

ЭФФЕКТ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО «ПЫЛЕНИЯ» И СПОСОБЫ ЕГО ПОДАВЛЕНИЯ

В. А. Огородников^{a,b}, С. В. Ерунов^{a,b}, А. О. Бликов^{a,b}, Е. В. Кулаков^{a},
Е. А. Чудаков^{a,b}, М. В. Антипов^a, К. Н. Панов^a, М. А. Сырунин^a,
В. Н. Князев^a, Н. Б. Давыдов^a, А. Б. Георгиевская^{a,b}, А. О. Яговкин^a,
И. В. Юртов^a, Д. Н. Замыслов^{a,b}, А. Е. Ковалев^a,
А. В. Котин^a, И. А. Блинов^{a,b}, М. Г. Новиков^{a,b}*

*^a Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия*

*^b Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603155, Нижний Новгород, Россия*

Поступила в редакцию 1 апреля 2021 г.,
после переработки 12 июля 2021 г.
Принята к публикации 14 июля 2021 г.

Приведены результаты исследований процесса выброса частиц со свободной поверхности металлических лайнеров при их ускорении до скоростей 4–5 км/с с помощью энергии взрывчатых веществ. Экспериментально показано, что подавление эффекта ударно-индуцированного «пыления» можно реализовать путем квазиизэнтропического или изэнтропического нагружения лайнеров в процессе их ускорения.

DOI: 10.31857/S004445102111002X

1. ВВЕДЕНИЕ

В физике ударных волн в последние десятилетия подробно исследовался и широко обсуждался эффект ударно-индуцированного «пыления», связанный с выбросом частиц материала со свободной поверхности (СП) лайнера при выходе на нее ударной волны (УВ) [1–20]. Главные источники выброса частиц связаны с микронеровностями на СП и дефектами структуры материала лайнера (поры, включения и т. п.). Обсуждаемый эффект может привести к экранировке СП «подушкой» из этих частиц, которая препятствует регистрации тонкой структуры динамики ее движения с использованием, например, доплеровских методов [21]. В ряде случаев наличие частиц перед СП вообще недопустимо, например, в устройствах для сжатия плазмы при исследовании термоядерного синтеза [22, 23].

В связи с этим возникает проблема подавления или даже полного исключения эффекта ударно-

индуцированного «пыления». Из природы самого эффекта следует наиболее простой способ его подавления, связанный с высокой чистотой обработки СП лайнера, изготовленного из бездефектного материала, или использования магнитного поля для безударно-волнового разгона лайнера [24–26]. Однако это не всегда реализуемо и эффективно.

Другой подход к решению данной проблемы связан с уменьшением интенсивности УВ, выходящей на СП, например, в задачах по высокоскоростному разгону лайнеров в виде пластин или оболочек с использованием энергии взрыва химических веществ. Так, в [27] этот подход реализован путем введения вакуумированного или воздушного зазора величиной 6 мм между взрывчатым веществом (ВВ, high explosive, HE) и лайнером из алюминия с крупномасштабными возмущениями на СП ($2a_0 = 0.5$ мм, $\lambda = 550$ мкм) при его скорости движения 1.5 км/с. На приведенных в [27] спектрограммах наблюдается ступенчатый характер ускорения лайнера как при вакуумированном, так и при воздушном зазорах, при этом утверждается, что «пылевые» потоки с СП

* E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

датчиками PDV не регистрируются. При увеличении зазора между ВВ и лайнером можно было бы добиться более плавного ускорения лайнера за счет реализации более изэнтропического нагружения.

Также уменьшение амплитуды УВ в лайнере реализовано в двухкаскадных устройствах для исследования квазиизэнтропической сжимаемости компонентов термоядерной смеси (дейтерий, гелий) в работах [28, 29]. Ускорение сжимающих исследуемый газ цилиндрической или сферической оболочек осуществлялось путем их нагружения оболочками первого каскада, разгоняемых продуктами взрыва мощного заряда ВВ, через зазор, заполненный газом под высоким давлением (250 атм). Такой способ приводит к тому, что разгон оболочек второго каскада происходит серией УВ небольшой интенсивности, циркулирующих между оболочками двух каскадов, квазиизэнтропически.

Чтобы продемонстрировать эффективность этих подходов для подавления эффекта ударно-индуцированного «пыления», в данной работе приведены экспериментальные результаты по сравнению эффектов «пыления» при ударно-волновом, квазиизэнтропическом и изэнтропическом способах нагружения лайнеров в виде пластин из меди марки М1. При этом опыты при ударно-волновом нагружении лайнера из меди проведены в аналогичной, по условиям нагружения, постановке опытов в [30], чтобы сопоставить полученные результаты. В отличие от [30], в данной работе использовалась более широкая диагностика, основанная на независимых физических принципах.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИКИ

Схемы проведения опытов с ударно-волновым, квазиизэнтропическим и изэнтропическим способами нагружения лайнеров при использовании зарядов ВВ на основе гексогена диаметром 120 мм и высотой 220, 70 и 120 мм приведены на рис. 1. Используемые габаритно-весовые характеристики зарядов ВВ были выбраны с целью обеспечения близких конечных скоростей ускоряемых лайнеров 5 км/с. С каждым способом нагружения лайнера проведено по два опыта.

При ударно-волновом способе нагружения (УВН) лайнеры из меди толщиной 3 мм имели чистоту обработки СП Ra 1.25 (опыт 1) и Rz 20 (опыт 2) на диаметре 60 мм. Их нагружали стальным ударником диаметром 60 мм и толщиной 2.2 мм со скоростью 5.1 км/с, что соответствовало

выходу на СП лайнера из меди УВ прямоугольного профиля с амплитудой 160 ГПа. Расстояние между ударником и лайнером составляло 68 мм. Это пространство было заполнено разреженным воздухом при давлении 0.2–0.3 мм рт. ст. (технический вакуум).

При квазиизэнтропическом способе нагружения (КИН) биметаллические лайнеры из алюминия толщиной 5.5 мм и меди толщиной 1.0 мм также имели чистоту обработки СП Ra 1.25 (опыт 3) и Rz 20 (опыт 4) на диаметре 60 мм. Их нагружали стальным ударником диаметром 60 мм и толщиной 3.5 мм через слой аргона толщиной 30 мм, находящийся под давлением 60 атм, что соответствовало выходу на СП лайнера серии УВ с амплитудой первой волны 10 ГПа.

