

04.1;05.1

## Влияние наносекундного искрового разряда на косое соударение стального шара с металлической плитой

© А.Е. Дубинов<sup>1,2</sup>, Дж.Н. Исхакова<sup>2</sup>, В.А. Любимцева<sup>1</sup><sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия<sup>2</sup> Саровский физико-технический институт — филиал Научно-исследовательского ядерного университета „МИФИ“, Саров, Нижегородская обл., Россия

E-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Поступило в Редакцию 8 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 2 января 2022 г.

Принято к публикации 10 января 2022 г.

Экспериментально изучено влияние наносекундного искрового разряда на косое соударение стального шара с плоской чугунной плитой. Найдено, что угол отражения шара при столкновении с разрядом становится меньше угла подлета, в то время как при обычном соударении без разряда, наоборот, угол отражения больше угла подлета.

**Ключевые слова:** соударение твердых тел, искровой разряд, углы падения и отражения.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.06.52209.19102

Соударение тела с тяжелой преградой представляет собой фундаментальное явление, которое изучалось исследователями с древних времен. основополагающее исследование упругих соударений шаров с преградой применительно к бильярдной игре было выполнено Кориолисом в начале XIX века [1].

Давно было известно, что в идеальном случае при абсолютно упругом соударении кинетическая энергия сохраняется, а при косом соударении, кроме того, угол подлета  $\theta_i$  равен углу отражения  $\theta_r$ . В общем случае при косом соударении шара с тяжелой преградой закон преобразования углов видоизменяется: нормальная составляющая скорости уменьшается благодаря энергетическим потерям при сжатии материала шара и преграды, а касательная составляющая скорости уменьшается по причине трения шара о преграду в момент удара [2,3]. В случае малого трения потерями энергии в касательном направлении можно пренебречь, и при этом угол подлета всегда меньше угла отражения:  $\theta_i < \theta_r$  [4].

Динамика косых соударений шара с преградой изучалась в многочисленных экспериментальных работах [5–14]. В настоящей работе экспериментально исследовались однократные косые соударения подвешенного на проводящей нити стального шара с тяжелой чугунной плитой и влияние наносекундного искрового разряда на характеристики соударения. Мотивация этих исследований заключается в том, что искровые разряды генерируют в воздушном промежутке между электродами ударные волны [15–18], которые могут повлиять на характеристики соударения.

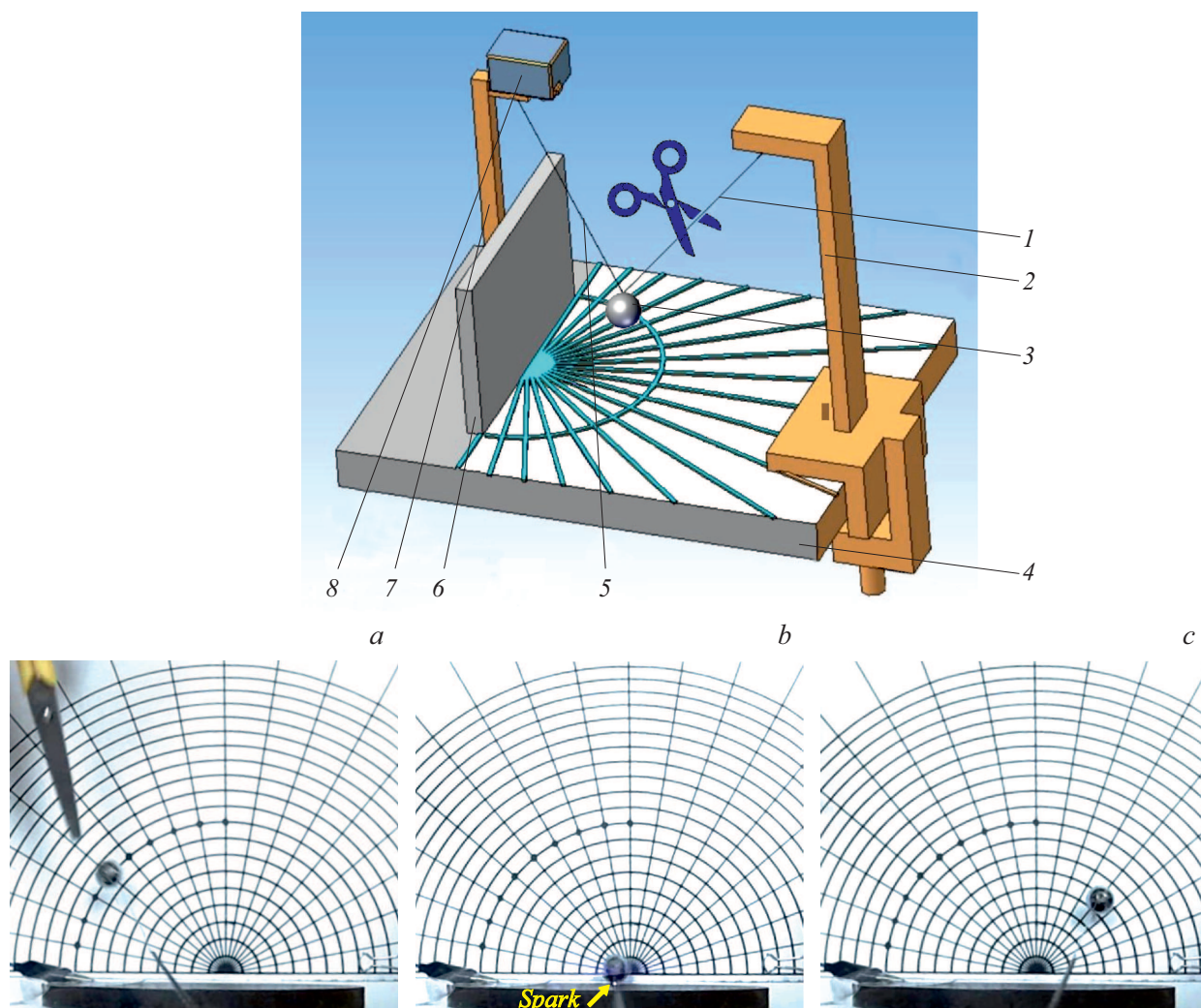
Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен и собран специальный стенд (рис. 1). Основу стенда составляет горизонтальный стол, на поверхность которого нанесена радиально-азимутальная

