

ДИНАМИКА, СИММЕТРИЯ И УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ «ПЫЛЕНИЕ» ПРИ КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ И ИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ УСКОРЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЛАЙНЕРОВ

С. В. Ерунов^а, В. А. Огородников^а, А. О. Бликов^а, В. Н. Князев^б, Е. В. Кулаков^{б*},
А. Б. Георгиевская^а, Н. Б. Давыдов^б, А. С. Соколова^б, Е. А. Чудаков^а,
М. В. Жерноклетов^б, А. В. Романов^б, И. А. Блинов^а, В. А. Аринин^б, М. В. Антипов^б,
А. П. Явтушенко^б

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

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

Поступила в редакцию 10 марта 2023 г.,
после переработки 18 мая 2023 г.
Принята к публикации 18 мая 2023 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований двух устройств для газодинамического ускорения цилиндрических лайнеров из меди до скоростей $\sim 5\text{--}7$ км/с с использованием энергии взрыва химических веществ. Продемонстрированы возможности ускорения лайнеров в условиях их изэнтропического и квазиизэнтропического нагружения при реализации высокого уровня динамики, симметрии схождения и подавления эффекта ударно-индуцированного «пыления».

DOI: 10.31857/S0044451023120209
EDN: МУКСВН

1. ВВЕДЕНИЕ

Для термоядерного зажигания дейтерий-тритиевой смеси (ДТ-смеси) посредством ее сжатия необходимо выполнение интегрального критерия [1, 2], который является обобщением критерия Лоусона и может быть представлен в виде условий

$$T \geq 2\text{--}3 \text{ кэВ}, \quad \rho r \geq 1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}, \quad (1)$$

где ρ — максимальная плотность, T — максимальная температура, r — минимальный радиус сжимаемой смеси. При этом на условия зажигания влияют динамика и асимметрия сжатия, от которых зависит максимально достижимая плотность, а также перемешивание на границах разноплотных веществ и степень засоренности сжимаемой смеси частица-

ми инертного материала, от которых зависит величина максимальной температуры в центре сжатой ДТ-смеси [3].

В [4] отмечалось, что при хорошей симметрии и большой энергии, например, за счет атомного взрыва, проблемы термоядерного зажигания и горения ДТ-смеси не существует. Проблема возникает при использовании для сжатия термоядерной смеси других более доступных, но менее энергетичных драйверов, основанных на энергии: взрыва химических взрывчатых веществ (ВВ) — газодинамического термоядерного синтеза (ГДТС), лазерного излучения — лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), пучков заряженных частиц — ионного термоядерного синтеза (ИТС), магнито-кумулятивных систем — магнито-газодинамического обжатия (МАГО).

В связи с этим возникает необходимость в поисках эффективных способов сжатия термоядерной смеси. Так, ВНИИЭФ разрабатывает взрывные цилиндрические устройства для газодинамическо-

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

го сжатия с помощью энергии ВВ замагниченной ДТ-плазмы, вбрасываемой в центральную полость посредством двух размещенных в торцах устройства инжекторов.

Важной проблемой для эффективности таких устройств является исключение поступления примесей вещества сжимающей оболочки (лайнера) в дейтериевую или дейтерий-третиевую плазму в процессе ее сжатия, так называемого эффекта ударно-индуцированного «пыления» [5, 6].

В [7] приводятся результаты исследований по выбору способов ускорения плоских лайнеров из меди с помощью энергии ВВ. Показано, что при ускорении лайнеров до скоростей $\sim 5\text{--}6$ км/с эффект ударно-индуцированного «пыления» может подавляться путем их плавного безударного нагружения и ускорения продуктами взрыва (ПВ) через вакуумированный зазор. Другой способ устранения эффекта выброса частиц с поверхности металла основан на ускорении лайнера в двухкаскадном устройстве при заполнении пространства между каскадами газом под давлением, обеспечивающим нагружение лайнера последовательностью слабых ударных волн (УВ), тем самым в металле сохраняются необходимые прочностные свойства, подавляющие развитие микровозмущений на поверхности.

Будем называть нагружение и последующее ускорение однокаскадного лайнера продуктами взрыва ВВ через вакуумированный зазор изэнтропическим, а серией слабых УВ — квазиизэнтропическим.

В данной работе приводятся результаты сравнительного анализа двух устройств с изэнтропическим и квазиизэнтропическим ускорением лайнеров цилиндрической геометрии для сжатия замагниченной плазмы. Анализ основан на результатах экспериментов и сопровождающих их численных расчетов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИКИ

Исследовали две схемы цилиндрических устройств — однокаскадную с изэнтропическим и двухкаскадную с квазиизэнтропическим режимами ускорения лайнеров в виде составных цилиндрических оболочек из алюминия и меди. На рис. 1 приведены эскизы и поперечные разрезы этих цилиндрических устройств. Обе схемы разработаны под один габарит диаметром ≈ 330 мм.

В обеих конструкциях цилиндрических устройств использовали одинаковые системы иници-

ирования детонации в зарядах ВВ из одинакового гексогеносодержащего состава, внешние радиусы цилиндрических зарядов ВВ ($R_{HE} = 150$ мм), длины зарядов ВВ ($L_{HE} = 360$ мм). Заряд ВВ состоял из трех частей: двух периферийных длиной по 90 мм и одной центральной длиной 180 мм. Полная масса заряда ВВ в однокаскадной конструкции устройства была больше, чем в двухкаскадной за счет меньшего радиуса его внутренней поверхности. Составы и радиусы границ оболочек биметаллических цилиндрических лайнеров одинаковы — оболочка из алюминиевого сплава АМГ-6 толщиной 3.5 мм и оболочка из меди М1 толщиной 0.5 мм. Длины лайнеров и конструкции закрепления в торцах несколько различались. Чистота обработки внутренней поверхности медной оболочки в однокаскадной конструкции составляла Ra 1.0 ($a_0 \approx 6$ мкм, $\lambda \approx 67$ мкм). Чистота обработки внутренней поверхности медной оболочки в двухкаскадной конструкции составляла Ra 0.5 ($a_0 \approx 3$ мкм, $\lambda \approx 67$ мкм, где a_0 — средняя полувисота рельефа микронеровностей (начальная амплитуда возмущений) и λ — среднее расстояние между ними (длина волны возмущений)). Чистота обработки внутренней поверхности при прочих равных условиях определяет эффект ударно-индуцированного «пыления» [6, 7]. Согласно расчетно-теоретическим и экспериментальным оценкам, для реализованной в этих экспериментах чистоты обработки внутренней поверхности медной оболочки «пыления» не должно быть.

