

УДК 534.222.2+532.529

УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ В ВОДЕ И ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ

И. И. Кочетков, А. В. Пинаев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, avpin@ngs.ru

Исследована структура нестационарных ударных волн и волн пузырьковой детонации при электрическом взрыве проволоочки в воде, химически инертных и реагирующих пузырьковых средах при запасенной в конденсаторе энергии $8 \div 81$ Дж. С помощью оптической съемки изучено формирование и расширение плазменного пузыря после взрыва проволоочки в воде и пузырьковых средах. Установлены образование кавитационных зон и характер разрушения жидкости и пузырьковой среды в коротких сильных ударных волнах. Доказано, что инициирование пузырьковой детонации при взрыве проводников осуществляется по резонансному ударно-волновому механизму. Выполнен сравнительный частотный фурье-анализ ударных волн в инертной пузырьковой среде и волн пузырьковой детонации.

Ключевые слова: электрический взрыв проволоочки, плазменный пузырь, ударная волна, скорость звука, жидкость, пузырьковая среда, пузырьковая детонация.

DOI 10.15372/FGV20150614

ВВЕДЕНИЕ

В [1–5] впервые обнаружены и исследованы стационарные самоподдерживающиеся волны детонации в химически инертной жидкости с пузырьками взрывчатой газовой смеси и в горючей жидкости с пузырьками окислителя. Пузырьковая детонация (ПД), представляющая собой волну солитонного типа, распространялась за счет выделения химической энергии в пузырьках со скоростью, превышающей в 5–7 раз равновесную скорость звука в пузырьковой среде, но меньшей скорости звука в жидкости c_f . Пузырьковую детонацию в этих работах инициировали волной газовой детонации, падающей на поверхность пузырьковой среды.

Для сокращения времени формирования волны ПД в [6] впервые предложено ее инициировать короткими ударными волнами (УВ) от взрыва проволоочек, находящихся внутри пузырьковой среды. В [6–8] установлено, что в инертной пузырьковой среде вблизи проволоочки образуется быстро затухающая УВ с резкими пульсациями давления. В химически активной пузырьковой среде после взрыва проволоочки возбуждается волна ПД, амплитуда давления и скорость которой выше, а длина волны

меньше, чем у УВ в инертной пузырьковой среде при той же запасенной в конденсаторе энергии W_0 . При малых значениях $W_0 = 12 \div 64$ Дж формирование стационарной ПД происходит на меньшем расстоянии, чем при больших значениях $W_0 = 0.3 \div 1$ кДж [6, 8]. Исходя из анализа профилей давления и свечения был сделан вывод [7], что инициирование ПД при взрыве проволоочки осуществляется по резонансному ударно-волновому механизму. Этот вывод нуждается в подтверждении с помощью оптической съемки.

В работе выполнена покадровая съемка с целью доказательства ударно-волнового механизма инициирования пузырьковой детонации, а также для изучения развития плазменного пузыря при взрыве проволоочки и поведения пузырьков в коротких ударных волнах и вблизи границы пузырьковой среды. Основная часть экспериментов проведена в области малых значений W_0 , которые не более чем на порядок превышают критическую энергию инициирования пузырьковой детонации W^* .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводили в вертикальной ударной трубе диаметром 35 мм и длиной 4.5 м, верхний участок трубы приведен на рис. 1. К нижним концам медных изолированных электродов 1 припаивали проволочку 3 из манганина диаметром 0.14 мм, длиной $9.5 \div 13.5$ мм.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-01-01154а).

© Кочетков И. И., Пинаев А. В., 2015.

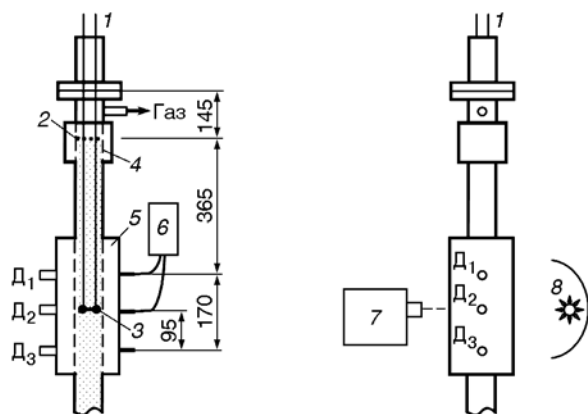


Рис. 1. Схема верхней части ударной трубы:
1 — электроды, 2 — уровень смеси, 3 — провололка, 4 — секция контроля уровня жидкости, 5 — секция измерений, 6 — ФЭУ, 7 — оптическая камера, 8 — импульсная световая лампа, Д₁–Д₃ — пьезодатчики

Начальное сопротивление провололки и ее контактов (без сопротивления электродов) составляло $0.26 \div 0.48$ Ом, активное сопротивление электрической цепи между провололкой и конденсатором — 0.11 Ом. Конденсаторы емкостью $C_0 = 1$ и 2 мкФ заряжали до энергии $W_0 = 8 \div 81$ Дж, коэффициент передачи энергии, ушедшей на взрыв провололки и в разрядный плазменный пузырь, примерно $2/3$. Напряжение на конденсаторе $U_0 = 4 \div 9$ кВ, период собственных колебаний разрядного контура — 10.7 мкс.

В качестве жидкостей использовали воду или глицерол — смесь 75% H_2O + 25% глицерина ($c_f = 1600$ м/с), в качестве газов в пузырьках — воздух либо смесь $C_2H_2 + 2.5O_2$. Снизу трубы располагался генератор пузырьков из тонких трубочек, создающий пузырьки размером $d_0 = 3 \div 4$ мм в объемной концентрации $\beta_0 = 1 \div 4\%$.

Давление измеряли с помощью пьезокерамических датчиков с собственной частотой $f_s = 300$ кГц и истокового повторителя с входным сопротивлением $R_1 = 1$ ГОм. Постоянная времени пьезодатчиков $\tau = R_1 C_1 > 1$ с, где C_1 — суммарная емкость пьезодатчика, кабеля и емкости на входе повторителя. Погрешность измерения давления не более 5% , методика тарировки датчиков изложена в [9]. Погрешности измерения скоростей УВ и ПД не более 3 и 5% соответственно. Интенсивность свечения регистрировали фотоумножителем (ФЭУ) через

световоды, установленные напротив пьезодатчиков. Сопротивление нагрузки ФЭУ 5 кОм, емкость выходного кабеля 100 пФ, время разрешения оптической линии 0.5 мкс.

