимость  $V(t)$  обрабатывалась с целью нахождения основной характеристики магнитного сжатия — показателя степени  $\alpha$  в модельной зависимости магнитного поля (1). В предположении, что зависимость (1) справедлива, скорость ударной волны постоянна и область сжатия имеет цилиндрическую форму, можно получить соотношения

$$B / \frac{dB}{dt} = \frac{\tau}{2\alpha} - \frac{t}{2\alpha}, \quad (2)$$

$$\ln \frac{B}{B_0} = 2\alpha \ln \left( 1 - \frac{t}{\tau} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\tau$  — время от возникновения проводящей полости до падения ударной волны на ось системы. Соотношения (2), (3) дают возможность из записи напряжения  $V(t)$  определить показатель  $\alpha$ . Так, из (2) следует, что отношение  $B/(dB/dt)$  линейно зависит от времени, а коэффициент линейной зависимости определяется показателем  $\alpha$ . На рис. 4, а показан результат обработки экспериментов, выполненных по первой схеме, в переменных  $(B/(dB/dt), t)$ . Для этого использовалась экспериментальная зависимость  $V(t)$  (пропорциональная  $dB/dt$ ) и результат ее численного интегрирования по времени (пропорциональный  $B$ ). Как видно из рис. 4, а, на фазе магнитного сжатия (интервал АВ) экспериментальные данные хорошо соответствуют линейной зависимости (2). Это позволяет определить как эффективный показатель степени  $\alpha$ , так и время магнитного сжатия  $\tau$ .

Соотношение (3) использовалось при обработке данных экспериментов, выполненных по второй схеме. В этом случае входной информацией является интеграл от напряжения на датчике, пропорциональный магнитному полю в полости. Уравнение (3) менее удобно для нахождения  $\alpha$ , поскольку время  $\tau$  неизвестно. В качестве первого приближения для нахождения  $\tau$  можно использовать среднюю скорость ударной волны при ее движении до датчика.

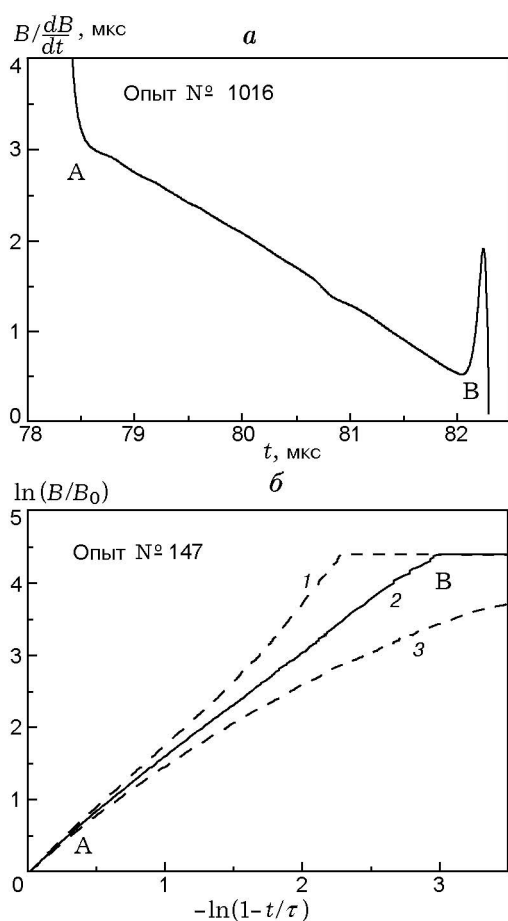


Рис. 4. Обработка экспериментальных записей напряжения для первой (а) и второй (б) измерительных схем:

а — алюминиевая пудра ПАП-2, б — алюминиевая пудра ПАП-1,  $\tau = 37$  (1), 35 (2), 33 мкс (3); А — начало магнитного сжатия, В — приход ударной волны на измерительный узел

