

ВЛИЯНИЕ ГАЗА НА ПРОЦЕСС ВЫБРОСА ЧАСТИЦ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА ПРИ ВЫХОДЕ НА НЕЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

*В. А. Огородников**, *А. Л. Михайлов*, *В. С. Сасик*, *С. В. Ерунов*,
М. А. Сырунин, *А. В. Федоров*, *Н. В. Невмержицкий*, *Е. В. Кулаков*,
О. А. Клещевников, *М. В. Антипов*, *И. В. Юртов*, *А. В. Руднев*,
А. В. Чапаев, *А. С. Пупков*, *Е. Д. Сеньковский*, *Е. А. Сотсков*,
В. В. Глушихин, *И. А. Калашник*, *С. А. Финюшин*,
Е. А. Чудаков, *Д. А. Калашников*

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

Поступила в редакцию 8 октября 2015 г.

В связи с возможностью влияния засорения плазмы частицами металла на работу ряда конструкций или регистрацию движения лайнеров доплеровскими методами в последнее время вопросу выброса частиц при выходе ударной волны на свободную поверхность образца или «пылению» уделяется повышенное внимание. Причем в большей степени имеется информация об источнике «пыления», связанная с шероховатостью поверхности, технологией изготовления, дефектностью материала, его старением, и в меньшей степени — с факторами, влияющими на этот процесс, такими как профиль и амплитуда давления на фронте ударной волны, выходящей на свободную поверхность образца, наличие газа перед свободной поверхностью и давления в нем.

DOI: 10.7868/S0044451016080204

В последние годы возобновился интерес к проблеме «пыления» или явлению выброса частиц со свободной поверхности (СП, FS) материала при выходе на нее ударной волны (УВ, SW) определенной амплитуды [1–14]. Установлено, что главная причина этого явления связана с шероховатостью СП величиной от единиц до десятков микрометров, обусловленной, например, ее токарной или фрезерной обработкой. Из микронеровностей рельефа СП выбрасываются микрокумулятивные струи, которые затем под действием градиента скорости вдоль их оси распадаются на отдельные частицы размером от единиц до десятков микрометров. Расчетное моделирование процесса «пыления» на основе решения Рихтмайера–Мешкова для малых периодических синусоидальных возмущений на СП идеальной

жидкости, взаимодействующей с волной Тейлора или стационарной УВ, проведено в работах [12, 14].

При наличии «пыления» СП оказывается экранированной «подушкой» из этих частиц, которая препятствует регистрации тонкой структуры динамики движения СП с использованием, например, доплеровских методов [15]. В ряде случаев наличие частиц перед СП вообще недопустимо, например, в устройствах термоядерного синтеза при сжатии плазмы [16, 17]. В этой связи представляет интерес более детальное экспериментальное исследование взаимодействия рассматриваемых частиц различных размеров, движущихся с различными скоростями, с газом, находящимся перед СП. В данной работе представлены результаты исследования процесса «пыления» при выходе УВ с амплитудой на фронте 13 и 50 ГПа на СП образцов из свинца, которая граничила с разреженным воздухом («слабым» вакуумом) при давлении $P = 10^4$ Па или сжатым углекислым газом (CO_2) при давлениях $P =$