Оптическую съемку проводили в секции 5 с двумя щелями размером 8×240 мм с помощью цифровой камеры Photron Fastcam. Скорость съемки $f_c = (1 \div 5.25) \cdot 10^5$ кадр/с, время выдержки $\Delta t = 1 \div 1/f_c$ [мкс]. Подсветку осуществляли импульсной лампой ИФК-120, время подсветки при использовании соединенного последовательно с ней сопротивления 0.5 Ом составляло $1.8 \div 2.2$ мс.

ВЗРЫВ ПРОВОЛОЧКИ В ВОДЕ И ИНЕРТНОЙ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЕ

Для сравнительного исследования стадий формирования плазменного пузыря были проведены взрывы провололки в воде и в воде с пузырьками воздуха. Во всех опытах в течение $2.5 \div 4$ мкс после подачи напряжения происходил резкий рост тока, а затем падение до нуля, обусловленное разрывом электрической цепи при взрыве провололки. Соответствующая длительность первой яркой вспышки провололки составляла $6.5 \div 13.5$ мкс. Начальная плотность тока в проводниках $j \approx (0.4 \div 1.4) \cdot 10^8$ А/см². Механизмы потери проводимости взрывающихся проводников изложены в [10, 11], в наших экспериментах при указанных значениях j процесс взрыва, по видимому, сопровождается образованием зольных микрокапель. Характерные осциллограммы свечения, напряжения и разрядного тока при взрыве провололки при малых значениях W_0 в воде и пузырьковых средах приведены на рис. 2. Разогрев и свечение провололки начинаются на $1.5 \div 3.5$ мкс позже момента времени, когда разрядный ток достигает максимума. Продолжительность свечения всегда превышает время, в течение которого протекает ток. При $W_0 > 18$ Дж после взрыва провололки и пика свечения наблюдается второй пик свечения плазменного пузыря, возникающий после пробоя разрядного промежутка, — свечение становится двухстадийным. Длительность и интенсивность повторного свечения возрастают с увеличением W_0 , продолжительность свечения в несколько раз превышает время выделения энергии.

На рис. 3,а приведено несколько случайным образом выбранных снимков взрыва провололки в воде, зарождения и развития плаз-

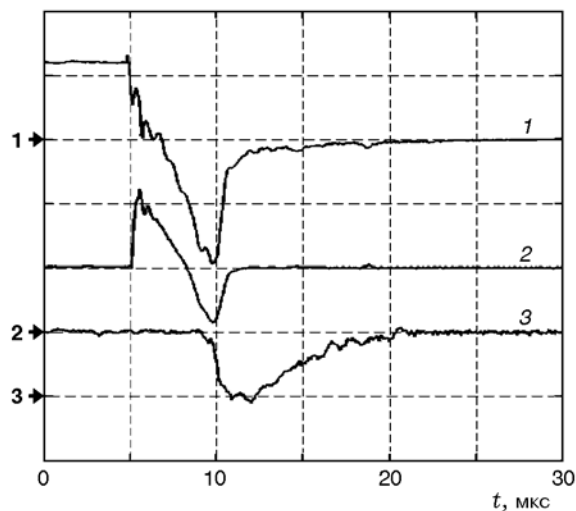


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на конденсаторе (1), разрядного тока (2) и свечения (3) в области взрывающейся проволоочки в воде и газожидкостной среде (вода с пузырьками воздуха, $\beta_0 = 1 \div 4 \%$):

$C_0 = 1$ мкФ, $W_0 = 18$ Дж; по вертикали: сигнал 1 — 5 кВ/дел, 2 — 14.2 кА/дел, 3 — 0.5 В/дел

менного пузыря. Время t на фотоснимках отсчитывается от момента подачи тока на проволочку (см. вертикальную линию $t = 0$ на рис. 3, б при $t_1 = 40$ мкс). Первая вспышка после замыкания электрической цепи в данном опыте длится примерно 10 мкс. На рис. 3, б ей соответствует короткий пик в начале сигнала 4. Затем свечение резко уменьшается, вновь возникает и продолжается в течение 175 мкс. На всех приведенных в работе осциллограммах сигналы 1–3 получены датчиками D_1 – D_3 . Датчиком D_2 , расположенным напротив проволоочки, зарегистрирована короткая и сильная УВ (сигнал 2) длительностью около 40 мкс и амплитудой давления 42 МПа. Здесь небольшой пик давления за передним ударным фронтом (через 25 мкс) соответствует волне сжатия от расширяющегося плазменного пузыря. По мере удаления от проволоочки УВ затухает (на датчике D_1 приблизительно в два раза, а на D_3 — в четыре раза). Первоначальный, примерно треугольный профиль давления УВ преобразуется на датчиках D_1 и D_3 в профили давления с 3–4 пульсациями (см. сигналы 1 и 3) длительностью $5 \div 8$ мкс. На верхнем участке между датчиками D_2 и D_1 средняя скорость ударной волны $v_{21} = 1820 \pm 27$ м/с, на нижнем участке (D_2 – D_3) $v_{23} = 1720 \pm 26$ м/с.

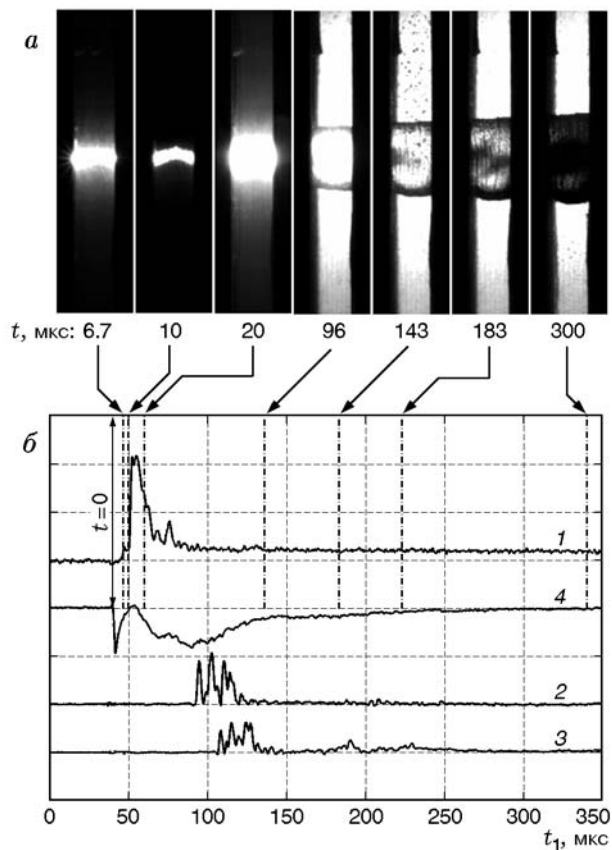


Рис. 3. Фотоснимки взрывающейся проволоочки в воде (а, $f_c = 3 \cdot 10^5$ кадр/с, $\Delta t = 1$ мкс) и профили (б) давления (сигналы 1–3) и свечения (4):

б — по вертикали: 1–3 — 20 МПа/дел, 4 — 1 В/дел; $C_0 = 2$ мкФ, $W_0 = 64$ Дж

В жидкости вблизи пузыря в моменты времени $t = 57, 113, 213$ и 373 мкс возникают кавитационные пузырьки, которые существуют соответственно в течение 43, 73, 30 и 443 мкс. Кавитация зарождается в зонах разрежения за УВ и в области разрежения вблизи пузыря на стадии его сжатия. Размер кавитационной области составляет несколько сантиметров, максимальный размер пузырьков достигает 1 мм. Кавитация — инерционное явление, время ее существования превышает время существования зон разрежения.

