

УДК 532.529+533.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА РЕГИСТРАЦИИ МИНИМАЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ МАССЫ ЧАСТИЦ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ПЫЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

А. В. Фёдоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин, Д. А. Калашников,
Е. А. Чудаков, Е. И. Бутусов, И. С. Гнутов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, avfedorov@vniief.ru

В условиях ударно-волнового нагружения с поверхности материалов происходит выброс частиц. Приведены результаты экспериментов по определению минимальных значений удельной массы частиц, при которых скорость их движения можно зарегистрировать с помощью гетеродин-интерферометра (методика PDV). Описан эффект многократного сдвига частоты доплеровского сигнала при отражении лазерного излучения от поверхности металлов и полупрозрачного слоя пылевых частиц.

Ключевые слова: ударно-волновое пыление, гетеродин-интерферометр, спектр скоростей частиц, удельная масса.

DOI 10.15372/FGV20180510

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы определение характеристик потоков частиц при ударно-волновом пылении материалов являлось предметом исследования во многих научных работах [1–9]. Новые результаты в этой области получены в том числе и с помощью лазерного гетеродин-интерферометра (методика PDV) [7–11]. Гетеродин-интерферометр позволяет регистрировать спектр скоростей частиц, оценивать размер частиц по закону торможения в газе и определять с использованием индикаторных фольг их удельную массу. Однако данная методика имеет и ряд особенностей, требующих детального анализа. Важно знать, как глубоко проникает зондирующее излучение в пылевой поток, как интерпретировать появление на спектрограммах треков скорости, каковы минимальные значения удельной массы частиц, при которых метод эффективно регистрирует дисперсию скорости пылевого облака.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Минимальная удельная масса частиц, регистрируемая методикой PDV, определялась

с использованием никелевых частиц размером ≤ 3 мкм и насыпной плотностью $\rho = 1.35$ г/см³. Их наносили на поверхность стальных дисков ($\varnothing 90 \times 3$ мм) двумя способами. В первом случае частицы ровным слоем насыпали в кольцо $\varnothing 20 \times 0.35$ мм, их удельная масса составляла $M_{уд} = 50$ мг/см² (рис. 1,а). Во втором случае для создания на поверхности дисков равномерного распределения частиц с $M_{уд} = 0.2 \div 20$ мг/см² использовалась следующая методика. Сначала в емкости с этанолом известного объема помещали никелевые частицы заданной массы, затем полученную взвесь тщательно перемешивали и заливали в кольцо из оргстекла $\varnothing 20 \times 10$ мм, закрепленное на поверхности стального диска (см. рис. 1,б). После высыхания этанола на поверхности металлических дисков оставался слой никелевых частиц известной удельной массы. Распределение этих частиц по поверхности дисков не всегда было равномерным. Для опытов готовили несколько образцов и из них выбирали лучшие по указанному признаку. Одним из факторов неравномерного распределения частиц, например, являлось то, что при малой удельной массе частиц ($0.2 \div 1$ мг/см²) в конечной стадии испарения жидкий слой разбивается на капли, которые при высыхании стягивают за собой никелевые частицы и формируют области их концентрации в виде круглых пятен размером ≈ 0.1 мм. Такая полупрозрачная сетчатая