Во внутренней полости лайнеров создавали разрежение ($p \approx 0.4$ мм рт. ст.). В однокаскадной конструкции в зазоре между зарядом ВВ и биметаллическим лайнером величиной 14.2 мм создавали разрежение ($p \approx 3$ мм рт. ст.). В двухкаскадной конструкции пространство между каскадами заполняли газом под давлением (аргон, $p \approx 60$ атм). В обоих устройствах на оси устанавливали одинаковые измерительные оптические приемники лазерной доплеровской диагностической системы гетеродин-интерферометра с PDV-датчиками (Photon Doppler Velocimetry) для диагностики динамики движения и определения параметров возможных «пылевых» потоков с внутренней поверхности лайнеров [8]. Приемники располагали по оси только на одной половине полости устройства. Коллиматоры PDV-датчиков устанавливали перед отражающими поверхностями поворотных призм равномерно под поверхностью приемника на трех уровнях по оси устройства (рис. 1), по 5–6 датчиков на каждом уровне. Всего в приемнике 16 датчиков. Наружный диаметр

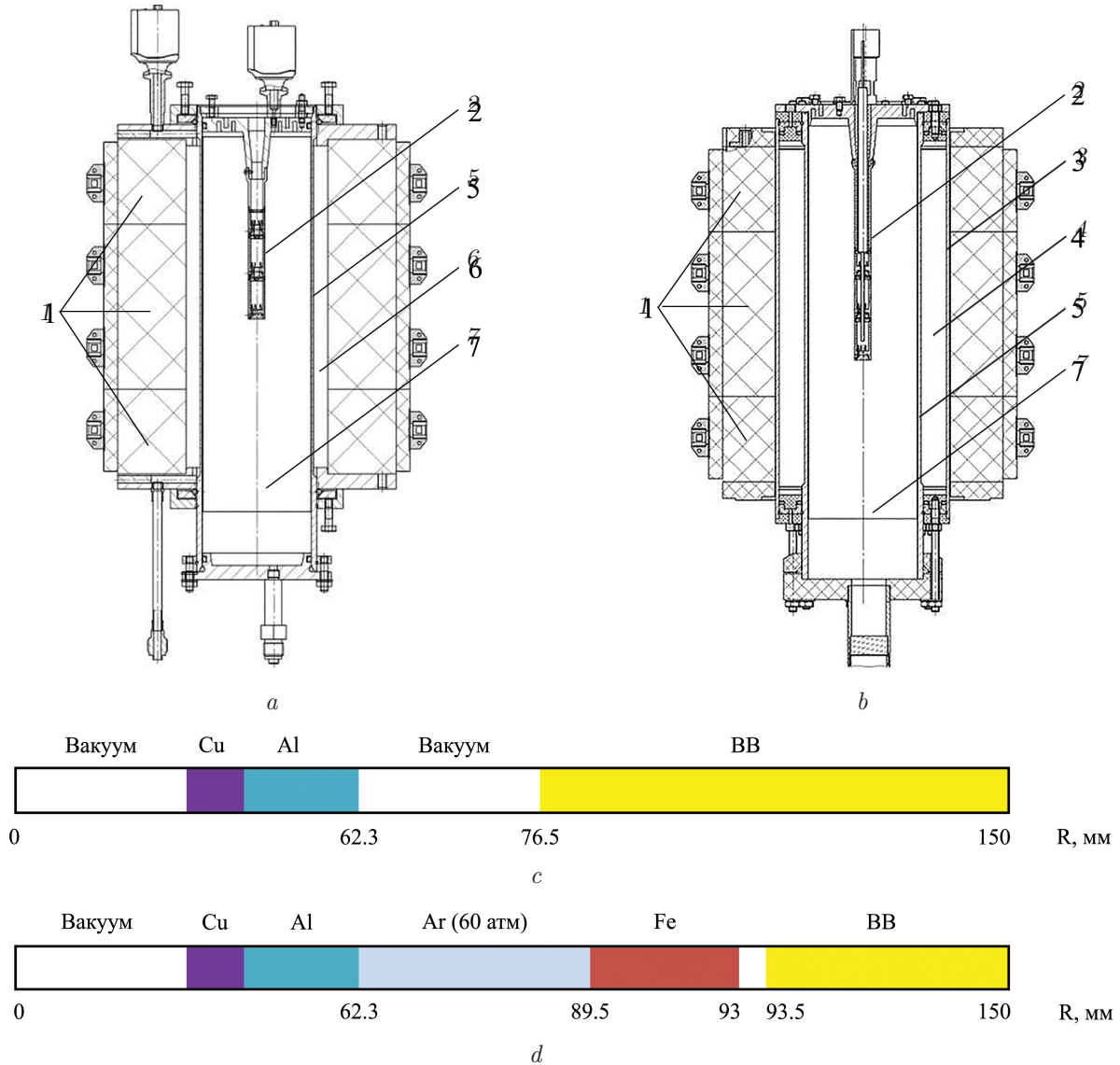


Рис. 1. Эскизы цилиндрических устройств и их поперечные разрезы: *a, c* — однокаскадная схема, *b, d* — двухкаскадная схема, 1 — заряд ВВ, 2 — измерительный приемник, 3 — оболочка первого каскада, 4 — межкаскадное пространство, заполненное аргоном, 5 — ускоряемый лайнер, 6 — вакуумированный зазор, 7 — вакуумированная полость

приемника составлял 18 мм. Используемая методика гетеродин-интерферометра позволяет проводить регистрацию скорости движения лайнера с точностью ± 20 м/с, временных интервалов с точностью ± 10 нс.

Наряду с методикой гетеродин-интерферометра сходжение цилиндрических лайнеров регистрировали с помощью многокадровой рентгенографии. Для регистрации различных фаз движения лайнеров использовали рентгенографический комплекс ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» на основе трех бетатронов БИМ 234.3000, расположенных под углом 45° друг к другу, граничная энергия излучения которых составляла 60 МэВ, а длительность импульсов на полувысоте ~ 150 нс [9]. Лайнеры с зарядами

ВВ устанавливали вертикально в месте пересечения пучков излучения. Зону регистрируемого изображения выбирали от края измерительного приемника до противоположного торца устройства. Регистрацию рентгеновских изображений проводили с помощью пакета фотохромных экранов ADS-CR, расположенных друг за другом. Полученные на экранах изображения суммировали по специальному алгоритму [10]. Погрешность определения положения характерных границ по изображениям с учетом масштаба составляла 0.2 мм.

Для сравнительного анализа полученных результатов в целом и интерпретации отдельных данных проводили одномерные и двумерные расчеты

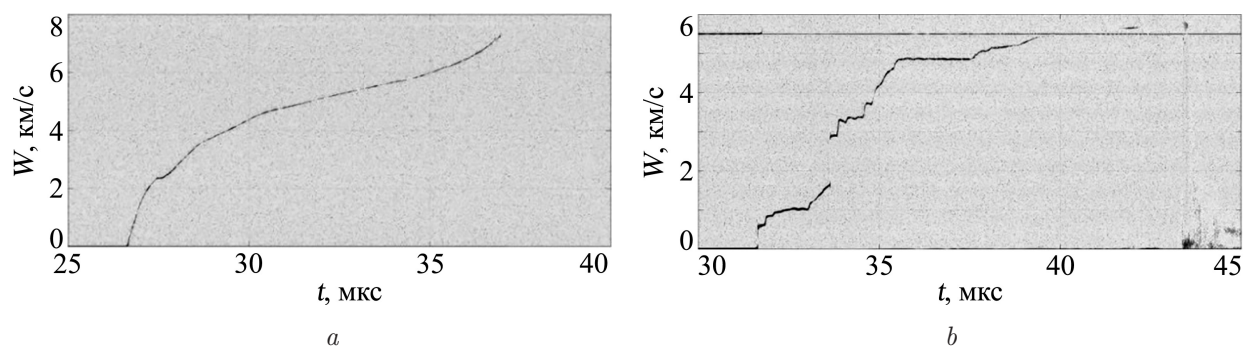


Рис. 2. Спектрограммы движения ВГЛ из меди: *a* — однокаскадное устройство, *b* — двухкаскадное устройство