Боковая поверхность пузыря обычно искажена и отличается от цилиндрической формы. На плазменном пузыре видны поперечные (относительно положения проволоочки), длительно существующие полосы с шагом $0.8 \div 0.9$ мм, повторяющие форму его поверхности (см. рис. 3, а). На снимках полосы на по-

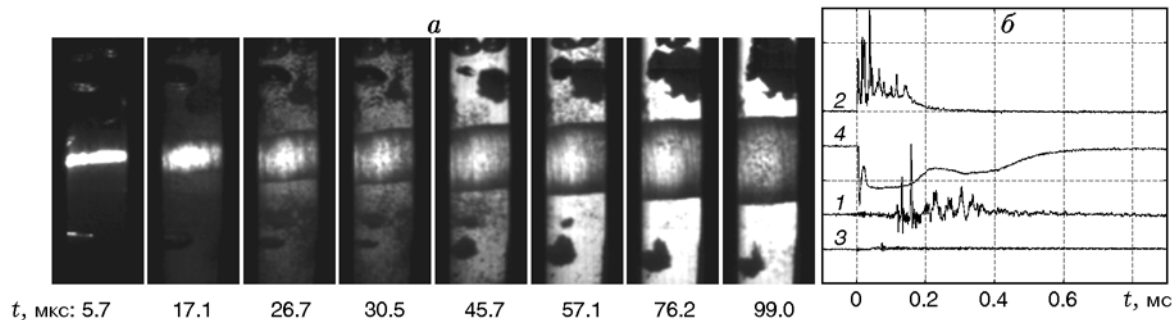


Рис. 4. Фотоснимки ($f_c = 5.25 \cdot 10^5$ кадр/с, $\Delta t = 1$ мкс) взрывающейся проволоочки в воде с пузырьками воздуха (а) и профили (б) давления (сигналы 1–3) и свечения (4):

б — по вертикали: 1–3 — 5 МПа/дел, 4 — 5 В/дел; $C_0 = 1$ мкФ, $W_0 = 24.5$ Дж, $\beta_0 = 2$ %

верхности плазменного пузыря становятся наиболее заметными при уменьшении яркости свечения (см. рис. 3, а, $t \geq 143$ мкс). За время регистрации пузырь совершал одно полное колебание, свечение плазмы обычно исчезало к моменту максимального расширения.

Вероятной причиной образования таких периодических светлых и темных полос на поверхности плазменного пузыря является стратифицированная неустойчивость расплавленного жидкого токового проводника на ранней стадии его взрыва, исследованная, например, в [12, 13]. Существуют две основные точки зрения на причины образования страт (чередующихся слоев материала низкой и высокой плотности) при электрическом взрыве проводника — перетяжечная [14–16] и перегревная [17–19] неустойчивости. Для выяснения механизма образования неустойчивости сделаем необходимые оценки.

Глубина скин-слоя, определяемая по характерному времени нарастания тока, $\Delta = 0.34$ мм; поскольку $\Delta > d$, то ток течет почти равномерно по сечению проводника. Время скинирования [20] $\tau_{sc} = \mu_0 d^2 / 4\rho_e \approx 13$ нс, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, ρ_e — удельное сопротивление манганина. Время взрыва или время ввода энергии в проводник τ_1 определяется [21]

из выражения $h = \int_0^{\tau_1} j(t)^2 dt$ следующим обра-

зом: $\tau_1 \approx h/j^2 \approx 0.6$ мкс, где $j(t)$ — экспериментальная плотность тока (см. рис. 2). Так как в манганине содержится 85 % меди, для оценки τ_1 использовали значение $h \approx h_{Cu} = 0.94 \cdot 10^9$ А²·с/см⁴. Поскольку $\tau_{sc} \ll \tau_1$, то согласно [12] сверхбыстрый режим в наших опы-

тах не реализуется.

Время развития винтовых МГД-неустойчивостей [12] $\tau_2 \approx 2\sqrt{\rho_m/\mu_0}/j = 0.36$ мкс, где $\rho_m = 8.3$ г/см³ — плотность манганина. Поскольку $\tau_1 \gtrsim \tau_2$ и оценка выполнена при максимальном значении W_0 , взрыв проводников реализуется в медленном режиме вблизи условной границы между быстрым и медленным режимами по механизму перетяжечной неустойчивости с нулевой модой.

В работе [13] для определения режима взрыва проводника использовали оценки энергии E_{in} , переданной в проволоочку, и энергии сублимации материала проволоочки E_{at} . Установлено, что образование страт происходит в быстром режиме взрыва проволоочки, когда $0.6 \leq E_{in}/E_{at} \leq 2$. В наших экспериментах $E_{in} \geq 10$ Дж, $E_{at} = \varepsilon_{at}M \approx 6.7$ Дж, где $\varepsilon_{at} = 5.2$ кДж/г для меди [13], M — масса проволоочки, следовательно, $E_{in}/E_{at} \geq 1.5$. Это означает, что реализуется механизм перегривной неустойчивости, приводящий к образованию страт.

Из полученных выше оценок следует, что критерии определения механизма неустойчивости в рассмотренной области физических параметров находятся в некотором противоречии между собой и, по-видимому, в наших экспериментах возможна как перегривная, так и перетяжечная неустойчивость.