Эта скорость находится по экспериментальному времени кумуляции  $\tau_e$  (от момента замыкания полости до прихода ударной волны на датчик). Практически можно получить несколько большую точность, рассматривая  $\tau$  как параметр для представления экспериментальных данных в переменных  $(\ln B/B_0, -\ln(1-t/\tau))$  и используя небольшую вариацию  $\tau$ . На рис. 4, б показаны результаты обработки экспериментальных данных с использованием соотношения (3) для трех значений  $\tau$ . Вариация параметра  $\tau$  приводит к отклонению результата обработки в переменных  $(\ln B/B_0, -\ln(1-t/\tau))$  от прямой линии для моментов времени перед приходом ударной волны на датчик. Подбор значения  $\tau$ , обеспечивающего максималь-

ную протяженность линейного участка кривой (кривая 2 на рис. 4, б), проводился в предположении, что процесс кумуляции описывается уравнением (3). Найденное таким образом время  $\tau$  целиком соответствует соотношению (3). Показатель  $\alpha$  находится по наклону полученной зависимости в интервале времен АВ. Использование двух способов обработки для первой экспериментальной схемы дает близкие результаты, что свидетельствует о допустимости описанной процедуры выбора параметра  $\tau$ . Вместе с тем процедура обработки, основанная на (2), предпочтительнее, поскольку в этом случае отсутствуют какие-либо свободные параметры.

Экспериментальные данные, полученные в экспериментах по ударно-волновой кумуляции с различными порошками, показаны в табл. 2. Приведена информация об использованной схеме измерений, взрывчатом веществе, начальном диаметре области сжатия, начальном магнитном поле  $B_0$ , зарегистрированном коэффициенте усиления поля  $B/B_0$  (максимальное усиление и значение, соответствующее приходу ударной волны на измерительный узел), времени магнитного сжатия  $\tau_e$  (определялось от начала магнитного сжатия до прихода волны на датчик), средней волновой скорости  $D_m$  (определялась по расстоянию до оси и  $\tau$ ), расчетной волновой скорости  $D_c$  при вхождении ударной волны в порошок (находилась по методу ударных импедансов). Здесь же показаны полученные из обработки значения  $\tau$  и  $\alpha$ . Из таблицы видно, что найденное время  $\tau$ , как правило, превышает экспериментальное время магнитного сжатия  $\tau_e$ . Это обусловлено конечным размером регистрирующего датчика. Типичная погрешность определения показателя  $\alpha$  составляет 0.02.

Найденные значения показателя  $\alpha$  приведены на рис. 5 в зависимости от скорости ударной волны  $D_m$ . Здесь же представлена зависимость отношения  $u/D$  от скорости ударной волны  $D$ . Отношение  $u/D$  получено из известных ударных адиабат порошков [9, 30–33]. Как видно из рис. 5, показатель  $\alpha$  в опытах с алюминиевой пудрой Al-1, Al-2 по первой схеме заметно ниже отношения  $u/D$ . Настоящий результат может быть связан как с несовершенством взрывной системы (свидетельство этому — разброс данных опытов, проведенных в одинаковых условиях), так и с влиянием электропроводности ударно-сжатого ве-

Таблица 2

Результаты экспериментов по магнитному сжатию

Материал	Опыт	Схема	ВВ	Диаметр, мм	$B_0$ , Тл	$B/B_0$ <sup>1</sup>	$\tau_e$ , мкс	$\tau$ , мкс	$D_m$ , км/с	$D_c$ , км/с	$\alpha$
Al-1	1 017	1	ТГ	50	0.53	31(22)	4.4	5.0	4.7	4.7	0.75
	1 022	1	Т	50	$\approx 0.5$	9.1(8.2)	6.0	6.3	3.4	3.9	0.7
	147	2	ТГ	126 <sup>2</sup>	2.7	97 $\pm$ 8	33.3	35	1.6	3.1	0.74
	149	2	ТГ	126 <sup>2</sup>	2.8	86	39.7	41	1.4	3.1	0.68
Al-2	818	1	ТЭн	63	$\approx 0.5$	41	8.8	9.3	3.4	3.1	0.63
	819	1	ТЭн	63	0.63	39(20)	8.4	9.1	3.3	3.1	0.67
	1 016	1	ТГ	50	0.44	18(14)	3.6	4.4	5.3	4.9	0.68
	1 019 <sup>3</sup>	1	ТГ	50	$\approx 0.5$	11(9.3)	4.6	5.6	4.5	4.9	0.71
Al-3	821	1	ТЭн	63	0.54	13(8.2)	8.8	9.4	3.2	3.3	0.42
Al-4	820	1	ТЭн	63	0.6	11(6.6)	9.4	9.6	3.1	3.1	0.31
Al-5	1 020	1	ТГ	50	$\approx 0.5$	7.4(4.9)	4.6	5.2	4.5	5.0	0.36
Si	1 024	1	ТГ	50	0.58	21(14)	4.5	4.9	5.1	5.2	0.54
Cu	1 023	1	ТГ	50	0.44	21(18)	6.8	8.1	3.1	3.6	0.73