с использованием программного обеспечения и вычислительных комплексов РФЯЦ-ВНИИЭФ [11–13]. В одномерных расчетах определяли зависимости динамики схождения лайнеров от времени (перемещения $R(t)$ и скорости $W(t)$), а в двумерных расчетах — возможные отклонения от симметрии формы схождения внутренней границы лайнера из меди. Расчет детонации и условий нагружения лайнеров продуктами взрыва проводили с использованием уравнений состояния в форме Зубарева [14]. Для металлов (стали, алюминия и меди) использовали уравнение состояния в форме РОСА [15]. Для аргона использовали уравнение состояния в форме идеального газа с $\gamma = 5/3$, для начального давления 60 атм принимали плотность аргона равной $\rho = 0.107 \text{ г/см}^3$. В расчетах учитывали сдвиговую прочность меди по релаксационной модели прочности [16]. Окончательную геометрию устройств и требования к классу обработки внутренней поверхности медного лайнера выбирали после подтверждения в численных расчетах отсутствия выброса материала из микрорельефа внутренней поверхности лайнеров при соответствующем режиме нагружения. Начальная геометрия устройств, использованная в расчетах, приведена на рис. 1.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены характерные спектрограммы скорости движения внутренней границы лайнеров (ВГЛ) из меди, полученные методикой гетеродин-интерферометра в опытах с однокаскадным и двухкаскадным цилиндрическими устройствами.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости скорости ВГЛ из меди $W(t)$ и $R(t)$ — диаграммы ее движения, полученные при обработке всех спектрограмм. На рис. 3 на графиках $W(t)$ указаны времена: t_1 — время начала движения ВГЛ из меди,

t_2 — время окончания регистрации. Времена отсчитываются от момента подачи импульса на электродетонатор.

Анализ спектрограмм опытов указывает на то, что датчиками PDV не зарегистрировано наличие «пылевых» потоков перед лайнерами из меди в обоих цилиндрических устройствах в пределах чувствительности метода ($\sim 0.5 \text{ мг/см}^2$) [17]. При этом заметных различий в зарегистрированных зависимостях $W(t)$ отдельными датчиками PDV в пределах каждого устройства также не наблюдается. Для однокаскадного устройства с изэнтропическим ускорением лайнера среднее время начала его движения составило $t_1 = 26.5 \pm 0.2 \text{ мкс}$. По разным датчикам наблюдается разброс скорости на отдельных участках движения, который на одинаковые моменты времени не превышает $\Delta W = \pm 0.2 \text{ км/с}$. В конце регистрации ($t_2 \approx 37 \text{ мкс}$) максимальная скорость лайнера составила $W = 7.3 \pm 0.2 \text{ км/с}$. Асимметрия ВГЛ из меди характеризуется амплитудой $\Delta R \approx \pm 1 \text{ мм}$.

Для устройства с квазиизэнтропическим ускорением лайнера среднее время начала его движения составило $t_1 = 31.06 \pm 0.07 \text{ мкс}$. Профили скорости, регистрируемые разными датчиками, хорошо повторяют друг друга в начале движения, что свидетельствует о хорошей симметрии схождения лайнера на этой стадии. Начиная со второй ступени разгона, наблюдается расхождение в значениях скорости для разных каналов PDV-датчиков. Максимальный разброс скорости на одинаковые моменты времени не превышает $\Delta W = \pm 0.2\text{--}0.3 \text{ км/с}$. В конце регистрации ($t_2 \approx 39 \text{ мкс}$) максимальная скорость лайнера из меди составила $W = 5.4 \pm 0.2 \text{ км/с}$. Асимметрия ВГЛ из меди характеризуется амплитудой $\Delta R \approx \pm 1 \text{ мм}$.

На рис. 4 приведено сравнение усредненных зависимостей скорости $W(t)$ ВГЛ из меди в однокаскадном и двухкаскадном устройствах (время на графике отсчитывается от начала движения ВГЛ).

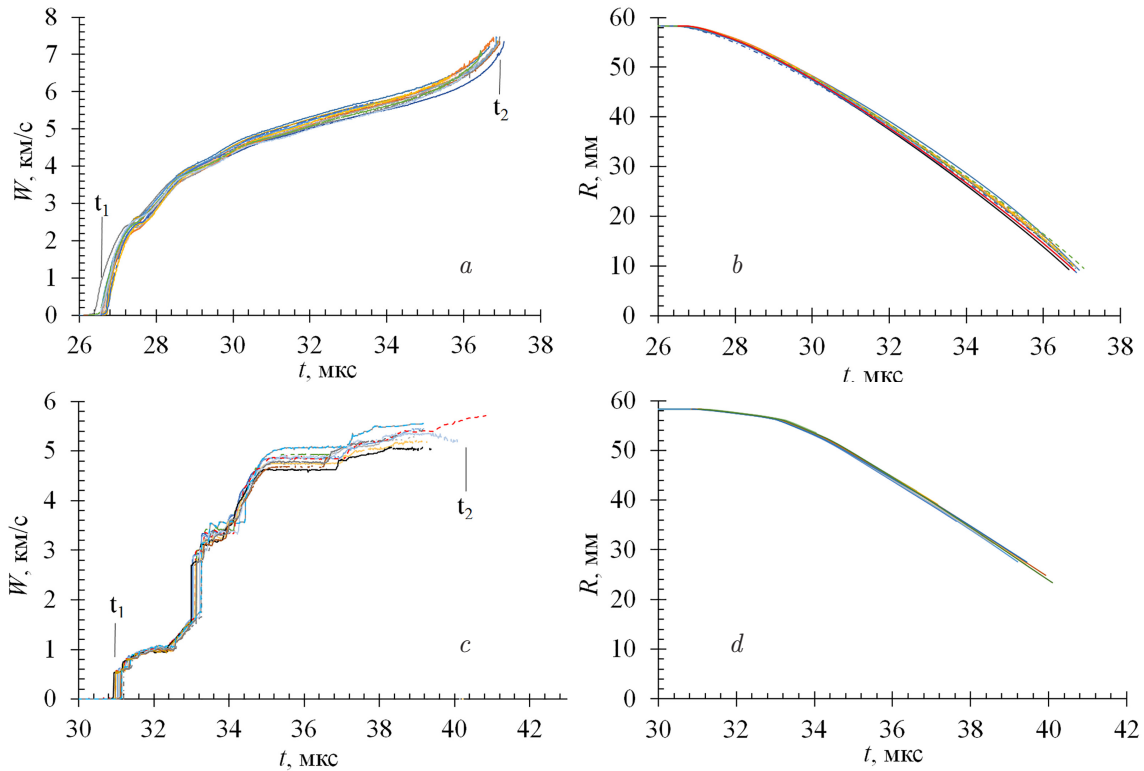


Рис. 3. Зависимости (от времени) скорости $W(t)$ и диаграммы движения $R(t)$ ВГЛ из меди: a, b — однокаскадное устройство, c, d — двухкаскадное устройство