Из анализа осциллограмм и оптических снимков взрыва проволоочки в воде с пузырьками воздуха следует вывод, что характер начальной стадии взрыва проводника практически не зависит от внешней среды. В пузырьковой среде, как и в жидкости, регистрируется короткая вспышка, длительность кото-

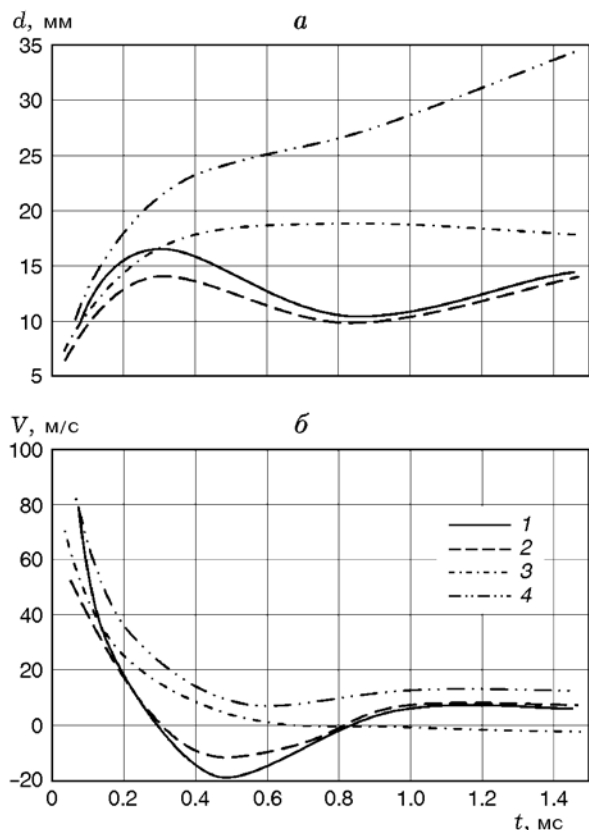


Рис. 5. Зависимость от времени размера (а) и скорости (б) плазменного пузыря в воде при $W_0 = 64$ (1) и 36 Дж (2) и в воде с пузырьками воздуха ($\beta_0 = 2\%$) при $W_0 = 64$ (4) и 36 Дж (3)

рой определяется в основном параметрами и свойствами проводника. На поверхности образующегося после взрыва плазменного пузыря возникают поперечные линии неустойчивости (рис. 4, а). Вблизи пузыря в поле давления УВ, сформированной взрывом проволоочки, пузырьки испытывают сжатие и дальнейшее расширение, после чего они разрушаются. На пузырьки оказывает влияние движение жидкости при расширении плазменного пузыря, в результате чего пузырьки смещаются и деформируются. Развивающиеся на их поверхности неустойчивости могут привести к их разрушению. Пузырьки, расположенные вблизи расширяющегося плазменного пузыря, иногда оказывают влияние на форму пузыря, искажая его цилиндрическую поверхность.

В пузырьковой среде короткая сильная УВ после взрыва проводника, находящегося напротив датчика D_2 (рис. 4, б, сигнал 2), затухает гораздо быстрее, чем в жидкости без пузырь-

ков, а на датчике D_3 (3), более удаленном от проволоочки, чем датчик D_1 (1), ударная волна практически исчезает. В зависимости от значений W_0 , β_0 и случайного расположения пузырьков степень затухания УВ может изменяться и датчики D_1 , D_3 будут регистрировать волны различной конечной амплитуды. В [6, 8] отмечалось, что не существует теорий, удовлетворительно описывающих сильные УВ в пузырьковых средах.

Исследование динамики плазменного пузыря показывает, что с ростом W_0 скорость его расширения и максимальный размер при первом расширении увеличиваются (рис. 5, а). За время $t \leq 2$ мс в жидкости независимо от W_0 пузырь успевает совершить одно полное колебание и при следующем расширении разрушается. В пузырьковой среде плазменный пузырь в течение того же времени постоянно расширяется и только при $W_0 \leq 32$ Дж наблюдается его небольшое сжатие. В пузырьковой среде из-за ее существенно большей сжимаемости по сравнению с чистой жидкостью пузырь испытывает большее расширение. При $W_0 = 32$ Дж максимальный размер плазменного пузыря при первом колебании в чистой жидкости составляет примерно 14 мм, в пузырьковой среде — 18 мм. На начальном этапе расширение границ плазменного пузыря в пузырьковой среде и в воде происходит со скоростью около 100 м/с (см. рис. 5, б). В дальнейшем пузырь в воде расширяется медленнее, чем в пузырьковой среде, и при $t \approx 300$ мкс начинает сжиматься (его скорость меняет знак).

ВЗРЫВ ПРОВОЛОЧКИ В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОГО ГАЗА

В химически активной пузырьковой среде динамика расширяющегося плазменного пузыря практически такая же, как и в инертной пузырьковой среде. В опыте, результаты которого приведены на рис. 6, электрическая энергия, выделившаяся на проволочке, была близка к критической энергии инициирования ПД. Проволочка здесь расположена напротив датчика D_1 . Несмотря на сторание отдельных пузырьков (см. кадр $t = 62.9$ мкс), детонация не была иницирована, ударные волны затухли с обеих сторон от проволоочки (рис. 6, б, сигналы 2, 3). На снимках, начиная с четвертого кадра, видны сильные деформации поверхности плазменного пузыря, обусловленные местной разгруз-

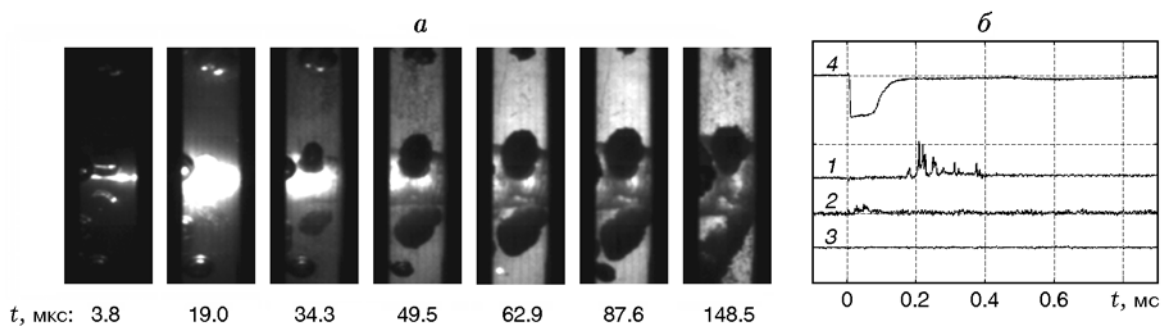


Рис. 6. Фотоснимки ($f_c = 5.25 \cdot 10^5$ кадр/с, $\Delta t \approx 1.9$ мкс) взрывающейся проволоочки в химически активной пузырьковой среде (а) и профили (б) давления (сигналы 1–3) и свечения (4):