При изэнтропическом способе нагружения (ИН) биметаллические лайнеры из алюминия толщиной 2.0 мм и меди толщиной 1.0 мм имели чистоту обработки СП Ra 1.25 на диаметре 120 мм. Их нагружали продуктами взрыва заряда ВВ через зазоры величиной $\Delta = 15$ мм (опыт 5) и $\Delta = 10$ мм (опыт 6), заполненные разреженным воздухом при давлении 6.7 (опыт 5) и 0.6 мм рт. ст. (опыт 6), что соответствовало плавному нагружению лайнера.

На рис. 2 приведены характерные профилограммы СП лайнеров, имеющих чистоту обработки Ra 1.25 и Rz 20, а в таблице приведены фактические характеристики рельефа СП в каждом опыте: $2a_0$ — расстояние между впадинами и горбами (амплитуда возмущений), λ — расстояние между горбами (длина волны возмущений), а также величина разрежения воздуха в вакуумируемых пространствах, P_0 , и величина давления в аргоне, P_G .

Во всех опытах на расстоянии 30 мм от СП лайнера устанавливали одинаковые приемники с датчиками для диагностики движения и определения параметров «пылевых» потоков и СП, расположенными на площади радиусом до 16 мм относительно геометрического центра лайнера. В пространстве между СП лайнеров из меди и датчиками в приемнике создавали разрежение P_0 (технический вакуум) (см. таблицу).

В зависимости от вида применяемых методик регистрации были использованы три группы датчиков PDV, два типа пьезодатчиков и два оптических волномера пирометра:

— открытые датчики PDV, предназначенные для измерения времени выхода УВ или волны сжатия на СП лайнера и непрерывной регистрации ее скорости до подлета к приемнику, а также дисперсии скорости частиц («пыли»), если они имеются;

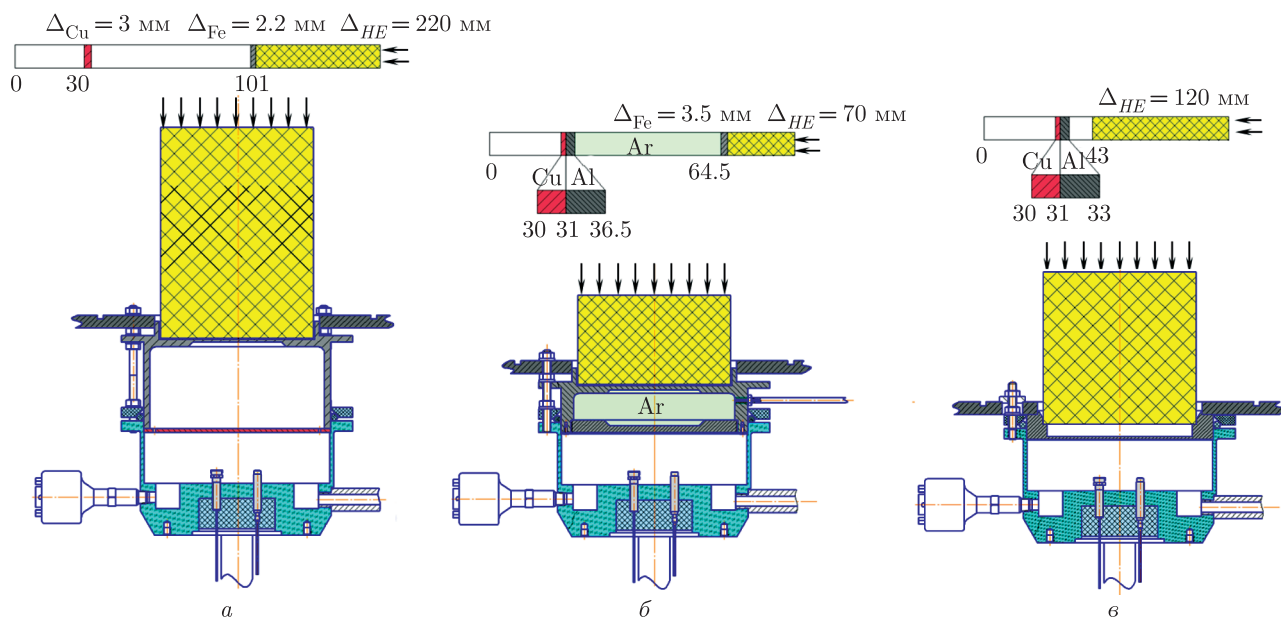


Рис. 1. Схемы нагружения лайнеров, а — УВН, б — КИН, в — ИН

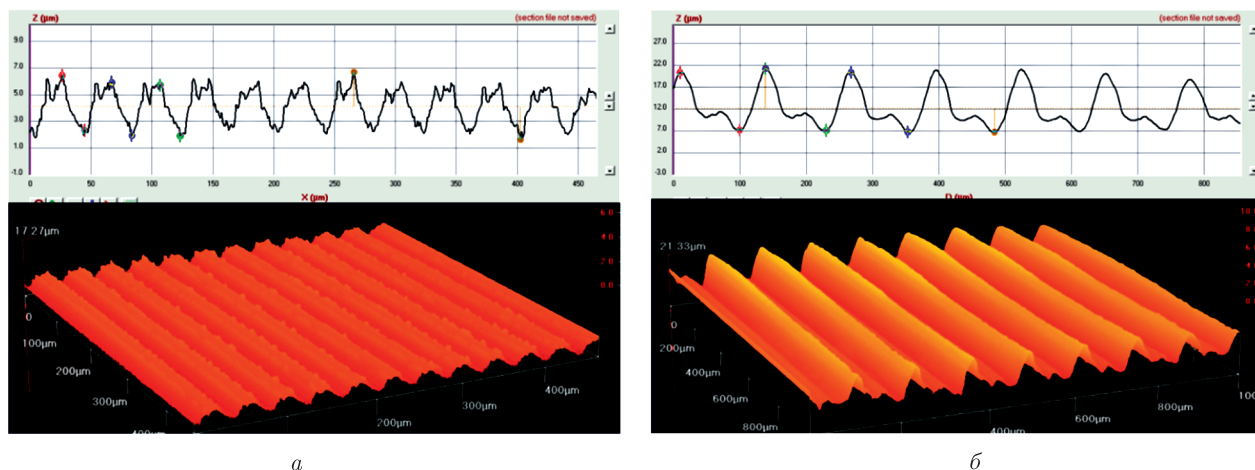


Рис. 2. Профилограммы СП лайнеров из меди, а — Ra 1.25, б — Rz 20

— датчики PDV, закрытые индикаторными экранами, предназначенные для измерения их скорости и оценки удельной на единицу поверхности массы «пыли». Использовали по два датчика, закрытых индикаторными экранами: из алюминия толщиной 200 и 30 мкм, из тантала толщиной 200 мкм и кварцевого стекла толщиной 200 мкм;