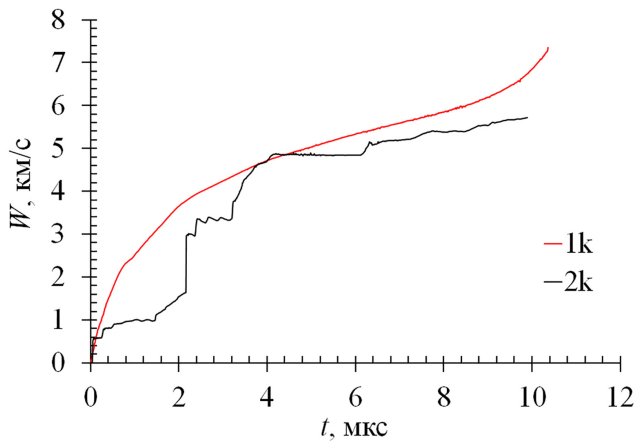


Рис. 4. Усредненные экспериментальные зависимости скорости движения внутренней границы лайнеров из меди: 1k — однокаскадное устройство, 2k — двухкаскадное устройство

Из рис. 4 видно, что при изэнтропическом ускорении лайнера (1k) набор скорости в первые 2 мкс плавный, без ударных скачков, и более быстрый, чем при квазиизэнтропическом ускорении (2k). За 8 мкс лайнер из меди набирает скорость 6.0 км/с, в дальнейшем разгоняется уже не столько за счет расширения ПВ, сколько за счет цилиндрического схождения. В устройстве с квазиизэнтропическим ускорением (2k) за это время лайнер из меди до-

стигает скорости ~ 5.4 км/с, ускорения за счет цилиндрической кумуляции еще не происходит. Этот аспект в работе устройства является важным, так как время сохранения замагниченной плазмы своих теплофизических и электродинамических свойств составляет не более ~ 10 мкс.

На рис. 5 приведены рентгеновские снимки полученных в опытах изображений лайнеров при их изэнтропическом (верхний ряд) и квазиизэнтропическом (нижний ряд) ускорении на различные моменты рентгенографирования t_γ , отсчитываемые от момента подрыва устройства. Слева приведены предварительные снимки центрального ракурса, а над снимками указаны ракурсы съемки исследуемых цилиндрических устройств. На рис. 5 стрелками указаны области, принадлежащие медной (более светлая) и алюминиевой оболочкам. Также на изображении верхнего ряда указана зона стыка зарядов ВВ.

Из рис. 5 следует, что в двухкаскадной конструкции устройства наблюдается схождение лайнера с хорошим уровнем симметрии. В однокаскадной конструкции устройства на заключительной стадии схождения имеется локальное кольцевое возмущение биметаллической оболочки, находящееся в зоне стыка центрального и периферийного участ-

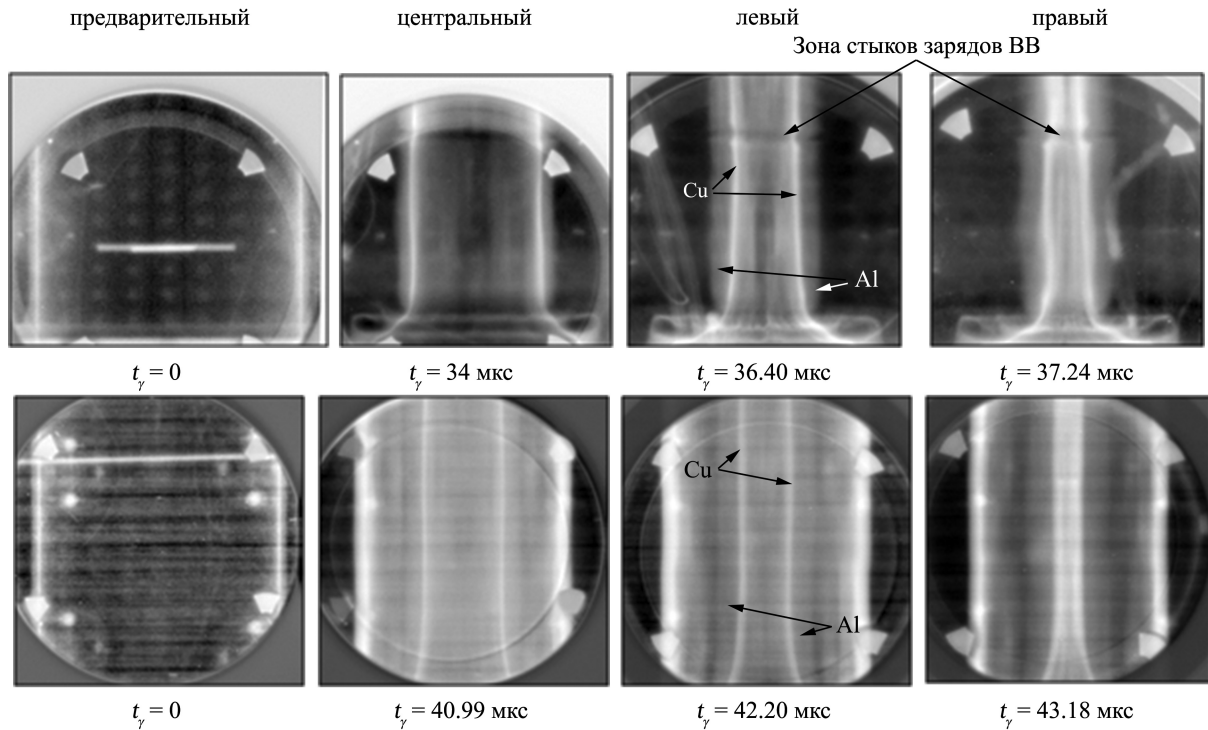


Рис. 5. Экспериментальные рентгенографические снимки

Таблица. Результаты рентгенографических опытов

Способ ускорения	t_γ , мкс	ВГЛ из меди		НГЛ из меди		НГЛ из алюминия	
		R_1 , мм	СКО, мм	R_2 , мм	СКО, мм	R_3 , мм	СКО, мм
Изэнтропический (однокаскадное устройство)	34.00	27.82	0.12	29.83	0.15	35.51	0.27
	36.40	18.73	0.29	15.70	0.43	24.57	0.23
	37.24	7.35(4.9)	0.31(0.21)	11.69	0.55	21.23	0.47
Квазиизэнтропический (двухкаскадное устройство)	40.99	18.42	0.19	20.08	0.10	27.85	0.20
	42.20	10.83	0.13	13.35	0.31	23.42	0.20
	43.18	3.46	0.23	7.64	0.11	20.72	0.14

ков зарядов ВВ. Более того, из снимка на момент $t_\gamma = 37.24$ мкс следует и разная динамика схождения оболочки (разный диаметр полости) под разными частями заряда ВВ. Подобная осевая разнородность не зарегистрирована лазерной доплеровской диагностикой на второй половине устройства. Для двухкаскадной конструкции такого расхождения динамики под разными частями составного заряда ВВ не зафиксировано. Это обстоятельство указывает на то, что конструкция однокаскадного цилиндрического устройства с зазором между зарядом ВВ и биметаллическим лайнером более чувствительна к начальным возмущениям, чем конструкция двухкаскадного устройства с газовой симметризацией. При этом на последние моменты времени рентгенографирования, соответствующие по-

ложению ВГЛ из меди на $R \sim 4-5$ мм, наблюдается ее гофрирование, связанное с развитием неустойчивости. Изображения крупномасштабных неоднородностей (гофры) представляют собой вертикальные светлые полосы внутри контура оболочки.