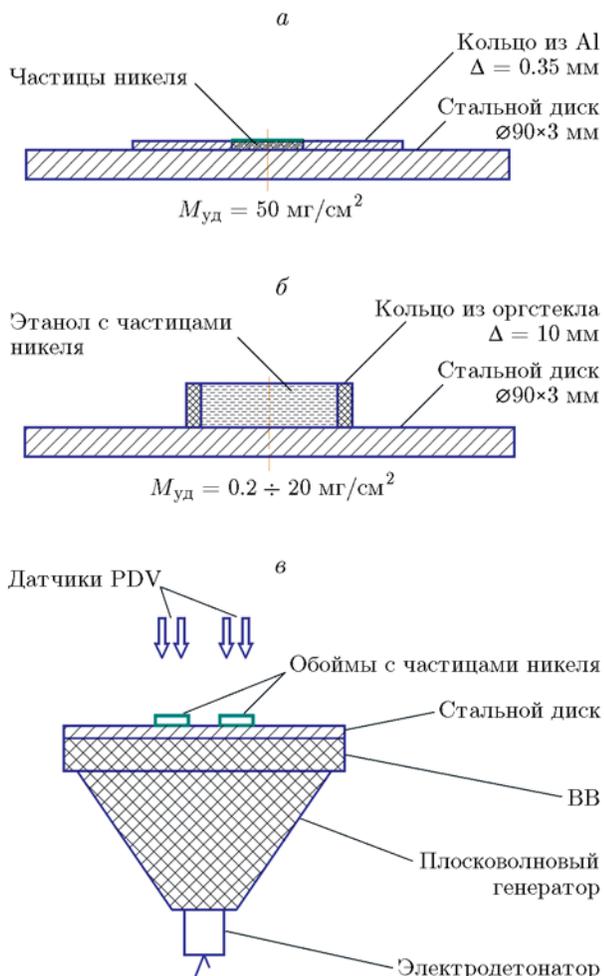


Рис. 1. Способ нанесения частиц на поверхность стальных образцов (а, б) и постановка экспериментов (в)

структура слоя частиц позволила зарегистрировать новые физические эффекты, о чем речь пойдет ниже.

Всего проведено восемь экспериментов: в семи из них удельная масса частиц составляла $0.2 \div 20$ мг/см² (причем в каждом опыте исследовалось по четыре сборки с двумя разными удельными массами, т. е. в центральной части стального диска размещалось четыре кольца с никелевыми частицами) и один опыт с удельной массой частиц 50 мг/см² (см. рис. 1,а). Схема экспериментов представлена на рис. 1,б. Пыление никелевых частиц происходило при нагружении плоской ударной волной (УВ) от заряда октогена или ТГ 5/5 диаметром 90 мм и толщиной $5 \div 25$ мм, инициируемого плосковолновым генератором диаметром 90 мм (см.

рис. 1,в). Давление УВ в стальных образцах составляло $10 \div 40$ ГПа. В ряде экспериментов для уменьшения давления УВ в стальных образцах диаметром 90 мм ($p < 20$ ГПа) нагружение стального диска выполняли через слой пенопласта толщиной 30 мм.

Кольца из оргстекла (см. рис. 1,б) перед опытами удаляли, чтобы исключить их откольное разрушение и формирование дополнительных источников пыления. Так как плотность никелевых частиц ($\rho = 1.35$ г/см³) меньше плотности стальной подложки, частицы заведомо должны отлетать от нее после выхода УВ на свободную поверхность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты экспериментов с никелевым порошком в порядке уменьшения удельной массы частиц (от 50 до 0.2 мг/см²) представлены в таблице, где $W_{ФП}^{max}$ — максимальная скорость фронта потока частиц при выходе УВ на свободную поверхность (СП), $W_{СП}$ — скорость движения СП стального образца, p — давление в стальном образце, d_{max} — диаметр никелевых частиц, рассчитанный по закону их торможения в газе [7–9].

На рис. 2 приведены характерные спектрограммы опытов. В ряде экспериментов зарегистрированы характерные откольные импульсы для материала подложки — сталь 20. Величина откольной прочности $\sigma_{отк} = 3.1 \div 3.4$ ГПа.

На спектрограммах рис. 2,а–е зарегистрированы скорости облака никелевых частиц. Спад скорости обусловлен торможением частиц в воздухе. Максимальные скорости фронта потока частиц при выходе УВ на свобод-

Результаты экспериментов

Рис. 2	$M_{уд},$ мг/см ²	$W_{ФП}^{max},$ м/с	$W_{СП},$ км/с	$p,$ ГПа	$d_{max},$ мкм
а	50	0.82	0.65	10.8	1.6
б	20	4.15	1.85	38.4	1.3
в	10	3.05	1.45	28.1	1.0
г	2	4.15	1.85	38.4	1.4
д	2	4.15	1.85	38.4	1.4
е	1	3.65	1.73	35.2	1.1
ж	0.5	1.05	1.05	18.9	—
з	0.2	1.05	1.05	18.9	—