* E-mail: root@gdd.vniief.ru

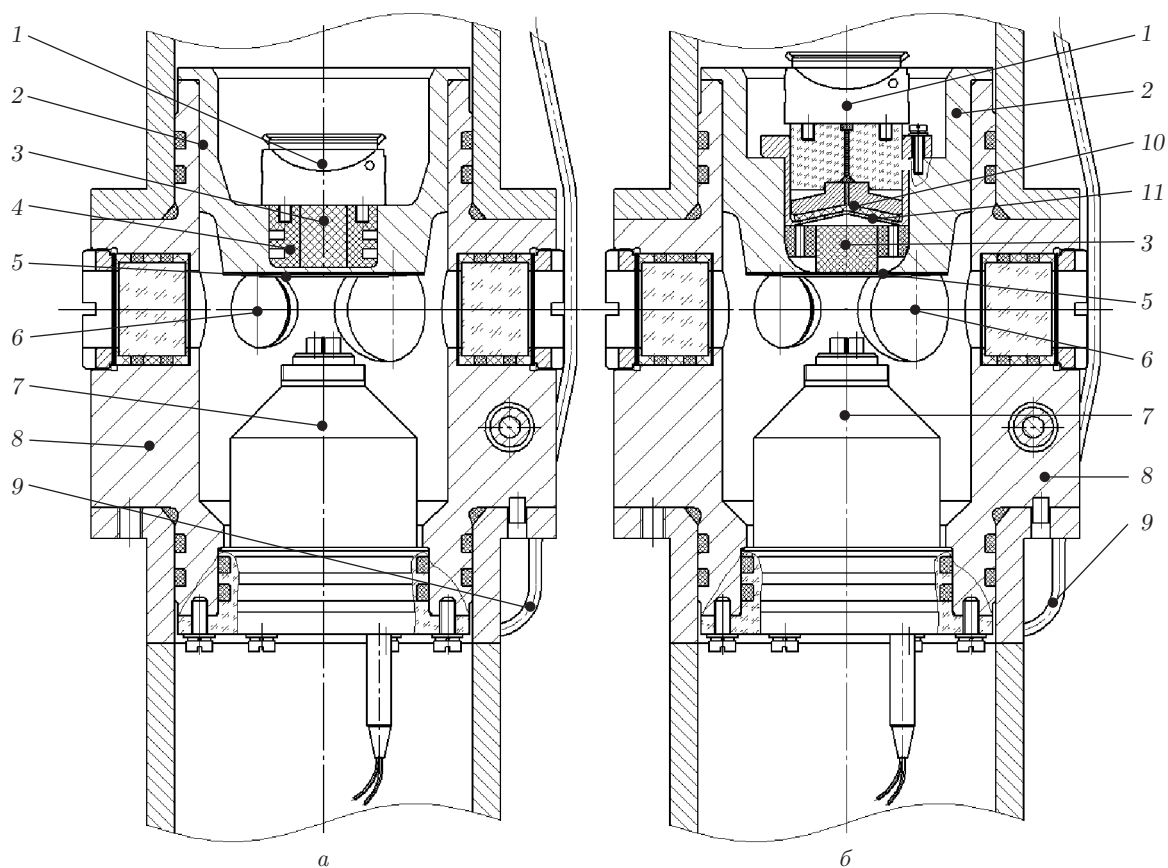


Рис. 1. Схема нагружения образцов, расположенных в камере, для давления на фронте УВ, равном 13 (а), 50 (б) ГПа. 1 — розетка с электродетонатором, 2 — стальная обойма, 3 — заряд взрывчатого вещества $\varnothing 15 \times 10$ мм или $\varnothing 20 \times 15$ мм, 4 — вставка из пенопласта, 5 — образец из свинца $\varnothing 60 \times 2$ мм, 6 — оптическое окно, 7 — измерительный приемник с пьезоэлектрическими и PDV-датчиками, 8 — корпус камеры, 9 — система газонаполнения, 10 — пластиковое ВВ, 11 — лайнер из стали

$= 2 \cdot 10^5$ Па и $P = 4 \cdot 10^5$ Па. При выбранных величинах амплитуды давлений 13 ГПа ($P_{SW} < P_{melt}$) и 50 ГПа ($P_{SW} > P_{melt}$) свинец соответственно не плавится или плавится в волне разгрузки [18, 19]. Эксперименты проводили на комплексе «ПЫЛЕ-НИЕ», подробно описанном в работе [14], в котором был модернизирован приемник с пьезоэлектрическими датчиками путем изменения их конструкции и дополнительного введения PDV-датчиков методики гетеродин-интерферометра [20]. Одновременное использование независимых методик двухкадровой двухракурсной лазерно-оптической микро- и макросъемки, импульсной рентгенографии, пьезоэлектрических и PDV-датчиков позволило получить в каждом эксперименте более полную информацию об исследуемом процессе.

Свободная поверхность образцов имела шероховатость по ГОСТ 2789-73 $R_z = 10-30$, или глубину

микронеровностей (амплитуду возмущений) $2a_0 \approx 10-30$ мкм и расстояние между их вершинами (длину волны возмущений) $\lambda \approx 60-190$ мкм. Шероховатость связана с токарной обработкой, а ее параметры измерялись при помощи оптического профилометра «MicroHAM-100».