Для определения радиуса схождения ВГЛ и НГЛ (наружной границы лайнеров) проводили трассировку изображений (рис. 5) с использованием функционального метода [18]. Подробное описание технологии обработки аналогичных снимков приведено, например, в [19]. В таблице представлены данные по средним радиусам границ на стационарных участках траектории движения лайнеров и значения соответствующих среднеквадратичных отклонений (СКО) при различных временах рентгенографирования — t_γ .

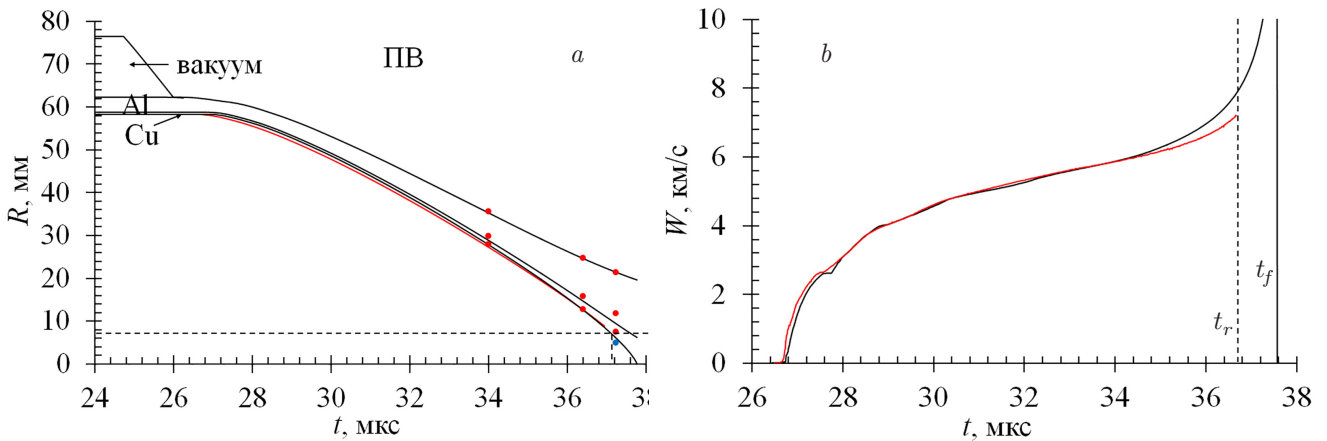


Рис. 6. Сравнение результатов расчета и эксперимента для однокаскадного устройства: a — R - t -диаграммы движения лайнеров, b — зависимости скорости $W(t)$

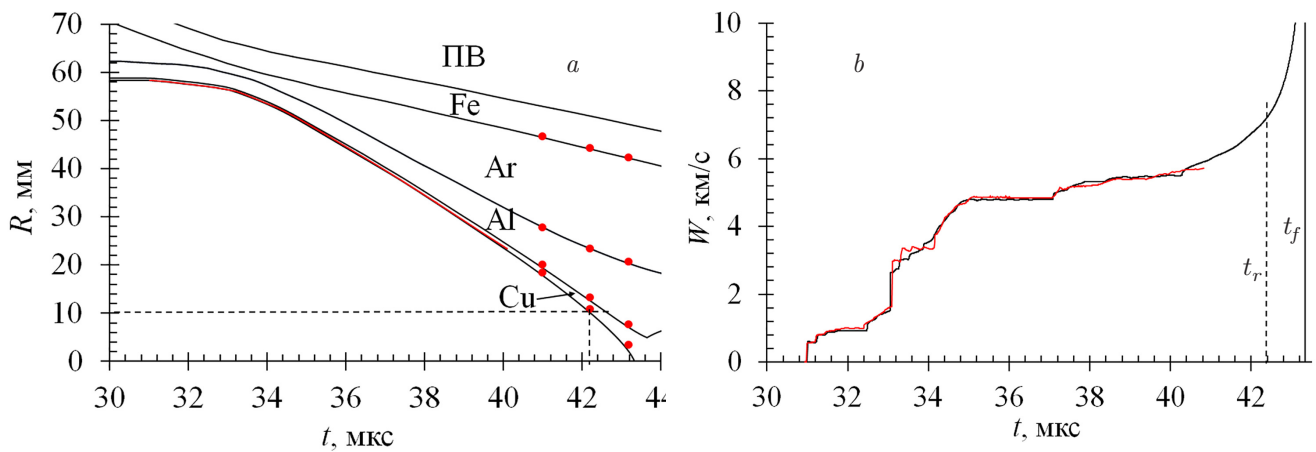


Рис. 7. Сравнение результатов расчета и эксперимента для двухкаскадного устройства: a — R - t -диаграммы движения лайнеров, b — зависимости скорости $W(t)$

Для однокаскадного устройства в таблице приведено два значения радиуса ВГЛ из меди на момент времени 37.24 мкс: первое — величина среднего радиуса в зоне ниже стыка зарядов ВВ, второе (в скобках) — средний радиус в зоне выше стыка зарядов ВВ. Для двухкаскадной конструкции такого расхождения радиусов по зонам не наблюдается.

Сопоставление экспериментальных результатов с результатами одномерных расчетов показало, что динамика схождения лайнеров достаточно точно описывается в манере, изложенной выше, для обеих конструкций. На рис. 6, 7 приведено сравнение расчетных и экспериментальных диаграмм движения $R(t)$ ВГЛ из меди, а также расчетной и усредненной экспериментальной зависимостей скорости $W(t)$ ВГЛ из меди для однокаскадного и двухкаскадного устройств. Красными линиями на рис. 6, 7 показаны экспериментальные зависимости $R(t)$ и $W(t)$, полученные при обработке данных методи-

ки PDV, красными круглыми маркерами — данные $R(t)$ рентгенографической методики. Сплошные черные линии — расчетные зависимости. Пунктирными черными линиями на графиках $R(t)$ указан расчетный момент подлета ВГЛ из меди к измерительному приемнику с датчиками PDV, на графиках $W(t)$ также вертикальными пунктирными черными линиями показан этот момент, а вертикальными сплошными черными линиями — момент фокусировки (схлопывание ВГЛ из меди в центре). На рис. 6а для однокаскадного устройства на момент времени 37.24 мкс приведены два значения радиуса ВГЛ из меди: синим круглым маркером показан средний радиус, полученный при обработке рентгенограммы в зоне выше стыка зарядов ВВ, красным круглым маркером — средний радиус в зоне ниже стыка зарядов ВВ (рис. 5).