разметка. Вблизи центра разметки была установлена вертикальная Г-образная опора, на которой на стальной нити подвешивался шар. Длина нити вместе с элементами подвеса и крепления составляла  $L = 255$  mm, а ее диаметр — 0.33 mm. Для крепления верхнего конца нити к опоре и нижнего конца к шару использовались вертлюги, снимающие крутильные нагрузки в нити. Шар был выполнен из нержавеющей стали, имел диаметр 16 mm и массу 16.6 g. Поверхность шара была отполирована. В итоге опора, нить с элементами крепления и шар представляли собой маятник.

Вблизи точки равновесия маятника вертикально устанавливалась и закреплялась чугунная плита с плоской гладкой поверхностью так, чтобы в равновесном положении шар касался плоской поверхности плиты. Масса плиты 3.6 kg.

Для генерации искровых разрядов использовался генератор высокого напряжения, работающий по принципу постоянной зарядки и самопробоя. Он использовался в [19–22]. Ранее было определено, что на уровне зарядного напряжения, например  $\sim 5$  kV, на нагрузке в виде воздушного промежутка 1 mm он генерирует униполярные искровые разряды с током  $\sim 300$  A. Генератор подключался одним электродом к чугунной плите, а другим — к верхней точке подвеса. При этом напряжение к шару подводилось по нити через элементы крепления. Синхронизированные осциллограммы напряжения и тока искрового разряда при соударении шара с плитой приведены на рис. 2, а.

За движением шара следили с помощью закрепленного на Г-образной опоре видеорегистратора teXet DVR-905S, производящего видеозапись процесса с частотой 25 fps. Все эксперименты проводились в



**Рис. 1.** Схема экспериментов: 1 — вспомогательная нить, 2 — вспомогательная опора, 3 — стальной шар, 4 — горизонтальный стол с радиально-азимутальной разметкой, 5 — нить подвеса шара, 6 — чугунная плита, 7 — Г-образная опора, 8 — видеореги­стратор. На вставках представлены отдельные фазы соударения: *a* — начальное положение шара (видны ножницы, перерезающие вспомогательную нить); *b* — положение шара в момент удара, стрелкой показан микроканал искрового разряда; *c* — положение шара в момент первой остановки.

помещении при атмосферном давлении 750 Торт и температуре 20°С.

В видеореги­стратор встроен микрофон. С его помощью можно регистрировать и акустические сигналы от удара. Осциллограммы акустических сигналов первого удара шара о плиту без разряда и с разрядом, полученные с помощью этого микрофона, представлены на рис. 2, *b*.

Удар без разряда возбуждает в металле почти монохроматический акустический звон (аналогичный коло­кольному звону) на частоте 2854.2 Hz, который немонотонно затухает. Немонотонность затухания объясняется многочисленными переотражениями от криволинейных поверхностей.

В случае же с разрядом процесс идет следующим образом. Разряд возникает при подлете шара к плите несколько раньше механического удара. Поэтому пер-

вичная ударная волна в воздухе видна на осциллограмме еще до начала акустического звона. Ударную волну легко отличить от звона, так как ее длительность больше полупериода звона. Вторичные ударные волны, возникающие в результате переотражений, незаметны на фоне более высокочастотного и более громкого звона. Приведенные осциллограммы подтверждают генерацию ударных волн в искровых разрядах.