Примечания. ТГ — сплав тротил — гексоген 50/50, Т — литой тротил.

<sup>1</sup>Максимальное усиление и значение, соответствующее приходу ударной волны на датчик (в скобках).

<sup>2</sup>Сторона квадратной области сжатия.

<sup>3</sup>Между зарядом ВВ и порошком расположены два слоя медной фольги толщиной 50 мкм.

щества. Пудра Al-1 имеет меньшую ударную сжимаемость, однако больший показатель  $\alpha$ , чем пудра Al-2. Этот результат, противоречивый с точки зрения модели (1), качественно можно объяснить влиянием электропроводности ударно-сжатого вещества. Согласно [29, 30] электропроводность более плотной пудры Al-1 выше. В модели (1) электропроводность рабочего вещества полагается бесконечно большой. Конечная электропроводность приводит к снижению эффективности ударно-волновой магнитной кумуляции. Опыты с использованием второй экспериментальной схемы (две левые точки) дали значение коэффициента  $\alpha$ , близкое к  $u/D$ . Можно выделить две причины, которые привели к такому результату. Во-первых, применение медного лайнера во второй схеме уменьшило диффузионные потери магнитного потока. Во-вторых, меньшее ударное давление в пудре (созданное скользящей детонационной волной) благоприятно влияет на электропроводность ударно-сжатого вещества. Действительно, согласно [29, 30] понижение давления (до порогового уровня) приводит к росту электропроводности.

Для порошков меди, кремния, а также мелкого алюминиевого порошка Al-3 согласие между  $\alpha$  и  $u/D$  хорошее. В то же время для крупных алюминиевых порошков Al-4, Al-5 значения  $\alpha$  и  $u/D$  существенно расходятся. Основываясь на величине плотности порошков, можно утверждать, что отношение  $u/D$  для порошков Al-4, Al-5 должно располагаться между кривыми 5 и 6, соответствующими плотностям 1.35 и 1.6 г/см<sup>3</sup> (см. рис. 5). В то же время экспериментальные значения  $\alpha$  для порошков Al-4, Al-5 располагаются существенно ниже кривой 6. Это означает, что для крупных порошков показатель  $\alpha$  заметно меньше отношения  $u/D$ . Обнаруженное поведение может быть объяснено особенностью структуры ударно-индуцированной волны проводимости в металлическом порошке. Эксперименты с электромагнитным электродным датчиком [30] показывают, что для крупного алюминиевого порошка заметная проводимость возникает в зоне ударного перехода при неполном сжатии вещества. По-видимому, этот результат обусловлен разрушением тонких оксидных пленок на поверхности металлических частиц при малом

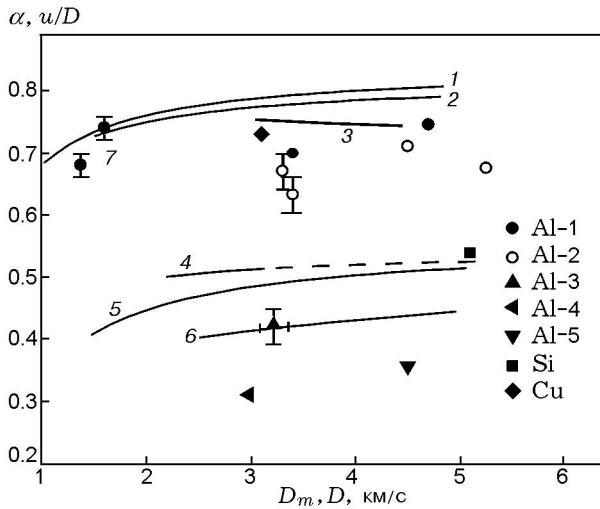


Рис. 5. Зависимость показателя  $\alpha$  от средней скорости ударной волны  $D_m$  (экспериментальные точки) и зависимость отношения  $u/D$  от скорости ударной волны  $D$  для порошков (кривые 1–6):