б — по вертикали: 1–3 — 10 МПа/дел, 4 — 5 В/дел; $C_0 = 1$ мкФ, $W_0 = 12.5$ Дж, глицерол — пузырьки $C_2H_2 + 2.5O_2$, $\beta_0 = 2\%$

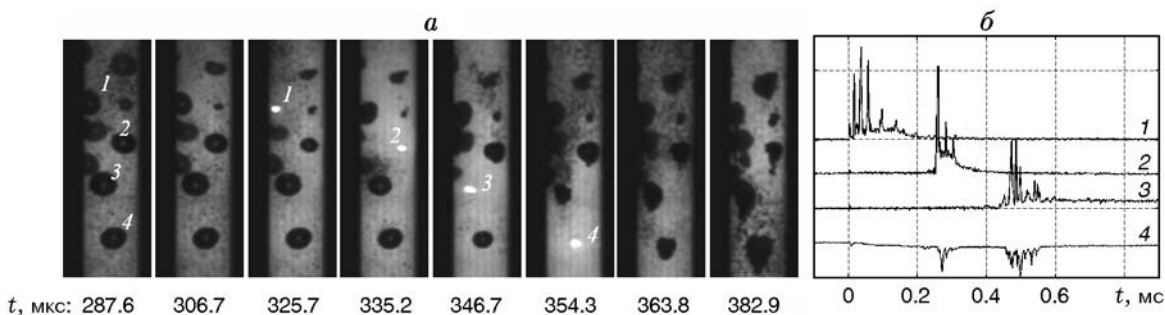


Рис. 7. Фотоснимки ($f_c = 5.25 \cdot 10^5$ кадр/с, $\Delta t \approx 1.9$ мкс) взрывающейся проволоочки в химически активной пузырьковой среде (а) и профили (б) давления (сигналы 1–3) и свечения (4):

б — по вертикали: 1–3 — 10 МПа/дел, 4 — 5 В/дел; $C_0 = 1$ мкФ, $W_0 = 24.5$ Дж, глицерол — пузырьки $C_2H_2 + 2.5O_2$, $\beta_0 = 2.1\%$

кой давления из-за нахождения вблизи их поверхности пузырьков газа.

При $W_0 > W^*$ происходит возбуждение пузырьковой детонации (рис. 7). В этом опыте проволоочка расположена напротив датчика D_1 , фотокамера сфокусирована в сечение, где расположен датчик D_2 , световоды ФЭУ расположены напротив D_2 и D_3 . При сжатии пузырьков под действием УВ в них регистрируются кратковременные вспышки свечения длительностью около 2 мкс, что указывает на протекание химических реакций. Цифрами на рис. 7,а выборочно отмечены воспламенившиеся пузырьки. Пузырьки химически активного газа после вспышки разрушаются быстрее и до меньших размеров ($\leq 0.1d_0$), чем пузырьки инертного газа. На стадии расширения пузырьков на их поверхности образуются неустойчивости и видны кумулятивные струи, пробивающие пузырек.

Существует небольшое количество пу-

зырьков, которые не воспламеняются, если другие близко расположенные пузырьки их экранируют от УВ прореагировавших пузырьков. Время от начала взаимодействия пузырька с волной ПД до его воспламенения обычно составляет $20 \div 30$ мкс, длительность пульсаций давления соответствует узкому пику в окрестности точки воспламенения ($4 \div 6$ мкс). В ПД степень сжатия пузырька $n \approx 3 \div 4$, чему соответствуют в предположении адиабатичности процесса сжатия температура $1000 \div 1350$ К, давление $8 \div 30$ МПа и период индукции химической реакции газовой смеси менее 1 мкс. На осциллограмме (рис. 7,б) видно, что волны ПД распространяются в обе стороны от проволоочки (вверх и вниз трубы). Датчики D_2 и D_3 регистрируют идущие вниз волны сжатия, характерные для ПД, фотоумножитель — свечение пузырьков напротив D_2 и D_3 (сигналы 2–4).

Оптические съемки подтвердили сделан-

ный в [7, 8] вывод об ударно-волновом механизме инициирования ПД при взрыве проволоочки. Ни в одном опыте не зарегистрировано воспламенение пузырьков при непосредственном контакте с проволоочкой, продуктами ее взрыва и плазменным пузырем. Возбуждение детонации происходило всегда при $W_0 > W^*$, в этих условиях после разрушения проволоочки формировалась короткая и сильная УВ. Форма профиля давления вблизи взрывающейся проволоочки близка к профилю давления волны ПД. Это означает, что в этом процессе реализуется резонансный ударно-волновой механизм инициирования ПД.

Проведенные опыты позволили построить область существования ПД в координатах (W_1, β_0) , где $W_1 = 2/3W_0$ — переданная в проволоочку и плазменный пузырь энергия конденсатора (рис. 8). При значениях W_1 , совпадающих с кривой 1 или находящихся выше, пузырьковая детонация инициировалась во всех опытах. Когда значение W_1 оказывалось между кривыми 1 и 2, инициирование происходило с вероятностью меньше 100 %; при значениях W_1 , лежащих ниже кривой 2, детонация не возбуждалась. На рис. 8 приведены энергии W_2 и W_3 , необходимые соответственно для плавления и полного испарения используемых проволоочек. Здесь $W_2 = (c\Delta T + \lambda)M$, $W_3 = W_2 + rM$, где $c = 0.37$ Дж/(г·К), $\lambda = 211.4$ Дж/г и $r =$

4765 Дж/г — соответственно удельные теплоемкость, теплота плавления и теплота испарения манганина, $\Delta T = T_\lambda - T_0 = 940$ К ($T_\lambda = 1233$ К — температура плавления манганина, $T_0 = 293$ К — начальная температура), $M = ml = 1.22 \div 1.73$ мг — масса проводников. Погонную массу проволоочки $m = 1.28$ мг/см определяли путем взвешивания проводника длиной $l = 10$ см.

В работе [12] при исследовании взрыва проводников в воздухе было установлено, что УВ образуется, если W_0 превышает энергию плавления проволоочки и почти в два раза меньше энергии ее испарения. То есть утверждалось, что пороговый взрыв проволоочек в воздухе при атмосферном давлении происходит без их испарения, УВ образуется по механизму разбрызгивания жидкого металла. В наших опытах в газожидкостной среде, где существенно ниже сжимаемость среды, значительно выше плотность и теплопотери на границе жидкий металл — жидкость, нельзя сделать однозначный вывод о связи плавления проводника с образованием пороговой УВ. Поскольку УВ регистрировалась при $W_1 > W_3$, наиболее вероятно, что причинами взрывного разрушения проводника в газожидкостной среде, кроме токовой неустойчивости, являются его вскипание и частичное испарение.