— открытые угловые датчики PDV, установленные под углом 30° к оси приемника устройства, предназначенные для зондирования скорости по диаметру СП лайнера;

— пьезодатчики, предназначенные для определения удельной на единицу поверхности массы «пы-

ли» и оценки средней скорости (СП) лайнера и среды, опережающей СП лайнера. Использовали по два датчика с чувствительными элементами из пьезокерамики (ЦТС-21) и кварца диаметром 4 мм и толщиной 0.5 мм;

— два оптических волокна пирометра, предназначенные для определения яркостной температуры. Измерения проводили двумя фотоэлектронными умножителями через интерференционные фильтры с максимумом пропускания на длинах волн 1500 и 1600 нм с полосой пропускания на полувысоте 12 нм. Перед опытами оптические линии с детекторами калибровали эталонным источником излуче-

Таблица. Фактические характеристики рельефа СП и давления в полостях устройств

Способ нагружения	Ударно-волновой		Квазиизэнтропический		Изэнтропический	
	1	2	3	4	5	6
№ опыта	1	2	3	4	5	6
Измен. величина	Ra 1.25	Rz 20	Ra 1.25	Rz 20	Ra 1.25	Ra 1.25
$2a_0$, мкм	5	17	7	16	4	8
λ , мкм	40	130	50	130	40	40
P_0 , Па (мм рт. ст.)	32 (0.24)	40 (0.30)	62 (0.47)	63 (0.48)	890 (6.7)	80 (0.6)
P_G , Па (атм)	—	—	$8.0 \cdot 10^2$ (60.9)	$7.9 \cdot 10^2$ (60.3)	—	—

ния абсолютно черного тела с температурой 1600 К.

Наряду с описанной выше диагностикой движения СП во всех опытах применяли рентгенографическую методику регистрации. В качестве источника рентгеновского излучения использовали установку 2 Эридан-3, граничная энергия излучения которой составляла 1 МэВ, а длительность импульса на полувысоте 100 нс. Коэффициент рентгенографического увеличения в опытах составлял 1.2. Регистрацию моментов рентгенографирования осуществляли с помощью цифрового осциллографа TDS3054 с погрешностью ± 0.1 мкс. Регистрацию рентгеновских изображений проводили с помощью пакета фотохромных экранов ADC-CR, расположенных друг за другом. Изображения, полученные на экранах, суммировали по специальному алгоритму [31]. Погрешность положения характерных границ на изображении составляла 0.2 мм. Из-за большого веса заряда ВВ (5 кг ТЭ) в опытах для сохранения рентгеновской установки и системы регистрации использовали достаточно толстые защитные экраны из алюминиевого сплава (на броне каземата 5 мм, на бронекассете 10 мм). Такая постановка опытов позволяет зарегистрировать поток частиц меди средней плотностью 0.02 г/см^3 (ступенька медного клина 100 мкм) и более.

Выбор физической схемы опытов проводили на основании одномерных и двумерных численных расчетов с использованием программного обеспечения и вычислительных комплексов РФЯЦ-ВНИИЭФ [32–34]. В одномерных расчетах определяли параметры нагружения импульсом давления $P(t)$ медных образцов, рассчитывали зависимости $X(t)$, $W(t)$, $T(t)$ СП меди. В двумерных расчетах определяли область нагружения СП медных образцов импульсом давления («плоский» участок СП), не

подверженную влиянию боковых разгрузок. Измерения скорости СП и параметров пыли методиками пьезоэлектрических и PDV-датчиков проводили в области «плоского» участка СП. Расчет детонации и условий нагружения лайнеров продуктами взрыва проводили с использованием уравнения состояния в форме Зубарева [35]. Для металлов Fe, Al, Cu использовали уравнения состояния в форме РОСА [36]. Для аргона использовали уравнение состояния в форме идеального газа с $\gamma = 5/3$. Для начального давления аргона 60 атм принимали плотность $\rho = 0.107 \text{ г/см}^3$. В расчетах устройств с изэнтропическим и квазиизэнтропическим нагружениями для лайнера из меди учитывали сдвиговую прочность по релаксационной модели сдвиговой прочности [37]. Геометрию этих схем нагружения выбирали с учетом предполагаемого отсутствия развития микрокумулятивных струй с микрорельефа СП. Начальная геометрия устройств, использованная в расчетах, приведена на рис. 1.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены рентгенографические снимки профилей СП лайнеров из меди с шероховатостью СП Rz 20 (опыты 2, 4) и Ra 1.25 (опыт 6), полученные при различных способах их нагружения (УВН, КИН, ИН). Штриховыми линиями обозначено начальное положение СП лайнеров.

На снимках (рис. 3) приведены времена выхода УВ или возмущений на СП лайнера, t_0 , и рентгенографирования ее формы в процессе движения, t_γ , относительно времени подачи высоковольтного импульса на систему инициирования заряда ВВ. В