1 — Al-2, 0.37 г/см<sup>3</sup>, 2 — Al-1, 0.5 г/см<sup>3</sup> [30], 3 — медь, 1.64 г/см<sup>3</sup> [31], 4 — кремний, 1.18 г/см<sup>3</sup> (сплошная кривая — оригинальные данные, штриховая — аппроксимация в область больших ударных скоростей) [9], 5 — алюминий, 1.35 г/см<sup>3</sup> [32], 6 — алюминий, 1.6 г/см<sup>3</sup> [33]; 7 — экспериментальные данные для второй схемы

уплотнения. Тем самым в процессе магнитного сжатия работу против сил магнитного поля совершает слой с меньшей массовой скоростью и эффективность магнитной кумуляции уменьшается.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют, что степенная зависимость (1) с постоянным показателем  $\alpha$  выполняется достаточно хорошо для всех исследованных материалов. Вместе с тем лишь для порошков меди, кремния, а также мелкого высокопроводящего порошка Al-3 показатель степени  $\alpha$  соответствует отношению  $u/D$ , как предсказывается простой моделью [3–8]. Для пудры Al-1, Al-2 на эффективность сжатия может влиять величина электропроводности. Конечная электропроводность приводит к диффузионным потерям магнитного потока, которые существенны на начальной и конечной стадиях магнитного сжатия.

В начале кумуляции проводящий слой тонкий, электрическое сопротивление слоя вели-

ко. Время, при котором не сказывается конечная электропроводность вещества, можно оценить исходя из электротехнической модели кумуляции [1]. Такой подход дает условие генерации  $u/D \gg R/\dot{L}$  ( $R$  — сопротивление слоя,  $\dot{L}$  — производная от индуктивности по времени), из которого получается соотношение  $t \gg 1/\mu_0\sigma u(D-u)$  ( $\sigma$  — электропроводность ударно-сжатого вещества,  $\mu_0$  — магнитная постоянная вакуума). Для опытов с пудрой ПАП-2 ( $D \approx 4.9$  км/с,  $u \approx 3.9$  км/с,  $\sigma \approx 5 \cdot 10^3$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup> [30]) оценка дает значение  $t \gg 0.5$  мкс. Поскольку для первой схемы полное время кумуляции  $\tau$  составляет  $4 \div 10$  мкс, электропроводность влияет на генерацию поля в этих экспериментах.

Уравнения Максвелла для цилиндрической ударной волны вместе с непрерывностью магнитного и электрического полей приводят к соотношению на ударном фронте

$$\frac{r}{2} \frac{\partial B}{\partial t} \Big|_{r=r_f} = uB + \frac{1}{\mu_0\sigma} \frac{\partial B}{\partial r} \Big|_{r=r_f}, \quad (4)$$

где  $r_f$  — радиус фронта волны. При большом времени сжатия растет градиент магнитного поля в проводящем веществе и становятся заметными диффузионные потери магнитного потока, даваемые вторым слагаемым в (4).

Распределение магнитного поля в сжатом веществе для бесконечной электропроводности имеет вид (без учета гидродинамической кумуляции)

$$B(x, t) = B_0 \left( 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{x}{R_0(1-\alpha)} \right)^{-2\alpha},$$

$$0 \leq x \leq (D-u)t.$$

Здесь  $x$  — координата, отсчитываемая от фронта ударной волны в сжатом веществе,  $R_0$  — начальный радиус полости.