Ударную волну в образцах из свинца марки С1 диаметром 60 мм и толщиной $\Delta = 2$ мм создавали при контактном подрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ) различной толщины на пластине из стали марки 12Х18Н10Т толщиной $l = 1-7$ мм, отделяющей образец от заряда ВВ. Иницирование заряда ВВ осуществляли электродетонатором ($P_{SW} = 13$ ГПа, рис. 1а) или лайнером, разгоняемым зарядом пластикового ВВ ($P_{SW} = 50$ ГПа, рис. 1б). В интересах лучшего использования возможностей теневых лазерно-оптической и рентгенографической методик, фронт «пылевого» потока имел слегка вы-

Таблица. Параметры постановки опытов и результаты их обработки

Параметр	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5	Опыт 6	Опыт 7	Опыт 8
l , мм	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	1.0	1.0	1.0
$R_z/2 = a_0$, мкм	10	10	10	10	10	10	30	20
λ , мкм	60	60	60	60	60	60	190	60
P_{SW} , ГПа	13	13	13	13	13	50	50	50
P_g , кПа	10	10	200	200	400	10	10	200
u_{FS} , км/с	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	2.2–2.3	2.2–2.4	2.1–2.2
u_{PF} , км/с	1.0	1.0–1.2	0.9	0.9	0.8–0.9	3.6–3.7	4.3–4.6	3.2–3.5
u_{SW} , км/с	–	–	1.0	1.0	1.1	–	–	–
d , мкм	–	4–20	2–4	2–4	–	1–6	–	4–70
Среда	воздух	воздух	CO ₂	CO ₂	CO ₂	воздух	воздух	CO ₂

пуклую форму, что не влияло на общую картину исследуемого процесса. В выбранной постановке экспериментов на СП образцов из свинца выходила нестационарная УВ с убывающим профилем и амплитудой давления на фронте $P_{SW} = 13$ ГПа и $P_{SW} = 50$ ГПа (на оси образца), которая была соответственно меньше или больше давления плавления свинца в волне разгрузки. Такие параметры УВ были выбраны специально, чтобы, с одной стороны, при распаде разрыва на контактной границе СП–газ в последнем создавалась УВ со скоростью распространения больше или меньше скорости потока частиц. С другой стороны, как известно, при плавлении материала может заметно измениться спектр размеров частиц [10]. Основные параметры постановки экспериментов и результаты их обработки приведены в таблице, где P_{SW} — амплитуда давления на фронте УВ при ее выходе на СП образца из свинца; P_g — начальное давление в углекислом газе; u_{FS} , u_{PF} и u_{SW}^g — скорости соответственно СП образца, потока частиц и УВ в углекислом газе; d — размер частиц, оцененный по закону торможения в газе [18].

На рис. 2 и 3 приведены для иллюстрации результаты опытов по регистрации параметров процесса «пыления» в разреженном воздухе (*a, в, д*) и углекислом газе (*б, з, е*) с использованием различных методик (*a, б* — лазерно-оптическая съемка; *в, з* — спектрограммы, регистрируемые с помощью PDV-датчиков; *д, е* — профиль давления, регистрируемый пьезодатчиками) при различных значениях давления на фронте УВ, выходящей на СП, оцени-

ваемом по профилям скоростей, регистрируемых на оси СП образцов PDV-датчиками. На рис. *a, б* штриховыми линиями нанесено положение СП, регистрируемое рентгенографической съемкой. На рис. 2 и 3 момент времени T_0 соответствует выходу УВ на СП образца, моменты T_1 и T_2 — нагружению пьезодатчиков фронтом потока частиц и свободной поверхностью образца. Моменты времени T_0 , T_1 и T_2 отсчитываются от момента подачи высоковольтного импульса на электродетонатор. Их различие в опытах с амплитудой давления на фронте УВ, равном 13 и 50 ГПа, связано с использованием различных схем нагружения исследуемых образцов (рис. 1*a, б*).

На рис. 4 приведены $x-t$ -диаграммы движения фронта потока частиц и СП образца, построенные с использованием данных различных методик.