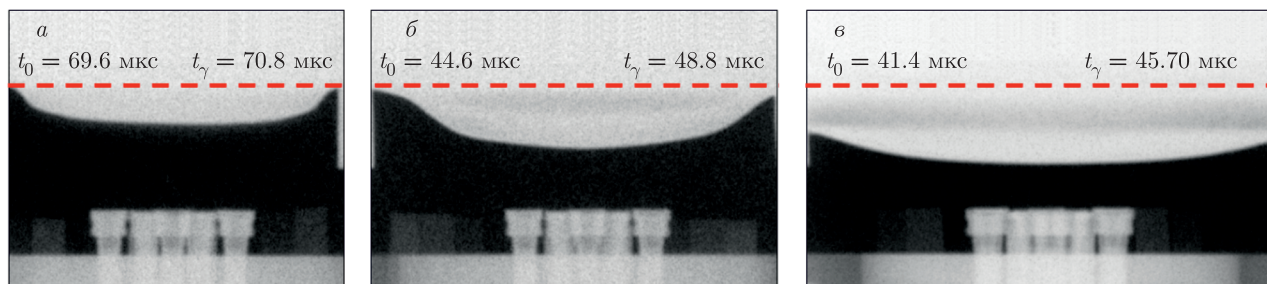


Рис. 3. Рентгенограммы опытов: а — УВН, Rz 20; б — КИН, Rz 20; в — ИН, Ra 1.25

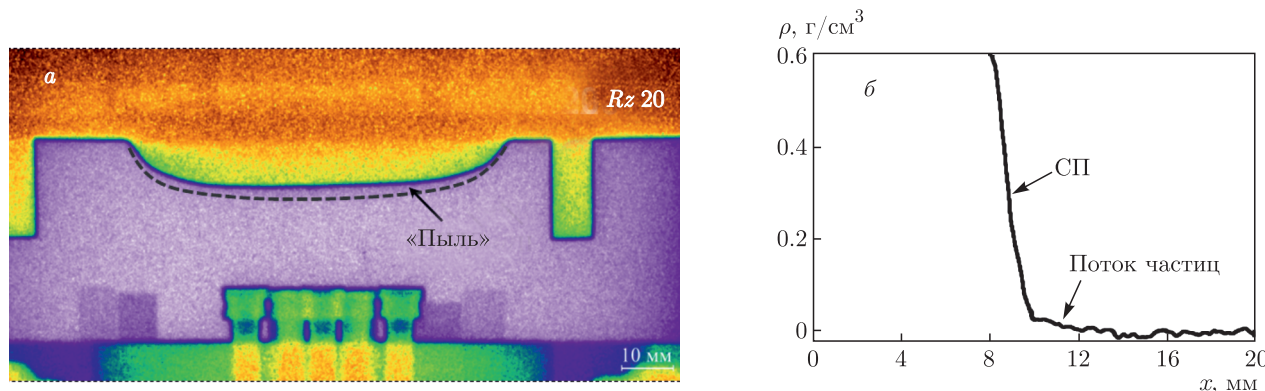


Рис. 4. а) Рентгеноснимок опыта №2 на момент времени $t_\gamma = 70.8$ мкс в псевдоцветах. б) Распределение плотности потока частиц перед СП

опытах 1, 3 получены аналогичные результаты при лучшей чистоте обработки СП (Ra 1.25), а в опыте 5 при большей величине зазора между зарядом ВВ и лайнером ($\Delta = 15$ мм). Результаты компьютерной обработки рентгеноснимков показывают, что во всех опытах, за исключением опыта 2 (УВН, Rz 20), на момент регистрации потока частиц перед СП лайнера не наблюдается. В опыте 2 удалось зарегистрировать малоплотный поток частиц перед СП лайнера, что видно в увеличенном масштабе и в псевдоцвете на рис. 4а. На рис. 4б для опыта 2 приведено распределение плотности потока частиц в направлении его движения, величина которой вблизи СП составила 20 мг/см^3 , что соответствует примерно порогу разрешения используемой рентгенографической методики. Участок $\rho(x)$, связанный с СП, на рис. 4б не выглядит «вертикальным» из-за размытия, связанного с высокой скоростью движения лайнера, и неидеальности обработки рентгеноснимка.

На рис. 5 приведены спектрограммы скоростей движения СП лайнеров из меди, зарегистрированные PDV-датчиками во всех шести опытах. Здесь же жирными сплошными линиями нанесены резуль-

таты численных расчетов динамики движения СП, которые свидетельствуют об их хорошем согласии с результатами экспериментов. На рис. 5а и 5б приведены данные, полученные одним датчиком PDV, по другим датчикам получены аналогичные результаты. Наблюдаемое «расщепление» на рис. 5а является приборным «артефактом», связанным с использованием частотного уплотнения сигналов на одном канале регистратора.

Анализ спектрограмм свидетельствует о наличии заметных потоков частиц перед СП лайнеров при их ударно-волновом нагружении в опытах 1 и 2, которые экранируют СП, поэтому PDV-датчики скорость ее движения не регистрируют (рис. 5а,з) за исключением начального участка длительностью (0.1–0.2) мкс.

При квазиизэнтропическом нагружении лайнеров в опытах 3, 4 диаграммы скорости движения СП имеют ступенчатый вид (рис. 5б,д). Величины первых ступенек скорости и скорости подлета СП к приемнику с датчиками диагностики составляют 0.63 ± 0.03 и 4.25 ± 0.05 км/с (опыт 3) и 0.62 ± 0.02