Для оценки радиуса, на котором влияние диффузионных потерь магнитного потока становится заметным, сравним два слагаемых в правой части уравнения (4). Таким образом можно получить оценку радиуса, при котором диффузионные потери сравниваются с конвективными:

$$r_* \approx \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\mu_0\sigma u}. \quad (5)$$

При дальнейшем движении ударной волны магнитная кумуляция продолжается, но становится менее эффективной из-за влияния диффузионных потерь. Подстановка характерных величин для проведенных опытов с пудрой ( $D \approx 4.9$  км/с,  $u \approx 3.9$  км/с,  $\sigma \approx 5 \cdot 10^3$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>) дает значение  $r_* \approx 3$  мм. Соотношение (5) представляет собой оценку сверху для радиуса  $r_*$ . Гидродинамическая кумуляция приводит к росту массовой скорости в ударной волне. Решение автомодельной задачи с кубическим уравнением состояния при перестройке радиуса ударного фронта  $R_0/r_f = 100$  дает увеличение массовой скорости в 3.8 раза [34]. При росте массовой скорости соответственно уменьшается  $r_*$ .

Эксперименты показали, что эффективная кумуляция магнитного поля возможна лишь при использовании мелкого порошка. Размер частиц  $a$  (определяющий собой толщину зоны ударного перехода) должен быть меньше толщины скин-слоя в металлизующемся при ударном сжатии веществе. Для одномерного случая толщина скин-слоя в ударной волне равна  $x_* = 1/\mu_0\sigma(D - u)$  [30]. Таким образом, условие на размер частицы имеет вид

$$a < 1/\mu_0\sigma(D - u). \quad (6)$$

В этом случае время диффузии магнитного поля в зоне ударного перехода меньше времени конвекции вещества через зону перехода; магнитные поля внутри проводящей частицы и вне ее совпадают. Для характерных параметров опытов такая оценка дает значение  $a < 800$  мкм для высокопористых порошков (Al-1, Al-2) и  $a < 70$  мкм для низкопористых порошков (Al-3, Al-4, Al-5). Таким образом, соотношение (6) не выполняется для порошков Al-4, Al-5, продемонстрировавших в эксперименте меньшую эффективность магнитного сжатия.

Оценка (6) не учитывает фазу возникновения проводимости вещества при ударном сжатии. Если проводимость появляется в зоне ударного перехода при слабом сжатии, то область скин-слоя соответствует малой массовой скорости вещества и эффективность магнитной кумуляции снижается. Если проводимость возникает в зоне ударного перехода при сильном сжатии (или вне зоны ударного перехода), то магнитная кумуляция эффективна. К сожалению, в настоящее время модель, предсказывающая фазу возникновения макропроводимости

при сжатии гранулированной среды, отсутствует.

В целом полученные экспериментальные результаты подтверждают предложенный в [4] механизм ударно-волновой магнитной кумуляции для металлизующихся полупроводников и порошков металлов. Ударное сжатие вещества сопровождается захватом части магнитного потока металлизующимся веществом. Этот поток остается в сжатом веществе и теряется для процесса кумуляции поля. Другая часть потока выталкивается в область перед ударным фронтом и используется для дальнейшей генерации поля.

Настоящий механизм кумуляции «работает» в экспериментах, отличающихся уровнем конечного магнитного поля. Для первой экспериментальной схемы конечное магнитное поле составило до 25 Тл, для второй схемы — около 250 Тл. Несмотря на существенное различие в конечном магнитном поле, значения показателя  $\alpha$  для разных экспериментальных постановок оказались близкими. Это свидетельствует о возможности использования модели (1) в ближнем мегагауссном диапазоне магнитных полей.

Использование метода ударно-волновой магнитной кумуляции ограничено необходимостью выполнения двух противоречивых требований. С одной стороны, электропроводность ударно-сжимаемого вещества должна быть высока (для этого необходимо использовать достаточно плотные среды). С другой стороны, кумуляция эффективна для сильносжимаемых сред (поэтому необходимо использовать высокопористые вещества). Это обстоятельство определяет практические возможности метода. Для высокопористых металлических порошков наиболее серьезным ограничением является величина электропроводности.