Из приведенных данных следует, что совместное использование независимых методик позволило зарегистрировать в каждом эксперименте форму и положение фронта потока частиц и СП, значения их скоростей и оценить характерные размеры частиц вблизи фронта потока.

Для случая $P_{SW} < P_{melt}$ в среде разреженного воздуха (рис. 2*в*) с помощью PDV-датчиков регистрируется как скорость свободной поверхности $u_{FS} = 0.7$ км/с (яркая линия), так и спектр скоростей частиц с максимальными значениями до $u_{PF} = 0.9$ км/с. При переходе к атмосфере CO₂ (рис. 2*з*) выраженность эффекта «пыления» уменьшается, а скорость потока частиц не превышает скорости УВ в углекислом газе ($u_{PF} \leq u_{SW}^g$), фронт которой отчет-

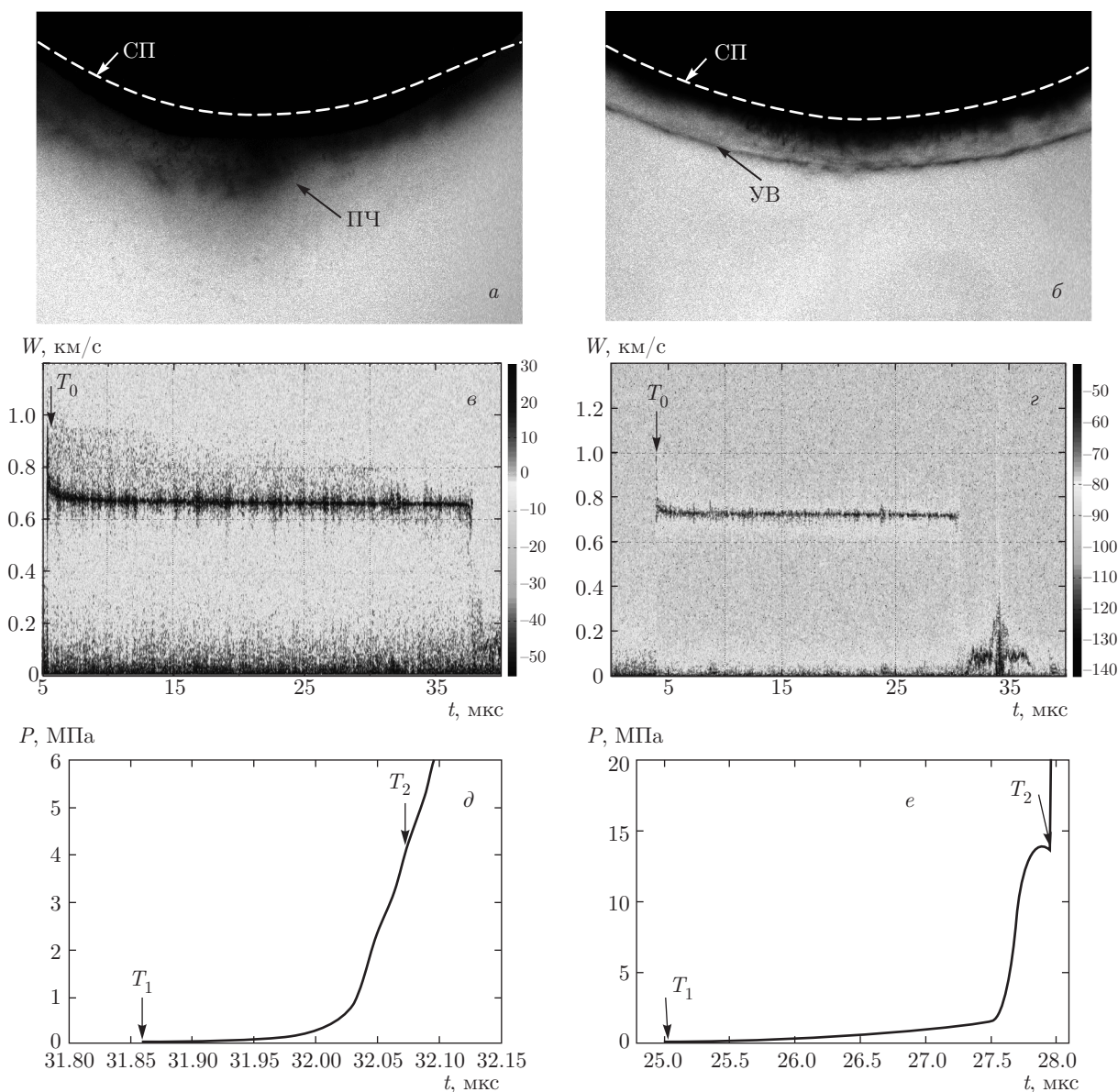


Рис. 2. Результаты опытов при давлении на фронте УВ, равном 13 ГПа

ливо наблюдается на хронограммах опыта (рис. 2б). Основная масса частиц располагается между СП и фронтом УВ, хотя отдельные частицы могут опережать фронт УВ (рис. 2б). Аналогичную картину процесса наблюдали при движении частиц вблизи фронта УВ в воздухе при атмосферном давлении [6]. Увеличение давления в углекислом газе с $2 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^5$ Па приводит к возрастанию скорости УВ в нем приблизительно на 10%. При этом частицы интенсивнее тормозятся в газе, прижимаясь к СП образца, и с помощью PDV-датчиков регистрируется не спектр размеров частиц, а скорость поверхности.

При $P_{SW} > P_{melt}$ с помощью PDV-датчиков зарегистрирован спектр скоростей частиц свинца с максимальным значением скорости фронта потока как в атмосфере разреженного воздуха $u_{PF} = 3.6-3.7$ км/с, так и в углекислом газе $u_{PF} = 3.2-3.5$ км/с (рис. 3в,з). Скорость свободной поверхности $u_{FS} = 2.2$ км/с в обоих случаях видна только на начальном участке спектрограммы, далее СП экранируется плотным потоком частиц. Указанный факт говорит об увеличении массы выбрасываемых частиц при плавлении свинца в сравнении с твердым состоянием [10]. Из спектрограммы