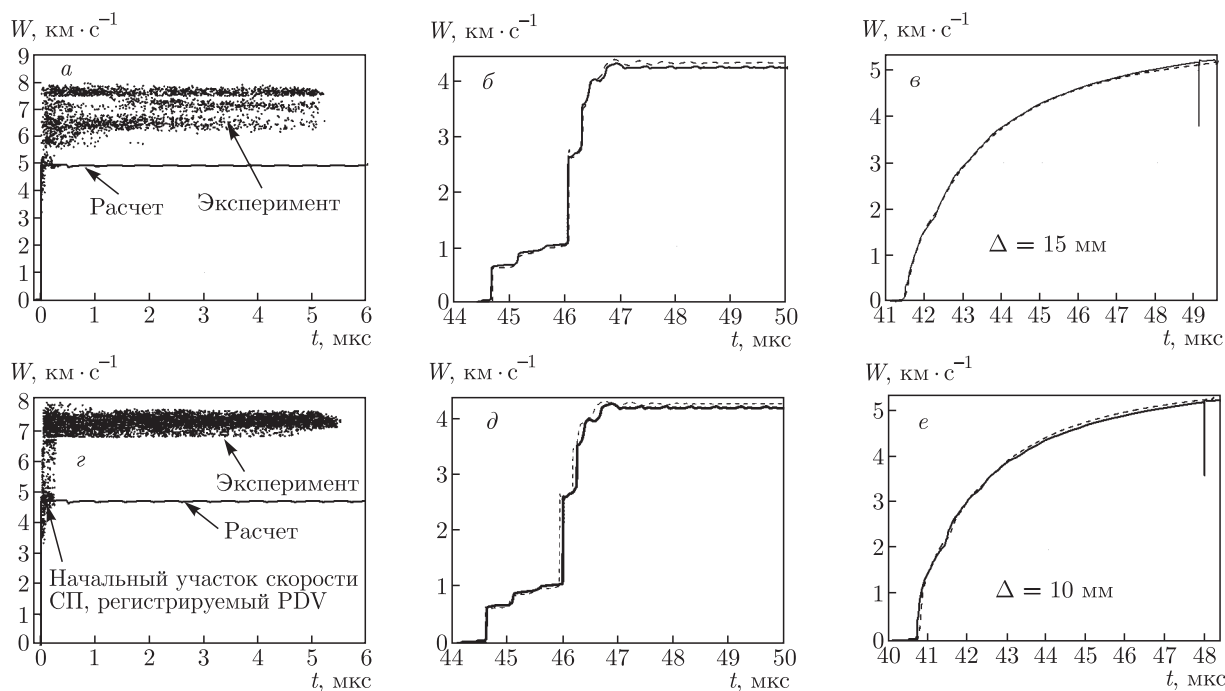


Рис. 5. Оцифрованные спектрограммы скорости движения СП. а, з — УВН, Ra 1.25, Rz 20; б, д — КИН, Ra 1.25, Rz 20; е, е — ИН, Ra 1.25. На рис. б, в, д, е штриховые линии — PDV (средняя по четырем датчикам), сплошные — расчет

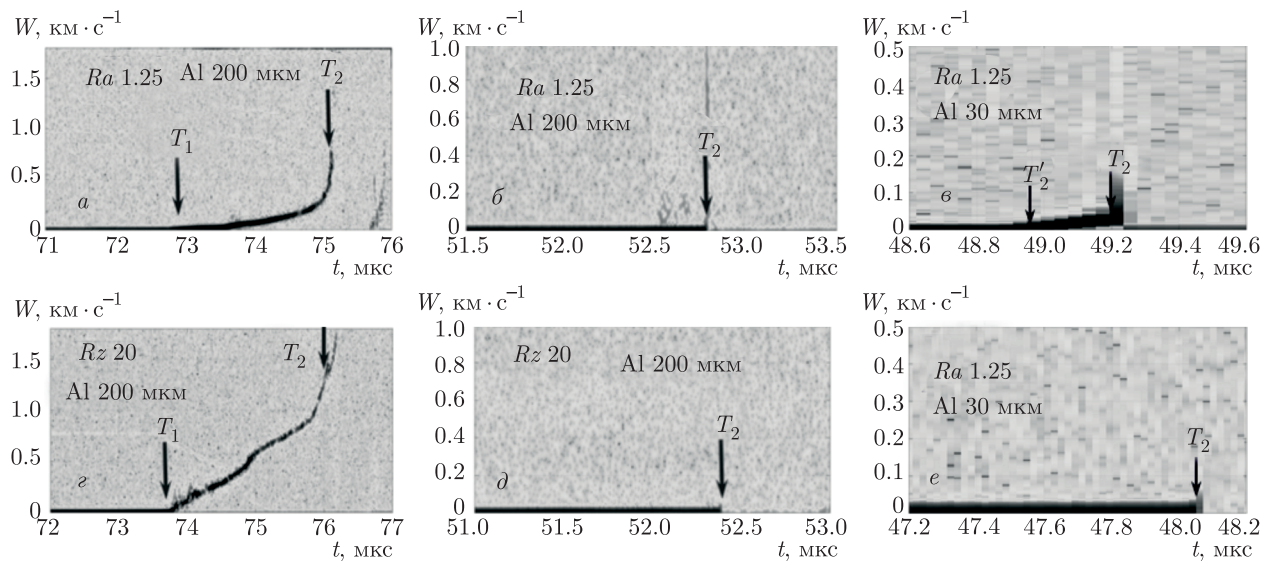


Рис. 6. Спектрограммы скоростей движения индикаторных экранов, а, з — УВН; б, д — КИН; в, е — ИН; T_1, T_2 — подлет к индикаторному экрану фронта потока частиц и СП соответственно, T'_2 — время начала воздействия УВ в остаточном газе

и 4.28 ± 0.01 км/с (опыт 4). На ступеньках оцифрованных спектрограмм не наблюдается дисперсии скорости, связанной с выбросом частиц с СП.

При изэнтропическом нагружении лайнеров в опытах 5, 6 диаграммы скорости движения СП име-

ют плавно возрастающий характер до величины скорости 5.2 км/с (рис. 5в,е). Потока частиц перед СП не наблюдается.

Отмеченные закономерности относительно наличия потоков частиц перед СП подтверждают ре-