В работах [28, 35, 36] предложен другой механизм ударно-волновой магнитной кумуляции, согласно которому заметная электропроводность возникает в упругом предвестнике, распространяющемся в порошке впереди основного фронта ударной волны. Процесс магнитной кумуляции тогда разбивается на две стадии: сжатие поля проводящим предвестником и «дожатие» поля в основной волне. Такая модель представляется противоречивой. Действительно, слабая проводимость предвестника (если он существует) не влияет на сжатие поля и приводит лишь к сокращению време-



ни работы генератора из-за преждевременного разрушения датчика. С другой стороны, если в предвестнике достигается металлическая проводимость, то магнитное сжатие из-за предвестника мало (из-за малости  $u/D$ ), а магнитное сжатие в основной волне ограничено ростом плотности вещества.

Вывод о наличии предвестника [36] сделан на основе показаний датчика, размещаемого в алюминиевом порошке. Датчик представляет собой тонкую манганиновую проволоку, намотанную на пластиковый стержень. Ударно-сжимаемый порошок замыкает электрическую цепь с проволокой, что уменьшает сопротивление датчика. Обработка экспериментальной записи напряжения дала максимальную скорость ударной волны  $\approx 3$  км/с [36, рис. 3], однако аппроксимация скорости экспоненциальной зависимостью при малом времени привела к значению  $\approx 5$  км/с. Столь большая скорость, по мысли авторов, свидетельствует о наличии предвестника, в котором порошок становится проводящим. В [36] фазовая скорость волны определяется посредством дифференцирования электрического сопротивления датчика. Помимо неоднозначности трактовки представленных опытных данных [36] (в том числе из-за чувствительности операции дифференцирования к шумам и наводкам), авторы, по видимому, не учитывали влияние возмущающей волны в пластиковом стержне.

Сопоставим результаты [28, 35, 36] с известными данными по ударной сжимаемости алюминиевых порошков, полученными с использованием различных экспериментальных методов [30–33, 37]. Для подобных материалов упругий предвестник не зарегистрирован, а скорость ударной волны линейно зависит от массовой скорости. Техника электромагнитного электродного датчика [30] позволяет найти непосредственно скорость волны металлизации. Полученные данные [30] свидетельствуют, что появление проводимости соответствует волне, несущей основное давление. Предвестник (если он существует для подобных материалов) не приводит к возникновению заметной проводимости. Оценка чувствительности техники электродного датчика дает электропроводность  $\sigma < 20 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Такая величина недостаточна для кумуляции поля. Настоящий результат находится в согласии с прямыми измерениями электропроводности в ударно-сжимаемой алюминиевой пудре [29, 30]. Зави-

симость электропроводности от ударного давления для алюминиевого порошка носит немонотонный характер. Пороговое давление, вызывающее появление заметной электропроводности, составляет  $\approx 0.6$  ГПа (для порошков плотности 0.37 и 0.5 г/см<sup>3</sup>).

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные также не подтверждают вывод [28, 35, 36] о существовании предвестника. Определяемая по времени магнитного сжатия скорость волны металлизации  $D_m$  близка к ожидаемой скорости ударной волны  $D_c$ , а найденное значение показателя  $\alpha$  близко (с учетом сделанного выше анализа) к отношению  $u/D$ , определенному из ударной адиабаты вещества. Таким образом, двухстадийный механизм ударно-волновой магнитной кумуляции [28, 35, 36] не находит подтверждения в экспериментах с электромагнитным электродным датчиком, в измерениях электропроводности и в опытах по магнитной кумуляции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют обосновать предложенную в [3–8] модель ударно-волновой кумуляции магнитного поля и указать ее ограничения. Механизм ударно-волновой магнитной кумуляции состоит в металлизации вещества при ударном сжатии и вытеснении части магнитного потока в область перед ударным фронтом. Сжатие магнитного потока производит электромагнитный скин-слой в металлирующемся веществе.

Автор выражает благодарность А. М. Трубачеву за полезные обсуждения, Н. Г. Скоробогаемых за техническую помощь в выполнении работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Биченков Е. И., Гилев С. Д., Трубачев А. М. МК-генераторы с использованием перехода полупроводникового материала в проводящее состояние // ПМТФ. 1980. № 5. С. 125–129.
2. Гилев С. Д., Трубачев А. М. МК-генераторы на порошковом алюминии // Динамика сплошной среды. № 48: Нестационарные проблемы гидродинамики. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1980. С. 30–32.
3. Nagayama K. New method of magnetic flux compression by means of the propagation of shock-induced metallic transition in semiconductors // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 38, N 2. P. 109–110.