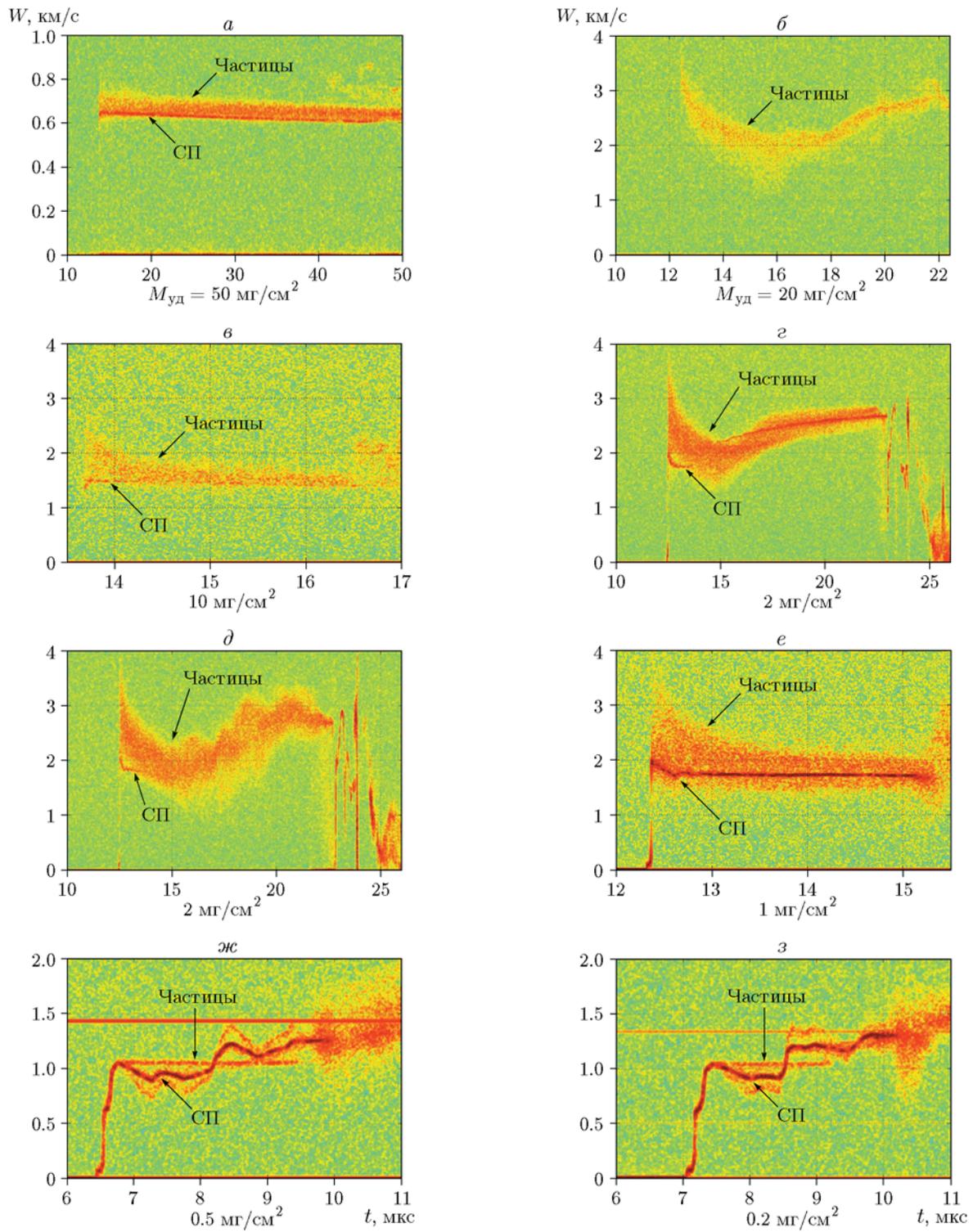


Рис. 2. Спектрограммы экспериментов по определению скоростей частиц и СП

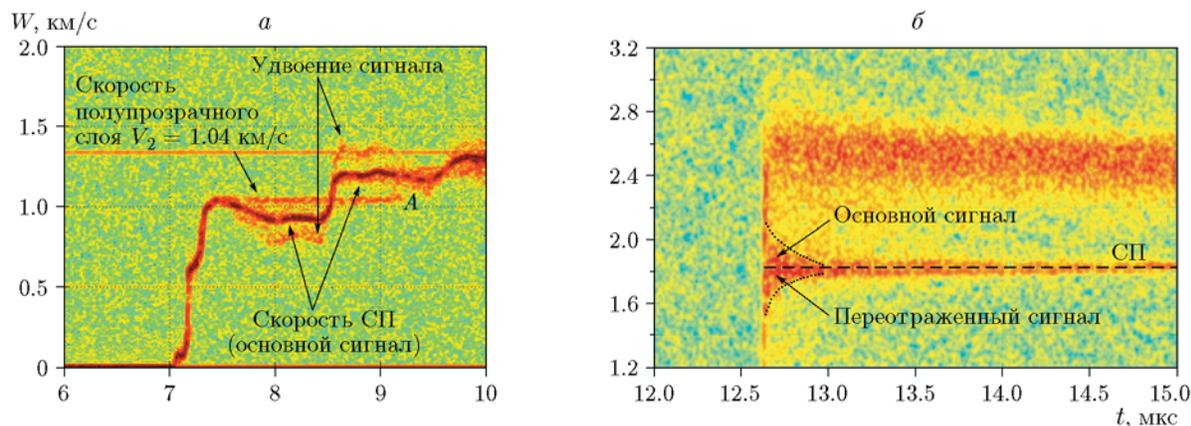


Рис. 3. Удвоение сигнала при отражении от слоя частиц

ную поверхность могут достигать $3 \div 3.5$ км/с (рис. 2, б–е).