ВОЛНА ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ

Для исследования поведения пузырьков вблизи границы химически активной пузырьковой среды были проведены опыты, в которых ее поверхность была расположена на 1 см выше датчика D_1 , а проволоочка — на 20 см ниже границы пузырьковой среды. Характерные снимки поведения пузырьков в волне нестационарной ПД у границы представлены на рис. 9.

На первом кадре ($t = 350$ мкс) выборочно цифрами помечены пузырьки, воспламенение которых зафиксировано по мере распространения волны ПД в моменты времени $t = 370$ (1), 380 (2), 390 (3), 410 (4) мкс. Последний прореагировавший пузырек 4 расположен на глубине $h^* \approx 8$ мм. Средняя скорость нестационарной волны ПД на участке между 1-м и 3-м пузырьками составляет 620 ± 30 м/с. С приближением к границе волна ПД уменьшается по амплитуде и затухает. Поверхность пузырьковой среды при $t \approx 440$ мкс начинает двигаться вверх со

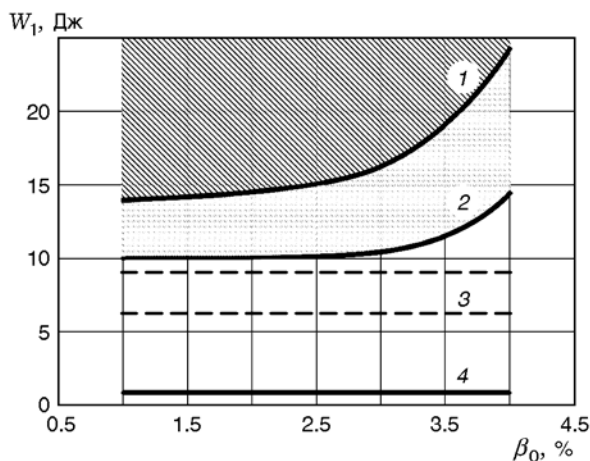


Рис. 8. Область существования ПД при взрыве проволоочки (выше кривой 1):

1 и 2 — соответственно нижняя и верхняя границы критических энергий, 3 и 4 — соответственно энергии испарения ($W_3 = 6.50 \div 9.21$ Дж) и плавления ($W_2 = 0.68 \div 0.97$ Дж) использованных проволоочек

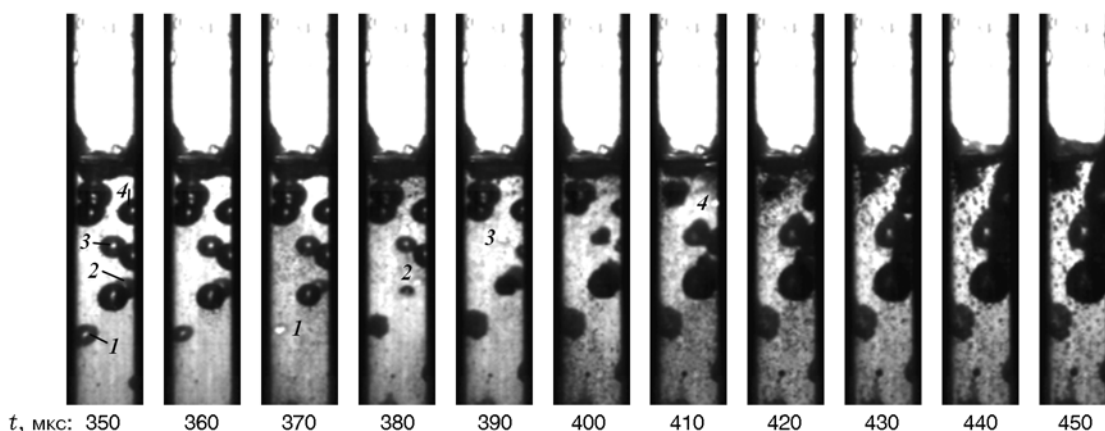


Рис. 9. Поведение пузырьков в волне пузырьковой детонации вблизи границы химически активной пузырьковой среды:

глицерол — пузырьки $C_2H_2 + 2.5O_2$, $\beta_0 = 1\%$, $W_0 = 18$ Дж, $f_c = 10^5$ кадр/с, $\Delta t \approx 4.2$ мкс

скоростью около 120 м/с, постепенно приобретая вид пены. Опыты показывают, что пузырьки, расположенные ближе $8 \div 10$ мм к границе, не успевают в достаточной степени сжаться и затем воспламениться из-за разгрузки волны ПД при выходе на поверхность раздела. Воспламенение пузырьков на глубине $h^* \approx 1$ см происходит не более чем в 20 % опытов, обычно глубина, на которой пузырьки воспламеняются, превышает 1 см.

Оценим расстояние, на котором еще возможно воспламенение пузырька у границы среды. Период собственных колебаний пузырька в ударной волне $T = 2\pi R_0 \sqrt{\rho_l / 3p_l}$ [22]. Для волны треугольного профиля с амплитудой $\Delta p_{1\max}$, которую излучает прореагировавший пузырек, примем $p_l = \Delta p_{1\max} / 2 \approx 15$ МПа. Тогда время сжатия пузырька радиусом $R_0 = 2$ мм до его воспламенения составляет $\Delta t \approx T/2 \approx 30$ мкс. Объем газа над поверхностью раздела сообщается с атмосферой, поэтому границу можно считать свободной поверхностью. При средней характерной скорости распространения УВ в пузырьковой среде $v_{gf} = 620$ м/с действие волны разгрузки начинает оказывать влияние на пузырьки, когда расстояние до границы $\lambda \leq v_{gf} \Delta t / 2 \approx 9$ мм (оценка сверху), что близко к величине, наблюдаемой в эксперименте.

СПЕКТР УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН

Для профилей давления в инертной пузырьковой среде (рис. 10,а, проволочка напро-

тив D_1) был выполнен частотный анализ сигналов с помощью дискретного фурье-преобразования (рис. 10,б). Спектр каждого сигнала вычислялся на интервале времени от начала переднего фронта волны до завершения пульсаций давления. Для сравнения на графике спектры сигналов 2 и 3 рассчитаны относительно максимального спектра сигнала 1. С целью увеличения спектрального разрешения применялась процедура «забивания» нулей (zeros-padding). По горизонтальной оси графика ограничены частотой собственных колебаний датчика f_s .