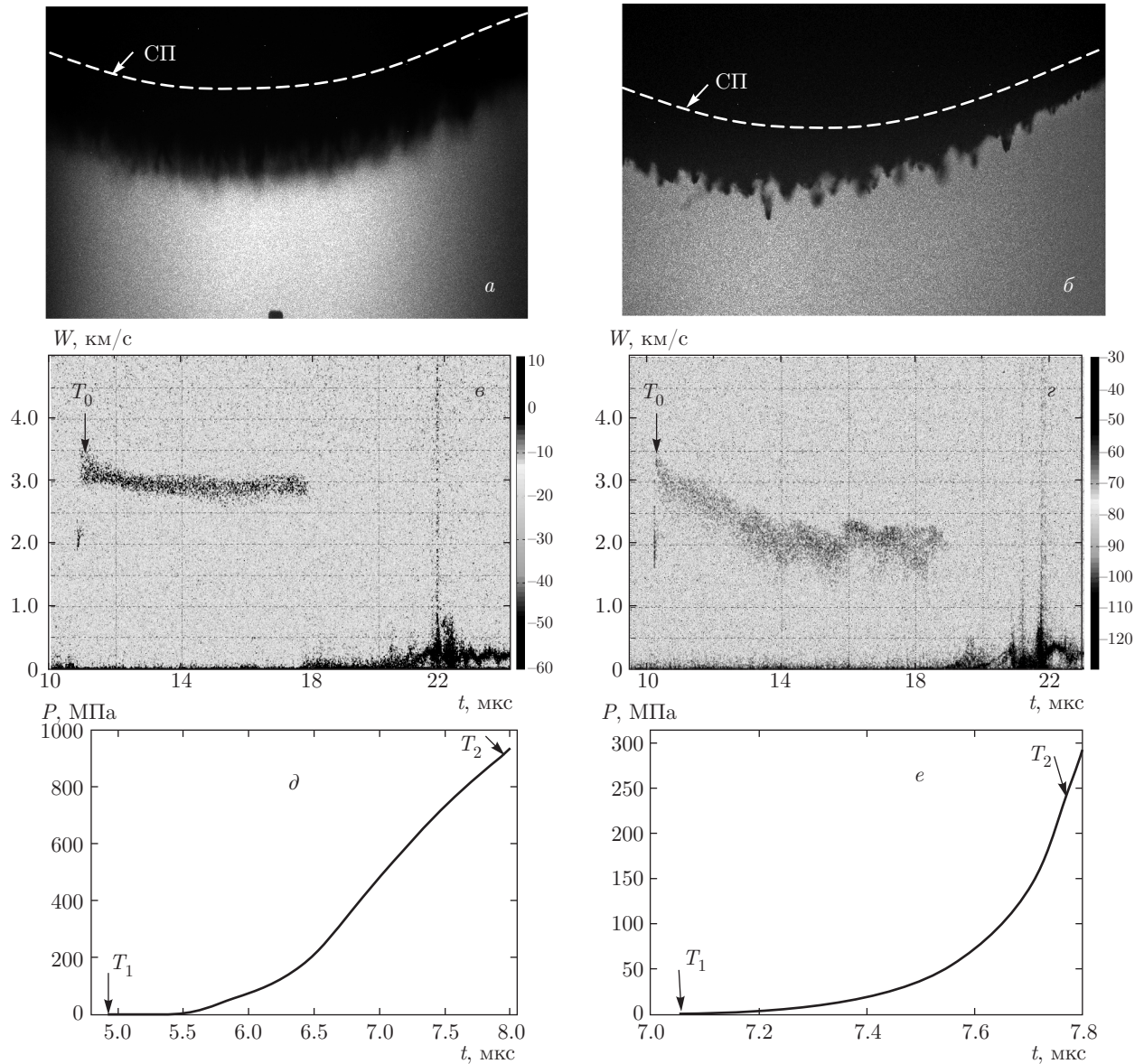


Рис. 3. Результаты опытов при давлении на фронте УВ, равном 50 ГПа

видно, что градиент убывания скорости облака частиц в атмосфере разреженного воздуха существенно меньше, чем в углекислом газе. Оценка размеров частиц по закону их торможения в газе дает для разреженного воздуха 1–6 мкм, для углекислого газа — 40–70 мкм. Такое различие, по мнению авторов, объясняется тем, что в атмосфере углекислого газа наиболее мелкие быстрые частицы прижимаются ближе к СП, а на передний план — в зону «видимости» метода PDV — выходят соответственно более крупные. При этом, по-видимому, целесообразно использовать для регистрации динамики движения

лайнера не методику измерения скорости $u(t)$, которая в данном случае подвержена резким колебаниям из-за случайных возмущений частиц, а методику измерения перемещения или $x-t$ -диаграмму движения СП. В качестве таковой может быть рекомендована, например, методика резистивных датчиков [21].

Кроме того, если давление на фронте УВ в образце $P_{SW} > P_{melt}$, то скорость потока частиц $u_{PF} \approx (1.2-2.0)u_{FS}$ [10, 22] больше скорости УВ в газе, сформированной от распада разрыва на контактной границе СП-газ, $u_{SW}^g \approx (1.1-1.2)u_{FS}$ [23], т. е. реализуется условие $u_{PF} > u_{SW}^g$ и на хронограммах