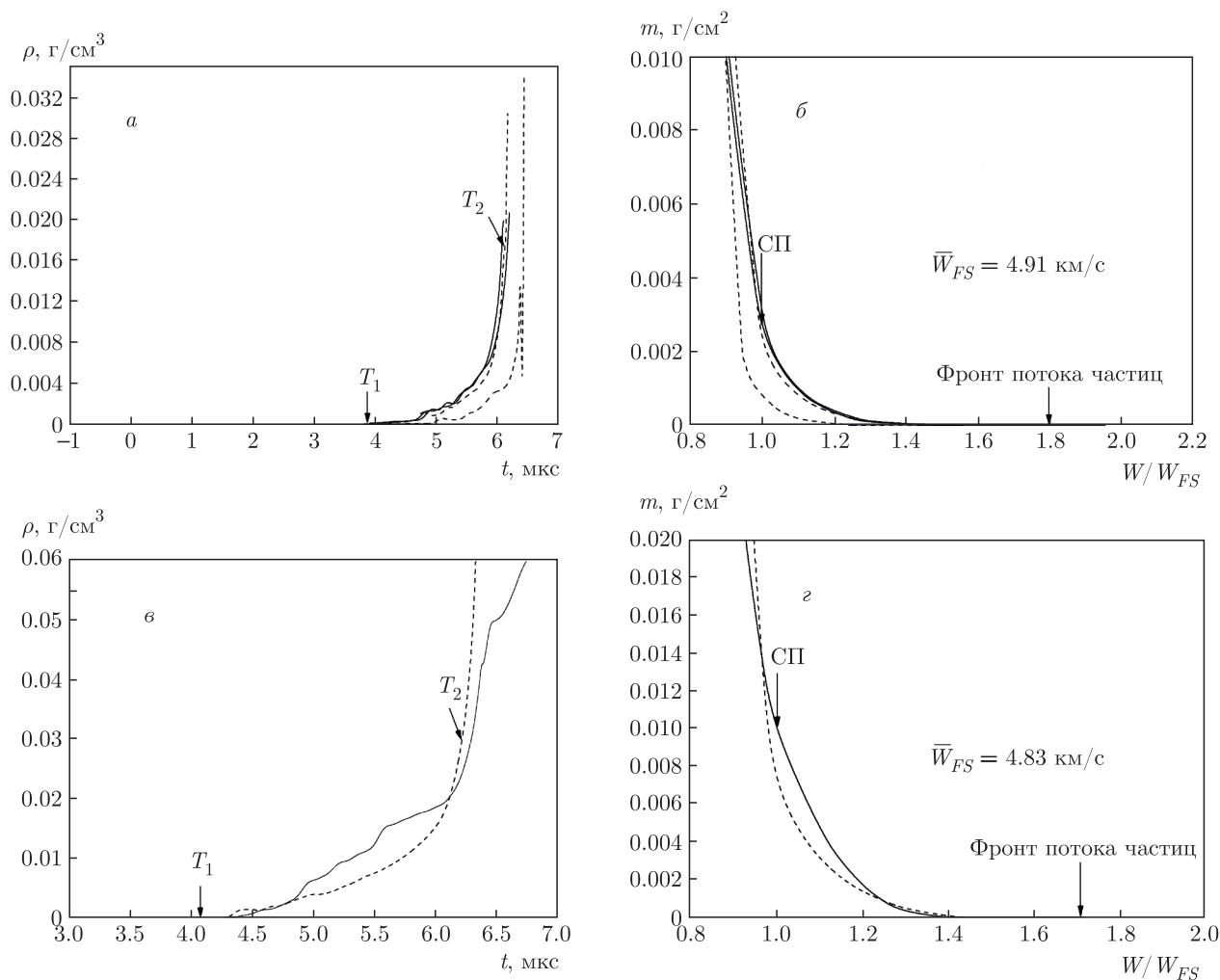


Рис. 7. Распределения плотности и массы в потоках частиц перед СП; *a, б* — опыт 1 (Ra 1.25), *в, г* — опыт 2 (Rz 20); \bar{W}_{FS} — скорость подлета СП к пьезодатчикам; T_1, T_2 — подлет к пьезодатчикам потока частиц и СП соответственно. Штриховые кривые — кварц, сплошные — пьезокерамика

зультаты измерений скоростей индикаторных экранов PDV-датчиками (рис. 6) и вычисленные, по результатам измерений давлений пьезоэлектрическими датчиками, распределения плотности и массы потоков частиц перед СП (рис. 7). На рис. 7*a* и 7*б* представлены зависимости, полученные двумя кварцевыми и двумя пьезокерамическими датчиками. На рис. 7*в* и 7*г* приведены зависимости, полученные одним кварцевым и одним пьезокерамическим датчиками, сигналы с других датчиков по техническим причинам получены не были.

Так, в опытах 1, 2 при ударно-волновом нагружении лайнеров PDV-датчики регистрируют скорости движения потоков частиц (рис. 5*a,з*) и индикаторных экранов (рис. 6*a,з*) под их действием. При-

чем удельная на единицу поверхности масса потока частиц, оцененная с использованием закона сохранения импульса, в опыте 2 ($m = 10 \pm 2$ мг/см²) больше, чем в опыте 1 ($m = 3 \pm 1$ мг/см²), что связано с худшей чистотой обработки СП лайнера (см. таблицу). В опытах 3, 4 (рис. 5*б,д* и 6*б,д*) и 5, 6 (рис. 5*в,е* и 6*в,е*) при квазиизэнтропическом и изэнтропическом нагружениях лайнеров поток частиц датчиками PDV не регистрируется ни перед СП, ни по движению индикаторных экранов. Наблюдаемое в момент времени T_2' небольшое увеличение скорости на индикаторном экране из алюминия толщиной 30 мкм (рис. 6*в*) связано с наличием остатков воздуха, что подтверждается расчетами с учетом начальных давлений воздуха в устройстве 6.7 мм рт. ст. (опыт 5) и 0.6 мм рт. ст. (опыт 6).

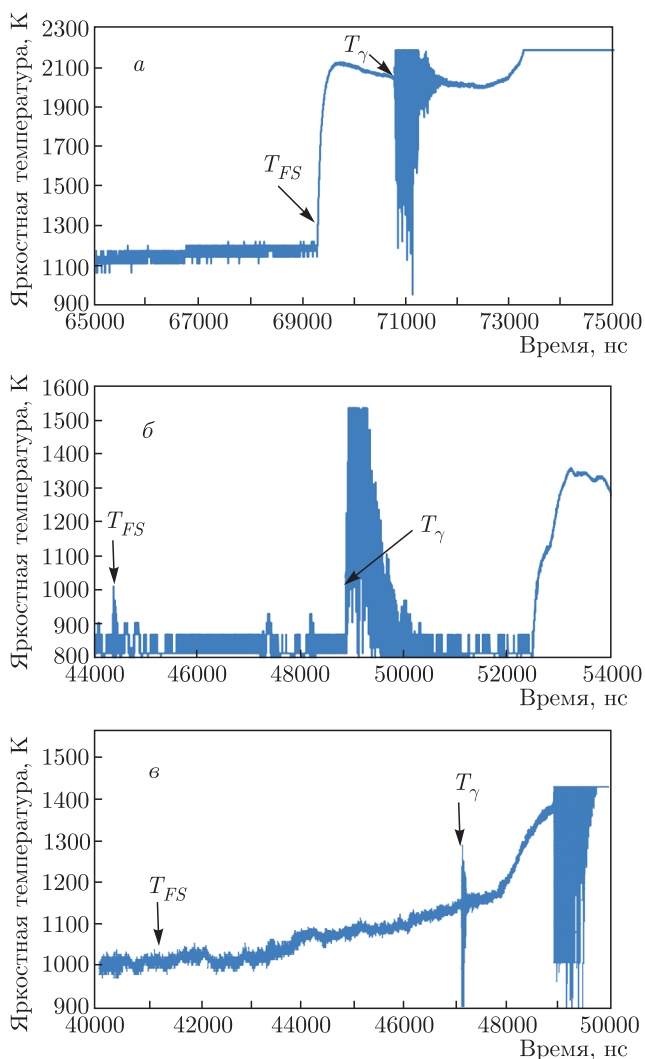


Рис. 8. Результаты измерений яркостной температуры на длине волны 1500 нм: T_{FS} , T_γ — времена выхода УВ или волны сжатия на СП и подачи рентгеновского импульса соответственно, a — УВН (опыт 1); b — КИН (опыт 3), v — ИН (опыт 5)

Аналогичные выводы следуют из результатов измерений давлений с использованием пьезоэлектрических датчиков. Так, в опытах 1, 2 при ударно-волновом нагружении лайнеров оцененные удельные на единицу поверхности массы потоков частиц перед СП составляют $m = 2.4 \pm 0.5$ мг/см² и $m = 9.5 \pm 1.5$ мг/см² соответственно. В опытах 3, 4, 5, 6 при квазиизэнтропическом и изэнтропическом нагружениях лайнеров пьезоэлектрические датчики потоков частиц перед СП лайнеров не регистрируют.