Размер абсолютного большинства никелевых частиц не превышал 1.5 мкм. Размер определялся по верхней огибающей кривой облака скоростей частиц, которая соответствовала максимальному регистрируемому методом PDV размеру частиц d_{\max} . Скорости частиц меньшего размера тормозятся быстрее, и их кривые торможения лежат внутри облака скоростей частиц. Количество частиц большего, чем d_{\max} , размера столь мало, что чувствительности метода недостаточно для их регистрации. На рис. 2, ж, з представлены результаты экспериментов с удельной массой частиц 0.5 и 0.2 мг/см². Видно, что зарегистрирована постоянная скорость частиц. Однако предел порога регистрации удельной массы частиц еще не достигнут. Это следует из спектрограмм опытов, представленных на рис. 2, е–з, на которых скорость частиц регистрируется в виде достаточно яркой линии или облака. Таким образом, имеется запас по интенсивности отраженного сигнала, и оценки, проведенные по данным большой серии экспериментов по ударно-волновому пылению материалов [7–9], показывают, что минимальный предел может составлять $0.02 \div 0.05$ мг/см². По результатам экспериментов данной работы можно только утверждать, что методика PDV надежно регистрирует удельную массу частиц 0.2 мг/см².

РЕГИСТРАЦИЯ ЭФФЕКТА МНОГОКРАТНОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ СИГНАЛА

В опытах с малой удельной массой частиц (см. рис. 2, ж, з) на спектрограммах наблюда-

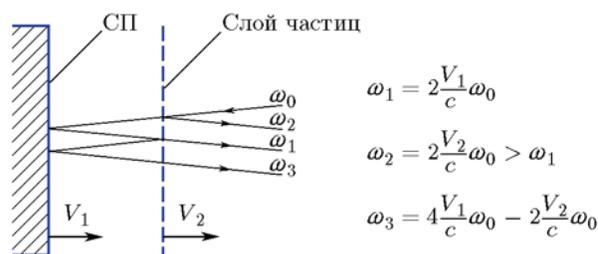


Рис. 4. Доплеровские сдвиги частоты при отражении излучения от свободной поверхности образца и от слоя частиц

ются интересные физические эффекты. Первый из них связан с взаимодействием лазерного излучения с полупрозрачным слоем частиц [12]. На спектрограммах (рис. 3) наряду со скоростью СП регистрируется переотраженный сигнал — удвоенная скорость СП относительно скорости полупрозрачного слоя частиц. Механизм возникновения данного эффекта схематично показан на рис. 4 и заключается в следующем. При отражении зондирующего излучения от тонкого слоя частиц (движущихся со скоростью V_2) и СП (V_1) происходят сдвиги частот сигнала: $\omega_2 = 2 \frac{V_2}{c} \omega_0$ и $\omega_1 = 2 \frac{V_1}{c} \omega_0$ (c — скорость звука в вакууме). Далее лазерный луч от слоя частиц переотражается назад со знаком минус и затем еще раз отражается от СП со знаком плюс. Происходит трехкратный сдвиг частоты сигнала. В итоге имеем $\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2 = 2 \left(2 \frac{V_1}{c} \omega_0 \right) - 2 \frac{V_2}{c} \omega_0$.

Таким образом, лазерное излучение (рис. 3, а), отраженное от СП ($V_1 = 0.92$ км/с), переотражается от слоя частиц назад в сто-

рону СП ($V_2 = -1.04$ км/с) и затем снова отражается от СП ($V_1 = 0.92$ км/с). В результате скорость, соответствующая дважды отраженному от СП сигналу, составляет $V_3 = 0.92 + 0.92 - 1.04 = 0.8$ км/с. Этот удвоенный сигнал мы и наблюдаем на спектрограмме. Затем в момент времени $t = 8.5$ мкс СП резко ускоряется до $V = 1.2$ км/с и начинает догонять слой частиц. На спектрограмме теперь скорость удвоенного сигнала $V_3 = 1.2 + 1.2 - 1.04 = 1.36$ км/с лежит выше скорости СП. При $t = 9.2$ мкс (точка *A* на рис. 3,а) СП догоняет полупрозрачный слой частиц и эффект исчезает.