Как показано на рис. 6, 7, для обеих конструкций расчетные скорости движения ВГЛ из меди соответ-

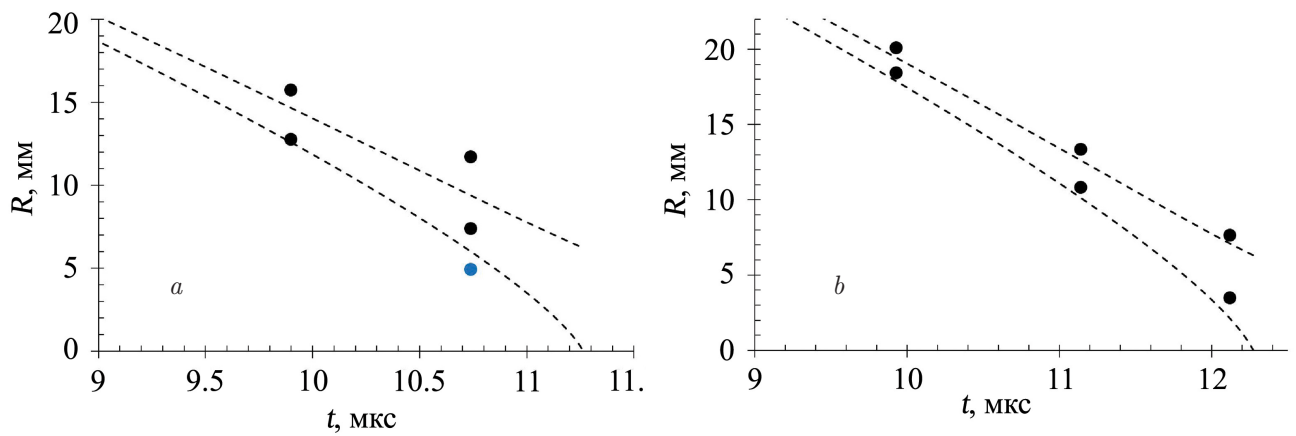


Рис. 8. $R-t$ -диаграммы движения медных лайнеров для однокаскадного (а) и двухкаскадного (b) устройств на радиусах схождения $R \leq 20$ мм. Расчет — штриховые линии, рентгенографический эксперимент — круглые маркеры

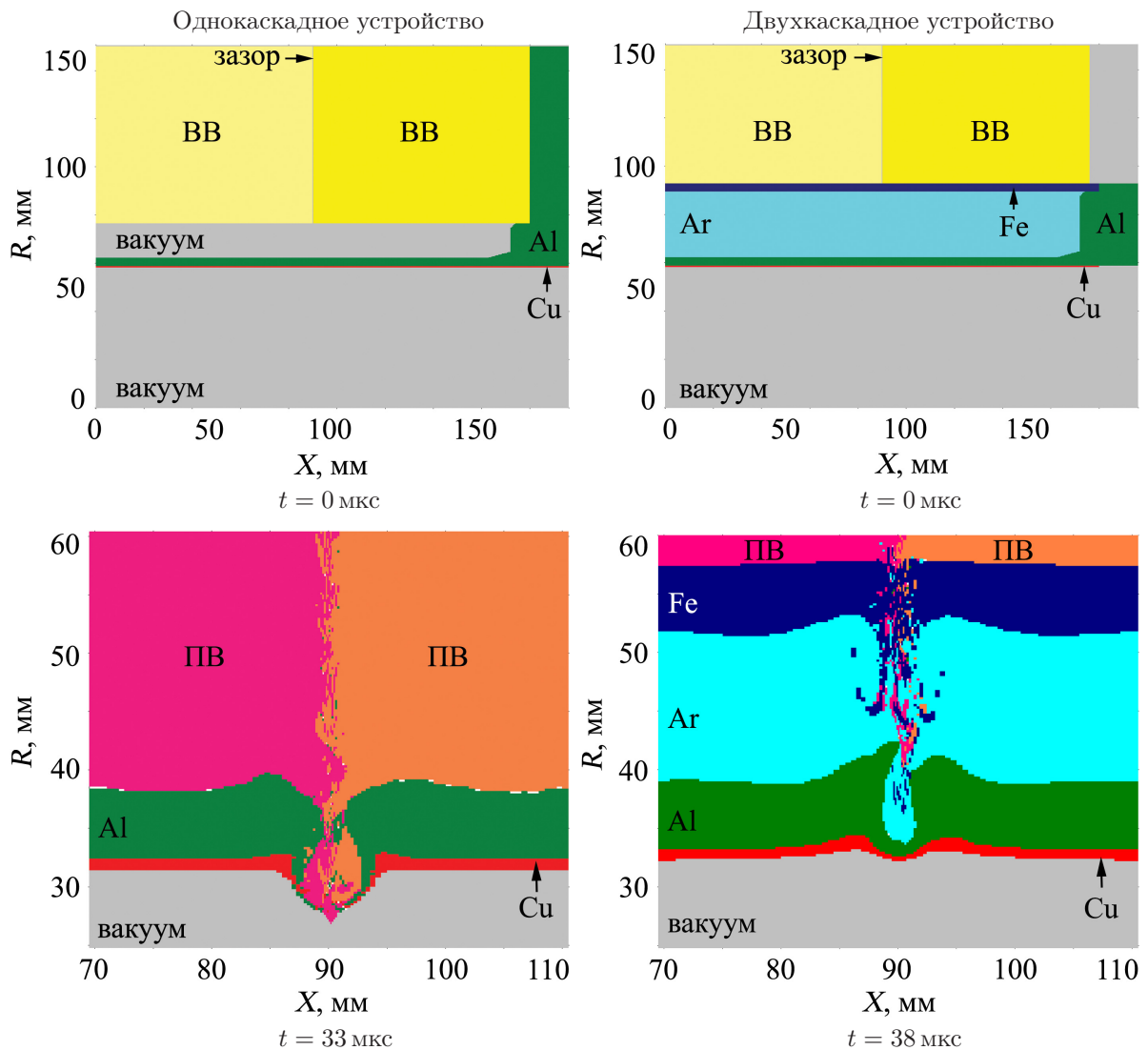


Рис. 9. Влияние зазоров в стыке зарядов BB в одно- и двухкаскадном устройствах

ствуют экспериментальным данным. Однако в однокаскадной конструкции экспериментальная скорость ВГЛ из меди через 8 мкс после начала движения начинает отклоняться от расчетной зависимости (радиус ВГЛ уже составил 10 мм). При этом анализ $R-t$ -диаграммы движения ВГЛ из меди (сравнение с последним рентгенографическим кадром) указывает на то, что в дальнейшем некоторые участки оболочки, расположенные вблизи центральной ее части, продолжали свое движение в соответствии с расчетом (синий кружок на рис. 6а). В периферийной части устройства реализовался случай запаздывания ВГЛ из меди по сравнению с расчетом (красный кружок).