На рис. 8 приведены результаты пирометрических измерений яркостной температуры СП лай-

неров. «Ненулевые» значения температур в отсутствие полезного сигнала, например до выхода УВ на СП, обусловлены теньевым током ФЭУ и связаны с особенностями обработки калибровочного и экспериментального сигналов. Значение температуры «нулевой» линии не влияет на величину и интерпретацию экспериментального сигнала при времени $t \geq T_{FS}$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при УВН в момент выхода УВ на СП регистрируется температура $T \approx 2100$ К, близкая к температуре меди после изэнтропической разгрузки при данных условиях нагружения [38]. При КИН и ИН регистрируемые сигналы не превышают фоновых значений.

Аналогичные качественные закономерности следуют из газодинамических расчетов. Так, расчетные температуры СП лайнера составляют ≈ 1700 К, ≈ 900 К, ≈ 350 К соответственно при ударно-волновом, квазиизэнтропическом и изэнтропическом режимах нагружения.

Следует отметить, что в опытах 1 и 2 при УВН лайнеров как PDV-датчики, так и пьезодатчики регистрируют большой спектр скоростей частиц от 7 до 10 км/с, что не противоречит данным [30], полученным в аналогичных условиях нагружения лайнеров из меди. Однако зарегистрированная в [30], с использованием спектроскопического метода, температура плазмы меди 11000 К в данной работе, с использованием пирометрической методики, не подтверждена.

На рис. 9 приведены расчетные $x-t$ -диаграммы движения СП лайнеров из меди при различных способах их нагружения. Здесь же для сравнения нанесены результаты экспериментов с использованием рентгенографической, лазерно-оптической (гетеродин-интерферометра) и пьезоэлектрической методик, которые свидетельствуют о хорошем согласии всех представленных результатов, полученных с использованием методик, основанных на независимых физических принципах.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При исследовании ударно-индуцированного «пыления», связанного с выбросом частиц со свободной поверхности лайнеров из меди (М1) при выходе на нее ударной волны с давлением 160 ГПа (УВН), определены параметры потоков частиц: удельные массы $m = 2.8 \pm 1.0$ мг/см² и $m = 9.8 \pm 2$ мг/см², соотношения скоростей потока частиц

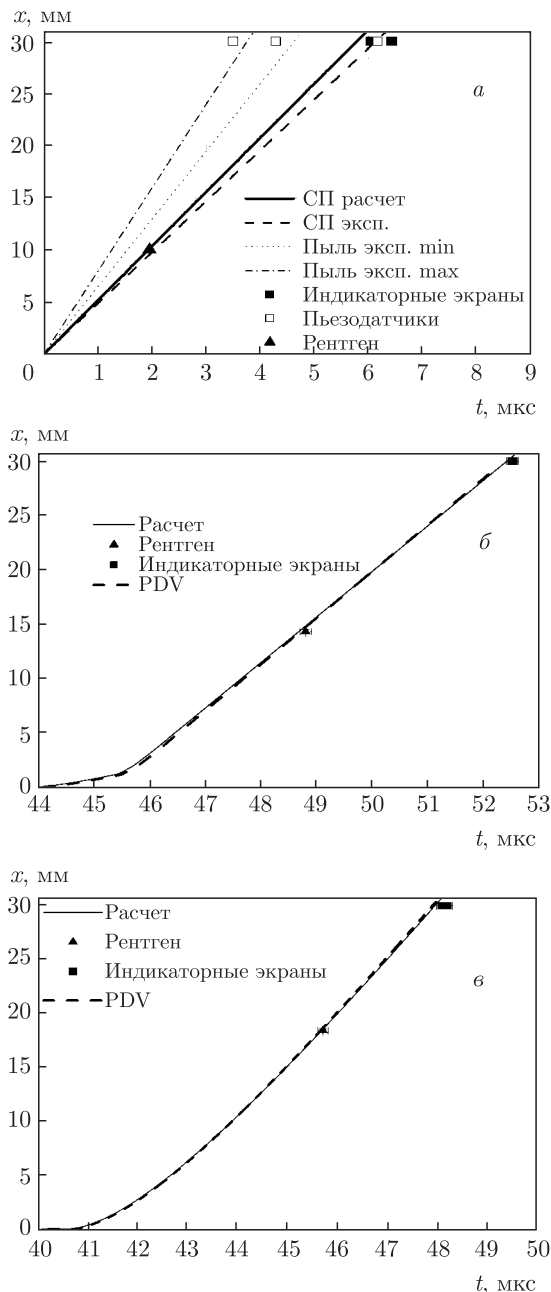


Рис. 9. x - t -диаграммы движения СП и пылевого потока, a — УВН (опыт 1), b — КИН (опыт 3), c — ИН (опыт 5)

и СП $W_P/W_{FS} = 1.8 \pm 0.2$ и 1.7 ± 0.3 для лайнеров с чистой поверхностью Ra 1.25 и Rz 20 соответственно.

2. Показано, что использование квазиизэнтропического режима нагружения (серией УВ в течение 2 мкс с амплитудой первой волны 10 ГПа) и изэнтропического нагружения (серией волн сжатия в течение 8 мкс с амплитудой первой волны 0.1 ГПа) приводит, в отличие от ударно-волнового

нагружения, к устранению потока частиц перед СП лайнеров из меди (М1) с чистой обработки Ra 1.25 и Rz 20 при их ускорении до скоростей 4.3 и 5.2 км/с соответственно, по крайней мере в пределах разрешающей способности используемых методик (по массе ≥ 0.5 мкг/см², по плотности ≥ 1.0 мкг/см³).