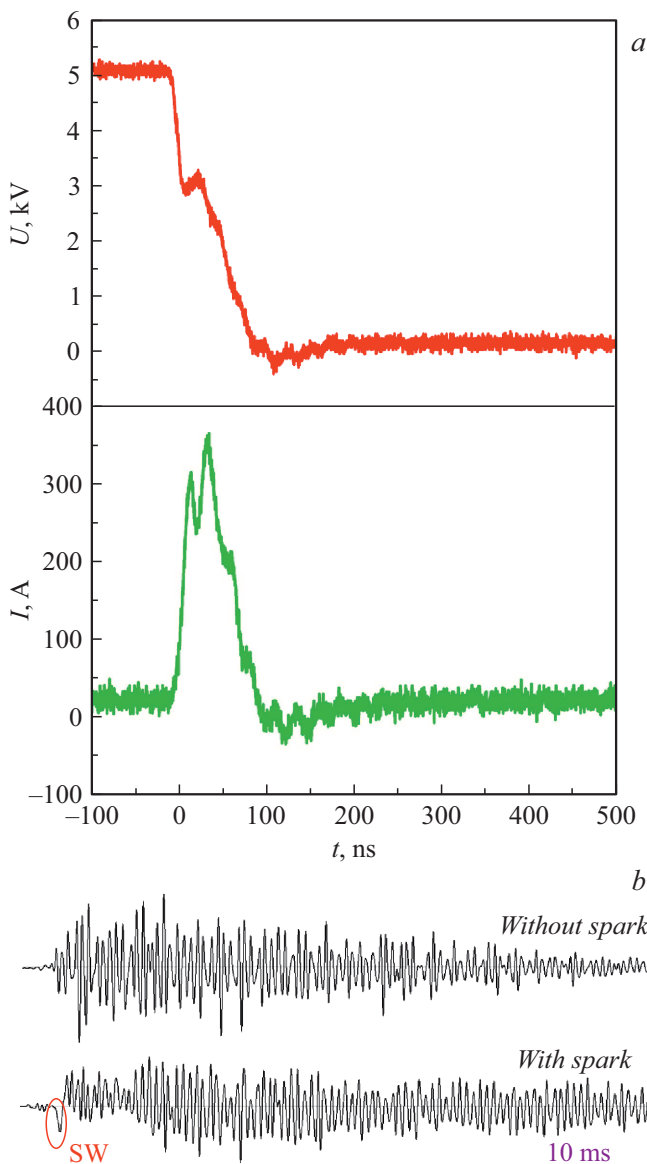
Эксперименты осуществлялись следующим образом. Сначала маятник отклонялся от вертикали на угол 20° и от нормали к плоскости плиты на заданный азимутальный угол  $\theta$ . В этом положении маятник закреплялся с помощью вспомогательной текстильной нити. Затем подавалось высокое напряжение между плитой и шаром.

После полного затухания установочных колебаний шара производился запуск стенда путем механического перерезания вспомогательной нити. При этом шар при-

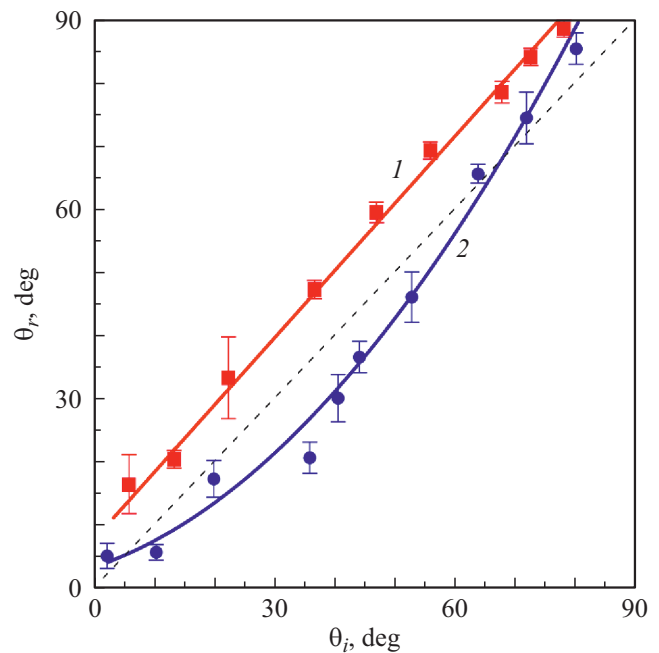
ходил в движение к плите без начальной скорости и без вращения, соударялся с плитой и отскакивал от нее под другим азимутальным углом  $\theta_r$ . В момент соударения происходил однократный искровой разряд.