Для двухкаскадной конструкции получить данные по скоростям для столь глубоких радиусов оболочки, как в случае с однокаскадным устройством, не удалось из-за обрыва регистрации. Однако анализ $R-t$ -диаграммы движения ВГЛ из меди указывает на то, что уже после радиуса схождения оболочки ≤ 20 мм для двухкаскадной конструкции также наблюдается отличие расчетной динамики движения по сравнению с экспериментом (точки по ВГЛ смещены вправо по сравнению с расчетной кривой). Приведенный анализ иллюстрируется графиками рис. 8, где приведены расчетные $R-t$ -диаграммы движения границ медной оболочки и экспериментальные точки на радиусах менее 20 мм для обеих конструкций. Время на графиках рис. 8 отсчитывается от начала движения ВГЛ из меди.

На рис. 9 приведены начальные геометрии двумерных расчетов и полученные расчетные геометрии сходящихся лайнеров в зоне стыка ВВ на момент достижения радиуса ≈ 30 мм. Расчеты были проведены в целях проверки предположения, что видимое на рентгенограмме локальное возмущение есть результат влияния зазора в стыке зарядов ВВ. Величина зазора выбрана, исходя из допусков на неплоскостность торцевых поверхностей, которые предполагают возможность локальных зазоров до 0.15 мм. Для мажорантной оценки в расчете задан зазор между торцами 0.2 мм. Расчеты влияния зазора в стыке зарядов ВВ проведены для обеих конструкций. Время на рисунках указано с привязкой к экспериментальным временам работы каждой конструкции.

Из эскизов, приведенных на рис. 9, следует, что возмущение на лайнере из меди от зазора в стыке зарядов ВВ существенно больше в случае однокаскадной конструкции взрывного цилиндрического устройства и, возможно, наступает его прорыв. Для двухкаскадной конструкции прорыв возможен толь-

ко в первом каскаде, примыкающем к ВВ. Наличие газового слоя и алюминиевой оболочки второго каскада препятствуют прорыву медного лайнера.

Из приведенных результатов сопоставления эксперимента и расчетов следует, что экспериментальные данные для обоих устройств удовлетворительно описываются в одномерных расчетах, а причина нарушения симметрии лайнера в однокаскадном устройстве наиболее вероятно связана с наличием зазора в стыке зарядов ВВ, что указывает на необходимость использования сплошных зарядов ВВ.

При подготовке экспериментов с выбранными двумя схемами цилиндрического устройства проведены двумерные расчеты, задачей которых было определить требования по чистоте обработки внутренней поверхности медного лайнера с целью подавления эффекта ударно-индуцированного «пыления». В расчетах находились параметры возмущений (амплитуда и длина волны) на внутренней поверхности, при которых не происходит их роста с разрушением (т.е. пылеобразованием) в процессе схождения ВГЛ из меди.

Приведем методику этих двумерных расчетов на примере рассмотрения развития возмущения с критической амплитудой A_0 и длиной волны λ , превышение которого может вызвать пыление. Моделируется движение к центру участка цилиндрического медного лайнера с одиночным возмущением на внутренней поверхности. На наружной границе лайнера задается давление от времени, соответствующее получаемому в расчетах, описывающих движение лайнера для каждой схемы. Таким образом воспроизводится динамика разгона лайнера, реализуемая в двух рассматриваемых устройствах. По полученному в расчете изменению амплитуды возмущения делается вывод о возможности или отсутствии пыления.

На рис. 10 представлены задаваемые в расчетах зависимости давления от времени на НГЛ из меди для испытанных однокаскадного и двухкаскадного устройств. Время отсчитывается от момента начала детонации ВВ.

На рис. 11а приведена начальная геометрия двумерного расчета с заданием возмущения с $A_0 = 2a_0 = 6$ мкм, $\lambda = 50$ мкм, выставленного в качестве критического. При обработке поверхности недопустимым являлось увеличение начальной амплитуды возмущений $A_0 \geq 6$ мкм или уменьшение длины волны $\lambda \leq 50$ мкм. На рис. 11б показано полученное в расчетах изменение амплитуды возмущений от времени в однокаскадном и двухкаскадном устройствах.

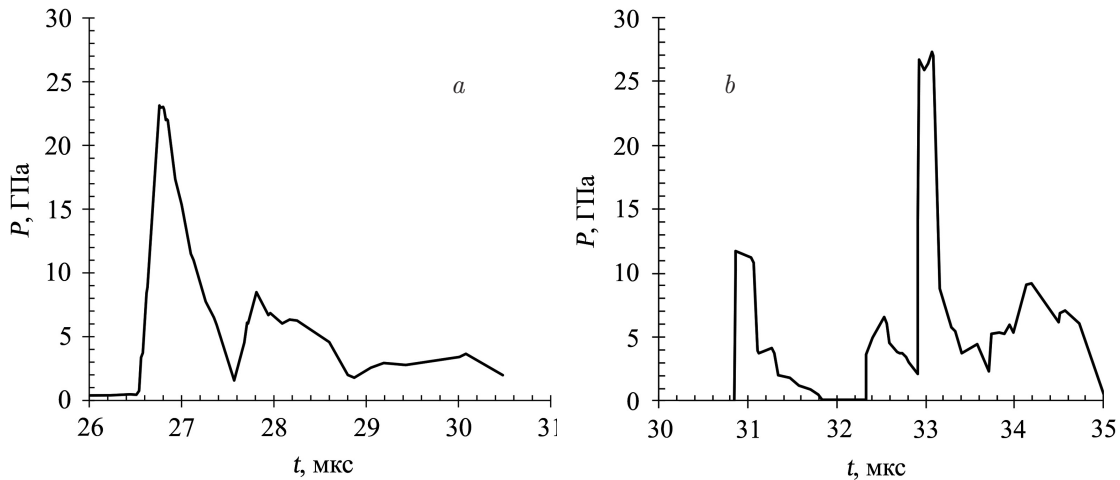


Рис. 10. Зависимости давления от времени на НГЛ из меди для однокаскадного (а) и двухкаскадного (b) устройств, задаваемые в расчетах