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам, принявшим участие в организации, проведении экспериментов и обработке полученных результатов: А. В. Романову, А. С. Пупкову, В. А. Баранову, Г. С. Яндубаеву, В. В. Ковалдову, Д. М. Моисееву, В. В. Ерастову, А. А. Утенкову, И. В. Юртову, А. В. Федосееву, Д. А. Рыбальченко, Д. С. Миронову, С. А. Янкову, И. В. Шмелеву, Д. А. Калашникову, А. П. Явтушенко, А. М. Тарасову, С. И. Киришанову, А. В. Гущину, В. В. Лосеву, А. Н. Черяеву, А. В. Зайцеву, Р. В. Тилькунову, М. А. Каганову, В. Н. Филяеву, М. О. Лебедевой, Д. Е. Зотову, В. А. Комракову, Р. А. Воронкову, Т. А. Адигамовой, А. С. Соколовой.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (в рамках соглашения с ОИВТ РАН №075-15-2020-785 и программы по созданию молодежных лабораторий (научная тема «Газодинамика и физика взрыва»)).

ЛИТЕРАТУРА

1. W. S. Vogan, W. W. Anderson, M. Grover et al., *J. Appl. Phys.* **98**, 113508 (2005).
2. Н. Д. Семкин, К. Е. Воронов, Л. С. Новиков и др., *ПТЭ* №2, 123 (2005).
3. T. Resseguier, L. Signor, A. Dragon et al., *J. Appl. Phys.* **101**, 013506 (2007).
4. M. B. Zellner, M. Grover, J. E. Hammerberg et al., *J. Appl. Phys.* **102**, 013522 (2007).
5. T. C. Germann, J. E. Hammerberg, and G. Dimonte, *7th Biannual Int. Conf.: New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter*, Portugal (2008), pp. 18–23.
6. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. В. Бурцев и др., *ЖЭТФ* **136**, 615 (2009).
7. Н. В. Невмержицкий, А. Л. Михайлов, В. А. Раевский и др., *ВАНТ, сер. Теоретическая и прикладная физика* №3, 3 (2010).

8. G. Dimonte, G. Terrones, F. Cherne et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 264502 (2011).
9. Yongtao Chen, Haibo Hu, Tiegang Tang et al., *J. Appl. Phys.* **111**, 053509 (2012).
10. D. M. Or'о, J. E. Hammerberg, W. T. Buttler et al., *AIP Conf. Proc.* **1426**, 1351 (2012).
11. D. S. Sorenson, R. M. Malone, G. A. Capelle et al., *Proc. NEDPC 2013*, Livermore, California, US, LA-UR-14-23036 (2013).
12. М. В. Антипов, А. Б. Георгиевская, В. В. Игонин и др., *Международная конференция XV Харитоновские научно-тематические чтения, Сб. докладов, Proc. Int. Conf. XV Khariton's Topical Scientific Readings*, Саров (2013), с. 666.
13. S. K. Monfared, D. M. Or'о, M. Grover et al., *J. Appl. Phys.* **116**, 063504 (2014).
14. А. Л. Михайлов, В. А. Огородников, В. С. Сасик и др., *ЖЭТФ* **145**, 892 (2014).
15. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. С. Сасик и др., *ЖЭТФ* **150**, 411 (2016).
16. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, С. В. Ерунов и др., *ЖЭТФ* **152**, 1156 (2017).
17. W. T. Buttler, S. K. Lamoreaux, R. K. Schubze et al., *J. Dynamic Behavior Mater.* **3**, 334 (2017).
18. Н. В. Невмержицкий, В. А. Раевский, Е. А. Сотсков и др., *ФГВ* **54**, 82 (2018).
19. М. В. Антипов, И. В. Юртов, А. А. Утенков и др., *ФГВ* **54**, 96 (2018).
20. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, С. В. Ерунов и др., *ЖЭТФ* **156**, 474 (2019).
21. J. R. Asay and L. M. Barker, *J. Appl. Phys.* **45**, 2540 (1974).
22. А. С. Козырев, *Газодинамический термоядерный синтез*, РФЯЦ–ВНИИЭФ, Саров (2005).
23. С. Ф. Гаранин, *Физические процессы в системах МАГО МТФ, РФЯЦ–ВНИИЭФ*, Саров (2012).
24. R. W. Lemke, H. D. Knudson, and J. P. Davis, *Int. J. Impact End.* **38**, 480 (2011).
25. R. W. Lemke, D. H. Dolan, D. G. Dalton et al., *J. Appl. Phys.* **119**, 015904 (2016).
26. W. T. Buttler, D. M. Or'о, D. L. Preston et al., *J. Fluid Mech.* **703**, 60 (2012).
27. W. Georges, J. Loiseau, A. Higgins et al., *AIP Conf. Proc.* **1793**, 060026 (2017).
28. М. А. Мочалов, Р. И. Ильякаев, В. Е. Фортов и др., *ЖЭТФ* **146**, 169 (2014).
29. М. А. Мочалов, Р. И. Ильякаев, В. Е. Фортов и др., *ЖЭТФ* **151**, 592 (2017).
30. М. И. Кулиш, В. Б. Минцев, С. В. Дудин и др., *Письма в ЖЭТФ* **94**, 105 (2011).
31. В. А. Аринин, Б. И. Ткаченко, *Цифровая обработка сигналов* **2**, 52 (2006) [V. A. Arinin and B. I. Tkachenko, *Pattern Recognition and Image Analysis* **19**, 63 (2009)].
32. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин, В. Н. Софронов, *ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики*, вып. 3, 11 (1982).
33. С. М. Бахрах, С. Ф. Спиридонов, А. А. Шанин, *ДАН СССР* **276**, 829 (1984).
34. Ю. В. Янилкин, Т. А. Торопова, *ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов*, вып. 4, 58 (1994).
35. В. Н. Зубарев, А. А. Евстигнеев, *ФГВ* **20**, 114 (1984).
36. Б. Л. Глушак, Л. Ф. Гударенко, Ю. М. Стяжкин, *ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов*, вып. 2, 57 (1991).
37. Б. Л. Глушак, О. Н. Игнатова, С. С. Надежин, В. А. Раевский, *ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов*, вып. 2, 25 (2012).
38. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др., *Физика взрыва*, Наука, Москва (1975).