На рис. 10,б видно, что спектры сигналов характеризуются практически непрерывным распределением давления по частоте ν . Амплитуда сигнала 1 до $\nu \approx 100$ кГц уменьшается примерно на 15 дБ (в 5.6 раза) и при $\nu \approx 250$ кГц выходит на значение -40 дБ (ослабление более чем в 100 раз). Пик давления длительностью около 6 мкс ($\nu \approx 170$ кГц) на переднем фронте волны, сформированный рядом проволоочки, явно на кривой 1 не выделяется. Процедура восстановления из кривой 1 с $\nu < 70$ кГц позволяет получить профиль давления, практически совпадающий с начальным сигналом 1 на рис. 10,а. Сигналы 2 и 3, аналогично 1, убывают с частотой, но при любой фиксированной частоте ν имеют заметно меньшую амплитуду, при $\nu > 200$ кГц спектры 2 и 3 слабо различаются.

Основная причина затухания амплитуды сильной УВ и ее спектральной амплитуды с расстоянием связана с дисперсией и иными по-

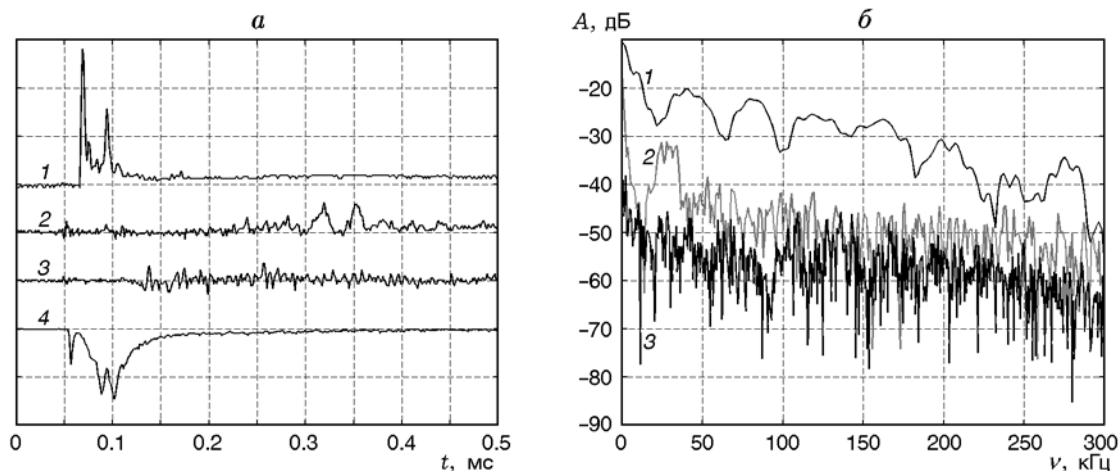


Рис. 10. Профили давления УВ (сигналы 1–3) и свечения (4) при взрыве проволоочки в пузырьковой среде (а) и спектр давления УВ (б):

глицерол — воздух, $\beta_0 = 3 \%$, $C_0 = 2 \text{ мкФ}$, $W_0 = 49 \text{ Дж}$; б — по вертикали: 1 — 20, 2 — 5, 3 — 1 МПа/дел, 4 — 0.5 В/дел; кривые 1–3 соответствуют сигналам на рис. 10,а

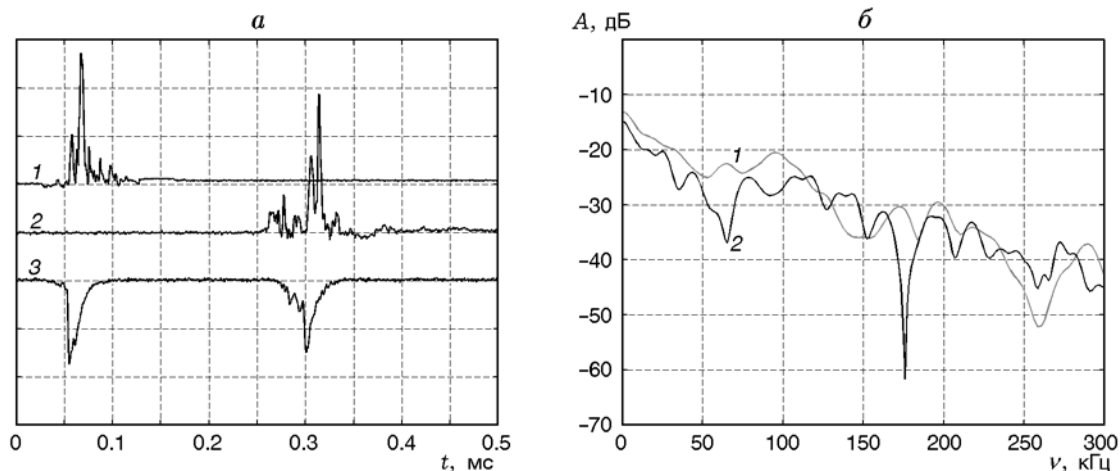


Рис. 11. Профили давления (сигналы 1, 2) и свечения (3) в волне стационарной пузырьковой детонации (а) и спектр давления волны ПД (б):

глицерол — пузырьки $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$, $\beta_0 = 2 \%$, $C_0 = 2 \text{ мкФ}$, $W_0 = 81 \text{ Дж}$; б — по вертикали: 1, 2 — 20 МПа/дел, 3 — 0.5 В/дел; кривые 1 и 2 соответствуют сигналам на рис. 11,а

терями в пузырьковой среде. Наибольшее затухание сигнала по расстоянию наблюдается в области $\nu < 50 \text{ кГц}$. Частота свободных колебаний пузырьков $\nu_0 = (3\gamma p_0 / (1 - \varphi)\rho_l)^{0.5} / 2\pi R_0$ [23], где φ — коэффициент, учитывающий взаимное влияние пузырьков. Для амплитуд давления УВ $p_0 = 5 \div 25 \text{ МПа}$, $R_0 = 2 \text{ мм}$ и $\beta_0 = 2 \%$ значения $\nu_0 \approx 13 \div 29 \text{ кГц}$ попадают в эту начальную область спектра. Появление в спектре полученных сигналов других частот связано с разрушением пузырьков и взаимодействием

волн давления в пузырьковой среде.

В спектре УВ в химически активной среде уже напротив проволоочки хорошо различаются локальные максимумы вплоть до частоты f_s , которые по мере распространения волны приобретают более выраженную форму. Это качественно отличается от спектра в инертной среде на удалении от проволоочки, где основные колебания сосредоточены в области $\nu < 50 \text{ кГц}$. В сравнении со спектром в инертной пузырьковой среде затухание амплитуды от частоты более

слабое, отсутствует затухание спектральной амплитуды с расстоянием. В спектре выделяются 2–3 локальных максимума давления сравнимой амплитуды в области $\nu < 100$ кГц. Наличие данных частот в спектре волн обусловлено колебаниями пузырьков и излучением УВ. В нижней части трубы для стационарной волны ПД, профили давления которой представлены на рис. 11,а, спектр сохраняет такие же периодические изменения амплитуды от частоты (рис. 11,б) с хорошо различимыми локальными максимумами в области $\nu < 300$ кГц. В различных опытах максимумы могут смещатьсяazole некоторого среднего значения с отклонением до 15 %.