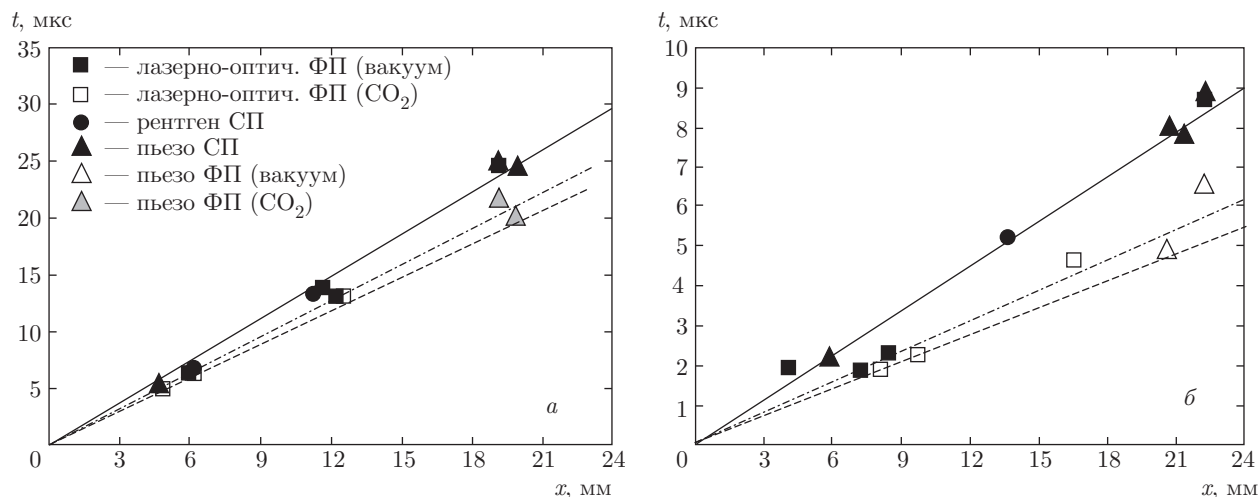


Рис. 4. $x-t$ -диаграммы движения СП (сплошные линии) и фронта потока (ФП) частиц в вакууме (штриховые линии) и углекислом газе (штрихпунктирные линии), построенные по результатам экспериментов при давлении на фронте УВ, равном 13 (а) и 50 (б) ГПа

опыта фронт УВ в углекислом газе не наблюдается (рис. 3б), поскольку частицы опережают фронт УВ в газе. За счет дробления частиц в случае плавления материала образца спектр размеров частиц смещается в сторону меньших значений [10], частицы более эффективно тормозятся в углекислом газе (рис. 3в,г) и образуют на СП возмущенный слой (рис. 3б), который при торможении на газе должен трансформироваться по законам развития неустойчивости на контактной границе с газом [24]. В разреженном воздухе (слабый вакуум) отмеченных выше закономерностей не наблюдается (рис. 3а,в), а скорость частиц в 1.3 раза больше, чем скорости частиц в углекислом газе.

Таким образом, установлено, что при определенной интенсивности УВ в образце, при которой $u_{PF} > u_{SW}^g$, наличие газа перед СП и давления в нем приводит к торможению частиц. Это обстоятельство благоприятно с точки зрения сжатия газа в технических устройствах, в которых применяются специальные меры для подавления эффекта «пыления» [17].

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, Н. Г. Богдавленский, *Приборы и техника эксперимента* № 2, 123 (2005).
3. T. Resseguier, L. Signor, A. Dragon, M. Boustie, G. Roy, and F. Llorca, *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**, 6 (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, and F. Cherne, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 264502 (2011).
9. Yongtao Chen, Haibo Hu, Tiegang Tang, Guowu Ren, and Qingzhong Li, *J. Appl. Phys.* **111**, 053509 (2012).
10. D. M. Oró, 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., в *Труды XV междунар. конф. Харитоновские научно-тематические чтения*, Саров (2013), с. 666.

13. S. K. Monfared, D. M. Oró, 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. J. R. Asay and L. M. Barker, J. Appl. Phys. **45**, 2540 (1974).
16. А. С. Козырев, *Газодинамический термоядерный синтез*, РФЯЦ–ВНИИЭФ, Саров (2005).
17. М. А. Мочалов, Р. И. Ильяев, В. Е. Фортов и др., ЖЭТФ **146**, 169 (2014).
18. А. В. Федоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин и др., *Труды XV междунар. конф. Харитоновские научно-тематические чтения*, Саров (2013), с. 274.
19. В. Д. Урлин, ЖЭТФ **49**, 485 (1965).
20. O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez, and T. L. Whitworth, Rev. Sci. Instr. **77**, 083108 (2006).
21. Б. М. Ловягин, В. Н. Дудолодов, А. Г. Иванов, В. Д. Макаров, *Способ непрерывной регистрации положения профиля и скорости движущейся поверхности*, Патент № 2250434 (2003).
22. В. А. Огородников, А. Г. Иванов, А. Л. Михайлов и др., Физика горения и взрыва **34**(6), 103 (1998).
23. Н. М. Кузнецов, *Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах*, Машиностроение, Москва (1965).
24. А. Г. Иванов, Е. З. Новицкий, В. А. Огородников, С. Ю. Пинчук, Журнал прикладной механики и технической физики № 2, 90 (1982).