4. **Гилев С. Д., Трубачев А. М.** Получение сильных магнитных полей ударными волнами в веществе // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8, вып. 15. С. 914–917.
5. **Nagayama K., Oka T., Mashimo T.** Experimental study of a new mechanism of magnetic flux cumulation by the propagation of shock-compressed conductive region in silicon // J. Appl. Phys. 1982. V. 53, N 4. P. 3029.
6. **Гилев С. Д., Трубачев А. М.** Получение сильных магнитных полей МК-генераторами на пористом веществе // ПМТФ. 1983. № 5. С. 37–41.
7. **Nagayama K., Mashimo T.** New method of magnetic flux compression by the propagation of shock-compressed conductive region in semiconductors // High Field Magnetism: Proc. Intern. Symp. on High Field Magnetism, Osaka, Japan, September 13–14 1982. Amsterdam: North-Holland, 1983. P. 319–321.
8. **Биченков Е. И., Гилев С. Д., Трубачев А. М.** Ударно-волновые МК-генераторы // Сверхсильные магнитные поля: Физика. Техника. Применение: Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам. Новосибирск, 13–17 июня 1983 / Под ред. В. М. Титова, Г. А. Швецова. М.: Наука, 1984. С. 88–93.
9. **Nagayama K., Mashimo T.** Magnetohydrodynamic study of flux cumulation by the propagation of shock-compressed conductive region in semiconductors // Там же. С. 270–277.
10. **Гилев С. Д., Трубачев А. М.** Использование ударных волн для генерации сверхсильных магнитных полей // Электромеханические преобразователи энергии. Киев: Наук. думка, 1986. С. 113–115.
11. **Биченков Е. И., Гилев С. Д., Рябчун А. М., Трубачев А. М.** Ударно-волновой метод генерации мегагауссных магнитных полей // ПМТФ. 1987. № 3. С. 15–24.
12. **Bichenkov E. I., Gilev S. D., Ryabchun A. M., Trubachev A. M.** Shock-wave method for generation of megagauss magnetic fields // Megagauss Technology and Pulse Power Application: Proc. Fourth Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, July 14–17 1986, in Santa Fe, New Mexico, USA / C. M. Fowler, R. S. Caird, D. J. Erickson (Eds). New York, London: Plenum Press, 1987. P. 89–105.
13. **Nagayama K., Mashimo T.** Explosive-driven magnetic flux cumulation by the propagation of shock-compressed conductive region in highly porous metal powders // J. Appl. Phys. 1987. V. 61, N 10. P. 4730–4735.
14. **Nagayama K., Murakami T.** Magnetohydrodynamic study of the interaction of magnetic flux with high-pressure shock waves in metal powder // Shock Tubes and Waves: Proc. of the 16th Intern. Symp. on Shock Tubes and Shock Waves, July 26–31 1987, Aachen, W. Germany / H. Grenig (Ed.). Aachen: VCH, 1988. P. 881–887.
15. **Nagayama K.** Shock Wave interaction in solid materials // Shock Waves in Materials Science / A. B. Sawaoka (Ed.). Springer-Verlag, 1993. P. 195–224.
16. **Трубачев А. М.** МК-генераторы. Выбор оптимальных условий эксперимента // ПМТФ. 1995. № 3. С. 18–23.
17. **Трубачев А. М., Рябчун А. М.** МК-генератор с ударно-волновым каскадом // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 4. С. 15–21.
18. **Биченков Е. И., Гилев С. Д., Рябчун А. М., Трубачев А. М.** Сжатие магнитного поля ударно-индуцированными волнами проводимости в высокопористых материалах // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 6. С. 15–25.
19. **Биченков Е. И., Гилев С. Д., Рябчун А. М., Трубачев А. М.** Ударно-волновая кумуляция магнитного поля. Предельные возможности метода // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения: Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам / Под ред. В. К. Чернышева, В. Д. Селемира, Л. Н. Пляшкевича. Саров: ВНИИЭФ, 1997. Т. 1. С. 121–128.
20. **Бармин А. А., Мельник О. А., Прищепенко А. Б. и др.** Потери электромагнитной энергии при сжатии магнитного поля скачком второго рода // Изв. РАН. МЖГ. 1988. № 6. С. 166–170.
21. **Tyl J., Wlodarczyk E.** A new method for isentropic compression of materials // J. Techn. Phys. 1991. V. 32, N 2. P. 187–197.
22. **Великович А. Л.** О предельных возможностях метода сжатия магнитного поля сходящимися ударными волнами // ЖТФ. 1992. Т. 62, вып. 6. С. 47–59.
23. **Barmin A. A., Prishpenko A. B.** Compression of magnetic field in a single crystal by a strong converging ionizing shock wave // Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Application: Proc. of the Sixth Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics / M. Cowan, R. B. Spielman (Eds). New-York: Nova Sci. Publ., 1994. P. 35.
24. **Альмстрем Х., Бьярнхольт Г., Гольберг С. М., Либерман М. А.** Методы генерации сверхсильных импульсных магнитных полей // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения: Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам / Под ред. В. К. Чернышева, В. Д. Селемира, Л. Н. Пляшкевича. Саров: ВНИИЭФ, 1997. Т. 1. С. 146–153.
25. **Альмстрем Х., Бьярнхольт Г., Гольберг С. М., Либерман М. А.** Численное