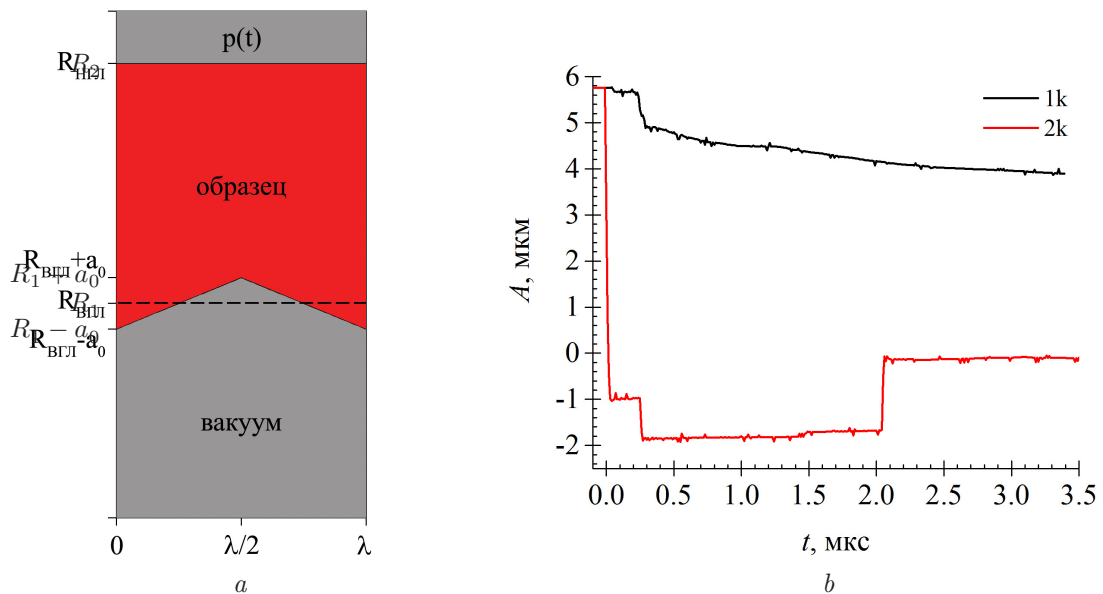


Рис. 11. а) Начальная геометрия расчета развития мелкомасштабных возмущений. Штриховой линией обозначено положение ВГЛ из меди при отсутствии возмущения. R_1 — радиус ВГЛ, R_2 — радиус НГЛ. б) Изменение амплитуды возмущений от времени, отсчитываемого с начала движения ВГЛ. 1к — однокаскадное устройство, 2к — двухкаскадное устройство

На рис. 11b положительные значения амплитуды соответствуют глубине впадины, отрицательные — высоте выступа. В однокаскадном устройстве амплитуда возмущений уменьшается до величины 4 мкм за первые 3 мкс и в дальнейшем возмущения не развиваются. В двухкаскадном устройстве за счет действия слабых УВ возмущения переворачиваются в противофазу в течение 2 мкс и в дальнейшем не развиваются при действии последующих УВ.

Таким образом, определено, что выбранные режимы нагружения позволяют подавить пылеобра-

зование при росте мелкомасштабных возмущений с начальной амплитудой возмущений $A_0 \leq 6$ мкм и длиной волны $\lambda \geq 50$ мкм из микрорельефа поверхности в обоих устройствах. В экспериментах, проведенных с двумя типами устройств, в пределах чувствительности используемых методик не зарегистрировано эффекта ударно-индуцированного «пыления» с внутренней поверхности лайнеров из меди. Поэтому можно сделать вывод о том, что результаты предварительных двумерных численных расчетов, которые были проведены для прогнозирования выброса частиц с поверхности ВГЛ, подтвердились.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана возможность подавления эффекта ударно-индуцированного «пыления» с внутренней границы цилиндрических лайнеров, разгоняемых с помощью энергии химического взрывчатого вещества путем их безударного квазиизэнтропического или изэнтропического ускорения до скоростей $\sim 5\text{--}7$ км/с.

2. Установлено, что для подавления крупномасштабных начальных возмущений использование двухкаскадной конструкции с газовым «смягчением» более эффективно, чем однокаскадной конструкции с вакуумным зазором.

3. Оба испытанных устройства имеют ресурс по оптимизации, хорошую симметрию схождения цилиндрических лайнеров, удовлетворительно описываются расчетами и могут быть использованы в задачах по сжатию замагниченной плазмы.

Благодарности. Авторы выражают признательность А. Л. Михайлову, который стоял у истоков работ, за внимательное прочтение и многочисленные ценные замечания, а также сотрудникам, принимавшим участие в организации, проведении экспериментов и расчетов, обработке и оформлении результатов: Д. Е. Зотову, А. В. Рыжкову, А. С. Пупкову, А. В. Котину, В. А. Комракову, В. В. Ковалдову, А. А. Утенкову, В. В. Санкину, И. В. Юртову, В. А. Баранову, Д. М. Моисееву, В. В. Ерастову, С. А. Янкову, И. В. Шмелеву, А. О. Яговкину, А. Е. Сафронову, А. Е. Ковалеву, М. И. Ткаченко, Т. А. Адигамовой, Г. С. Яндубаеву, С. Е. Елфимову, Р. В. Тилькунову, И. Б. Шадиееву, Б. И. Ткаченко, М. В. Логинову, Е. В. Шевнину.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы по созданию молодежных лабораторий (научная тема № FSWE — 2021-0010 «Газодинамика и физика взрыва») и Госкорпорации «Росатом» по программе РТТН (проект «Исследование теплофизических свойств веществ при сжатии до рекордно высоких давлений и магнитных полей»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. С. Вахромеев, В. Н. Мохов, Н. А. Попов, Атомная энергия **49** (2), 121 (1980).
2. Е. Н. Аврорин, Л. П. Феоктистов, Л. П. Шабаршов, Физика плазмы **6**, 965 (1980).
3. В. Н. Мохов, в сб. *Высокие плотности энергии*, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (1997), с. 173.
4. Н. А. Попов, В. А. Щербаков, В. Н. Минеев и др., УФН **178**, 1087 (2008).
5. J. R. Asay and L. M. Bakker, J. Appl. Phys. **45**, 2540 (1974).
6. В. А. Огородников, А. Г. Иванов, А. Л. Михайлов и др., Физика горения и взрыва **34**, 103 (1998).
7. В. А. Огородников, С. В. Ерунов, А. О. Бликов и др., ЖЭТФ **160**, 621 (2021).
8. D. H. Dolan, Rev. Sci. Instr. **91**, 051501 (2020).
9. Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. N. Suvorov et al., in *11th IEEE Pulsed Power Conference/Digest of Technical Papers*, ed. by G. Cooperstein and I. Vitkovitsky (1997), p. 1669.
10. В. А. Аринин, Б. И. Ткаченко, *Труды РНТОРЭС имени А. С. Попова*, сер. Цифровая обработка сигналов и ее применение, вып. VII-2 (2006).
11. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин и др., ВАНТ, сер. Методики и программы числ. решения задач мат. физики, вып. 3, 11 (1982).
12. С. М. Бахрах, С. Ф. Спиридонов, А. А. Шанин, ДАН СССР **276**, 829 (1984).
13. Ю. В. Янилкин, А. А. Шанин, Н. П. Ковалев и др., ВАНТ, сер. Мат. моделир. физ. процессов, вып. 4, 69 (1993).
14. В. Н. Зубарев, А. А. Евстигнеев, Физика горения и взрыва **20**, 6 (1984).
15. Б. Л. Глушак, Л. Ф. Гударенко, Ю. М. Стяжкин, ВАНТ, сер. Мат. моделир. физ. процессов, вып. 2, 57 (1991).
16. Б. Л. Глушак, О. Н. Игнатова, С. С. Надежин и др., ВАНТ, сер. Мат. моделир. физ. процессов, вып. 2, 25 (2012).
17. А. В. Федоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин, и др., Физика горения и взрыва **81** (5), 78 (2018).
18. V. A. Arinin and B. I. Tkachenko, Pattern Recognition and Image Analysis **19**, 63 (2010).
19. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов и др., ЖЭТФ **151**, 592 (2017).