ВЫВОДЫ

При взрыве проволоочки при запасенной в конденсаторе энергии $W_0 > 15 \div 20$ Дж в инертных и химически активных пузырьковых средах из-за лучшей их сжимаемости по сравнению с жидкостью расширение плазменного пузыря происходит быстрее и до больших размеров. Максимальная степень первоначально расширения плазменного пузыря пропорциональна W_0 . В пузырьковых средах, как и в воде, на поверхности плазменного пузыря регистрируются поперечные чередующиеся полосы.

Кавитация в жидкости возникает в области разрежения за фронтом коротких УВ, образующихся при взрыве проволоочки, расширении плазменного разрядного пузыря, взрыве химически активных пузырьков и при сжатии плазменного пузыря. Время, в течение которого в жидкости наблюдается кавитация, превышает длительность фазы разрежения в УВ.

Пузырьки химически активного газа после воспламенения расширяются, теряют устойчивость и затем разрушаются. Не все пузырьки воспламеняются. Это зависит от их взаимного расположения. Пузырьки, находящиеся близко к границе пузырьковой среды (менее чем на 1 см), не сжимаются и не воспламеняются из-за разгрузки волны вблизи свободной границы.

Фотосъемка воспламенения пузырьков в поле давления УВ от взрыва проволоочки доказала сделанный нами ранее вывод о резонансном ударно-волновом механизме инициирования пузырьковой детонации.

Частотный анализ ударных волн в инертной пузырьковой среде показывает, что наибольшее затухание спектральной амплитуды

происходит в области частот до 50 кГц, куда попадают частоты колебаний пузырьков.

В химически активной пузырьковой среде затухание спектральной амплитуды заметно меньше вплоть до частоты 300 кГц. В спектре давления стационарной волны ПД выделяются 2–3 локальных максимума сравнимой амплитуды в области частот до 300 кГц, затухание амплитуды в зависимости от частоты более слабое, чем в инертной среде, и отсутствует затухание спектральной амплитуды с расстоянием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А. И., Пинаев А. В. Волна детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Первый Всесоюз. симпоз. по макроскопической кинетике и химической газодинамике, Алма-Ата, 1984: тез. докл. — Черноголовка, 1984. — Т. 1, ч. 1, № 65. — С. 54–55.
2. Сычев А. И., Пинаев А. В. Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ. — 1986. — № 1. — С. 133–138.
3. Пинаев А. В., Сычев А. И. Обнаружение и исследование самоподдерживающихся режимов детонации в системах жидкое горючее — пузырьки окислителя // Докл. АН СССР. — 1986. — Т. 290, № 3. — С. 611–615.
4. Пинаев А. В., Сычев А. И. Структура и свойства детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 3. — С. 109–118.
5. Пинаев А. В., Сычев А. И. Влияние физико-химических свойств газа и жидкости на параметры и условия существования волны детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 6. — С. 76–84.
6. Кочетков И. И., Пинаев А. В. Ударные и детонационные волны в жидкости и пузырьковых средах при взрыве проволоочки // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 124–133.
7. Пинаев А. В., Кочетков И. И. Критическая энергия инициирования волны пузырьковой детонации при взрыве проволоочки // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 133–139.
8. Kochetkov I. I., Pinaev A. V. Comparative characteristics of strong shock and detonation waves in bubble media by an electrical wire explosion // Shock Waves. — 2013. — V. 23, N 2. — P. 139–152.
9. Пинаев А. В., Лямин Г. А. Пьезоэлектрические датчики давления, методы их тарирования // ПТЭ. — 1992. — № 2. — С. 236–239.

10. **Лебедев С. В., Савватимский А. И.** Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности // Успехи физ. наук. — 1984. — Т. 144, вып. 2. — С. 215–250.
11. **Савватимский А. И., Коробенко В. Н.** Высокотемпературные свойства металлов атомной энергетики (цирконий, гафний и железо при плавлении и в жидком состоянии). — М.: Изд. дом МЭИ, 2012.
12. **Орешкин В. И., Хищенко К. В., Левашов П. Р. и др.** Образование страт при быстром электрическом взрыве цилиндрических проводников // Теплофизика высоких температур. — 2012. — Т. 50, № 5. — С. 625–637.
13. **Бакшт Р. Б., Ткаченко С. И., Романова В. М. и др.** Динамика стратообразования и развитие перегретной неустойчивости при электрическом взрыве проводников // Журн. техн. физики. — 2013. — Т. 83, вып. 8. — С. 43–52.
14. **Перегуд Б. П., Абрамова К. Б.** Экспериментальное исследование электрического взрыва // Докл. АН СССР. — 1964. — Т. 157, № 4. — С. 837–840.
15. **Абрамова К. Б., Златин Н. А., Перегуд Б. П.** Магнитогидродинамические неустойчивости жидких и твердых проводников. Разрушение проводников электрическим током // ЖЭТФ. — 1975. — Т. 69, вып. 6(12). — С. 2007–2022.
16. **Chittenden J. P., Lebedev S. V., Ruiz-Camacho J., et al.** Plasma formation in metallic wire Z pinches // Phys. Rev. E. — 2000. — V. 61. — P. 4370–4380.
17. **Валуев А. А., Дихтер И. Я., Зейгарник В. А.** Страты при электрическом взрыве цезиевых проволок при закритических давлениях // Журн. техн. физики. — 1978. — Т. 48, вып. 10. — С. 2088–2096.
18. **Oreshkin V. I., Baksht R. B., Ratakhin N. A., et al.** Wire explosion in vacuum simulation of a striation appearance // Phys. Plasmas. — 2004. — V. 11. — P. 4771–4776.
19. **Oreshkin V. I.** Thermal instability during an electrical wire explosion // Phys. Plasmas. — 2008. — V. 15. — 092103.
20. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982.
21. **Месяц Г. А.** Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука, 2004.
22. **Бэтчелор Г. К.** Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости // Механика: сб. переводов. — 1968. — № 3(109). — С. 65–84.
23. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. — Ч. 1.

*Поступила в редакцию 20/X 2014 г.,
в окончательном варианте — 2/VI 2015 г.*