- моделирование сжатия магнитного поля цилиндрической сходящейся ионизирующей ударной волной // Там же. С. 465–471.
26. **Bjarnholt G., Golberg S. M., Nyholm S. E.** Compression of the magnetic flux by imploding ionizing shock waves // Pulse Power Conf. 1997. P. 1497–1502.
  27. **Бармин А. А., Румненко М. С.** Исследование процессов сжатия магнитного поля сильной ионизирующей ударной волной в монокристалле CsI // Изв. РАН. МЖГ. 2002. № 3. С. 146–158.
  28. **Novac V. M., Smith I. R., Rankin D. F., Hubbard M.** An insulator-metallic phase transition cascade for improved electromagnetic flux-compression in  $\theta$ -pinch geometry // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, N 5. P. 1960–1965.
  29. **Гилев С. Д.** Электропроводность металлических порошков при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 128–139.
  30. **Гилев С. Д.** Электродный датчик — инструмент для исследования ударного сжатия и металлизации вещества // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 5. С. 116–125.
  31. **Трунин Р. Ф., Симаков Г. В., Сутулов Ю. И., Медведев А. Б., Рогозкин Б. Д., Федоров Ю. Е.** Сжимаемость пористых металлов в ударных волнах // ЖЭТФ. 1989. Т. 96, вып. 3(9). С. 1024–1038.
  32. **Баканова А. А., Дудолодов И. П., Сутулов Ю. Н.** Ударная сжимаемость пористых вольфрама, молибдена, меди и алюминия в области низких давлений // ПМТФ. 1974. № 2. С. 117–122.
  33. **Маккуин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др.** Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн // Высокоскоростные ударные явления / Под ред. Р. Кинслоу. М.: Мир, 1973. С. 299–427.
  34. **Сомон Дж.** Кумулятивные процессы. Автомодельные решения // Физика высоких плотностей энергий / Под ред. П. Калдиrola, Г. Кнопфеля. М.: Мир, 1974. С. 210–240.
  35. **Novac V. M., Smith I. R., Goh S. E., Enache M. C., Gregory K., Senior P., Stewardson H. R.** A novel flux compression/dynamic transformer technique for high-voltage pulse generation // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2000. V. 28, N 5. P. 1356–1361.
  36. **Novac V. M., Smith I. R., Goh S-E.** Monitoring the velocity of the insulator-metallic phase transition in aluminium powder under shock loading // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 174–176.
  37. **Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В.** Экспериментальные данные по ударной сжимаемости и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2001.

*Поступила в редакцию 3 /IV 2007 г.*