Данный эффект удвоения скорости часто наблюдается при регистрации торможения выброшенных с поверхности частиц (рис. 3,б). В результате переотражения зондирующего излучения между СП и тормозящимися частицами на спектрограмме возникает составляющая, которая лежит ниже скорости СП.

Второй эффект заключается в том, что на спектрограммах опытов с малой удельной массой частиц (см. рис. 2,ж,з) дисперсия их скорости практически отсутствует. Вместо облака скоростей частиц регистрируется линия, которая соответствует движению тонкого полупрозрачного слоя со скоростью, равной скорости пика отскольного импульса. По нашему мнению, это связано с тем, что время взаимодействия УВ, выходящей со стороны металлической подложки с тонким слоем частиц, крайне мало. В результате выброса облака частиц распределения частиц по скоростям (дисперсии скорости) не происходит, а тонкому слою частиц передается импульс отскольного пика. Действительно, исходя, например, из удельной массы 0.5 мг/см² средняя толщина слоя никелевых частиц плотностью 1.35 г/см³ должна составлять ≈ 4 мкм. Таким образом, УВ со скоростью ≈ 4 мм/мкс проходит этот слой всего за 1 нс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены эксперименты по определению минимальных удельных масс частиц, при которых скорость их движения регистрируется методом PDV. Показано, что этот метод надежно регистрирует поток частиц при их удельной массе ≥ 0.2 мг/см². Зарегистрирован эффект трехкратного сдвига частоты лазерного излучения, который приводит к удвоению доплеровского сигнала скорости свободной поверхности

относительно скорости полупрозрачного слоя частиц. Данный эффект важен при интерпретации результатов экспериментов по ударно-волновому пылению поверхности материалов. При удельной массе ≤ 0.5 мг/см² пыление и дисперсия скорости частиц не зарегистрированы, тонкий слой частиц летит со скоростью, равной скорости пика отскольного импульса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Невмержицкий Н. В., Михайлов А. Л., Раевский В. А., Сасик В. С. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца // XIII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. — С. 604.
2. Signor L., de Resseguier T., Roy G., Dragon A., Llorca F. Fragment-size prediction during dynamic fragmentation of shock-melted tin: Recovery experiments and modeling issues // Shock Compression of Condensed Matter — 2007. — P. 593–596. — (AIP Conf. Proc.; V. 955).
3. Zellner M. B., McNeil W. V., Hammerberg J. E., Hixson R. S., Obst A. W., et al. Probing the underlying physics of ejecta production from shocked Sn samples // J. Appl. Phys. — 2008. — V. 103. — 023502.
4. Chen Yongtao, Hu Haibo, et. al. Experimental study of ejecta from shock melted lead // J. Appl. Phys. — 2012. — V. 111. — 053509.
5. Loison D., de Resseguier T., et al. Laser shock-induced melting and fragmentation in metals // Shock Compression of Condensed Matter. — 2011. — P. 1545–1548. — (AIP Conf. Proc.; V. 1426).
6. Sorenson D. S., Minich R. W., Romero J. L., Tunnell T. W., Malone R. M. Ejecta particle size distributions for shock-loaded Sn and Al targets // Shock Compression of Condensed Matter — 2001. — P. 531–534. — (AIP Conf. Proc.; V. 620).
7. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А., Калашников Д. А., Чудаков Е. А., Бутусов Е. И., Гнутов И. С. Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов // ЖЭТФ. — 2016. — Т. 149, № 2.
8. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А., Калашников Д. А., Чудаков Е. А., Бутусов Е. И., Гнутов И. С. Регистрация спектра скоростей частиц при выходе ударной волны на поверхность жидкостей различной вязкости // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 4. — С. 122–128.

9. **Федоров А. В., Михайлов А. Л., Антонюк Л. К., Шмелев И. В.** Экспериментальное исследование срывного разрушения капель и струй при их выбросе с поверхности жидкости // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 4. — С. 115–121.
10. **Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C., Whitworth T. L.** Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // Rev. Sci. Instrum. — 2006. — V. 77. — P. 083108(1–8).
11. **Holtkamp D. V.** Survey of advanced velocimetry experiments: A year (or two) in the life of photon doppler velocimetry // Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. — 2007.
12. **Андряш А. В., Асташкин М. В., Баранов В. К., Голубинский А. Г., Куратов С. Е. и др.** Оптогетеродинные доплеровские измерения баллистического разлета продуктов разрушения поверхности ударной волны: эксперимент и теория // ЖЭТФ. — 2016. — Т. 149, № 2.

Поступила в редакцию 4/XI 2017 г.