Регистрация движения происходила от момента перерезания вспомогательной нити до момента первой остановки шара после соударения. Отдельные кадры процесса соударения с искровым разрядом представлены на вставках *a–c* к рис. 1. По видеоизображениям измерялись углы подлета  $\theta_i$  и отражения  $\theta_r$ .

Результаты измерений углов подлета  $\theta_i$  и отражения  $\theta_r$  представлены на рис. 3. В отсутствие разряда кривая зависимости  $\theta_r$  от  $\theta_i$  целиком лежит выше идеальной прямой  $\theta_r = \theta_i$  в соответствии с [4]. Однако оказалось,



**Рис. 2.** *a* — синхронизированные осциллограммы искрового разряда: напряжения (вверху) и тока (внизу); *b* — осциллограммы акустических сигналов удара без разряда (вверху) и с разрядом (внизу), SW — ударная волна в воздухе.



**Рис. 3.** Зависимость угла отражения  $\theta_r$  от угла подлета  $\theta_i$ . 1 — без разряда, 2 — с разрядом.

что в случае с искровым разрядом кривая зависимости  $\theta_r$  от  $\theta_i$  почти вся лежит, наоборот, ниже идеальной прямой. Кадры процесса соударения с искровым разрядом, представленные на вставках *a* и *c* к рис. 1, как раз и демонстрируют неравенство  $\theta_i > \theta_r$ .

Обнаруженное anomalous поведение зависимости  $\theta_r$  от  $\theta_i$  свидетельствует об индуцированном искровым разрядом „смягчении“ соударения. Анализ видеоизображений показал, что разряд приводит к увеличению кинематического коэффициента восстановления для нормальной составляющей скорости и уменьшению кинематического коэффициента восстановления для тангенциальной составляющей скорости. Фактически разряд, создавая ударную волну, демпфирующую удар, уменьшает неупругие потери энергии в нормальном направлении, но электростатическое притяжение шара к плите приводит к их кратковременному сцеплению в момент удара, что увеличивает силу трения шара о плиту. Энергетический коэффициент восстановления для полной кинетической энергии шара, который можно вычислить по формуле

$$k_E = \frac{H_r}{H_i} = \frac{L - \sqrt{L^2 - R_r^2}}{L - \sqrt{L^2 - R_i^2}}$$

(где  $H_r/H_i$  — отношение высот максимального подъема шара после первого удара и в момент старта, выраженных через радиальные координаты этих положений  $R_{i,r}$ ), имеет, например, при  $\theta_i = 50^\circ$  значения 0.42 (без разряда) до 0.52 (с разрядом).

Таким образом, при экспериментальном изучении влияния наносекундного искрового разряда на косое соуда-

рение стального шара с плоской чугунной плитой было обнаружено, что угол отражения шара при столкновении с разрядом становится меньше угла подлета, в то время как при обычном соударении без разряда, наоборот, угол отражения больше угла подлета.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] G. Coriolis, *Théorie mathématique des effets du jeu de billard* (Carilian—Goeury, Paris, 1835).
- [2] W.J. Stronge, *Impact mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge, 2008).
- [3] C. Lakshmana Rao, V. Narayanamurthy, K.R.Y. Simha, *Applied impact mechanics* (Wiley, 2016).
- [4] С.М. Тарг, *Краткий курс теоретической механики* (Выш. шк., М., 2010).
- [5] R.C.J. Howland, T.W.C. Dickson, London, Edinburgh, and Dublin Phil. Mag. J. Sci., **2** (11), 1091 (1926). DOI: 10.1080/14786442608564139
- [6] N. Maw, J.R. Barber, J.N.Fawcett, Wear, **38** (1), 101 (1976). DOI: 10.1016/0043-1648(76)90201-5
- [7] G. Sundararajan, P.G. Shewmon, Int. J. Impact Eng., **6** (1), 3 (1987). DOI: 10.1016/0734-743X(87)90003-0
- [8] A.D. Lewis, R.J. Rogers, J. Sound Vibr., **125** (3), 403 (1988). DOI: 10.1016/0022-460X(88)90250-7
- [9] D.A. Gorham, A.H. Kharaz, Powder Technol., **112** (3), 193 (2000). DOI: 10.1016/S0032-5910(00)00293-X
- [10] M.Y. Louge, M.E. Adams, Phys. Rev. E, **65** (2), 021303 (2002). DOI: 10.1103/PhysRevE.65.021303
- [11] H. Dong, M.H. Moys, Powder Technol., **161** (1), 22 (2006). DOI: 10.1016/j.powtec.2005.05.046
- [12] A. Rezaei, R. Verhelst, W. Van Paeregem, J. Degrieck, J. Sports Sci., **29** (11), 1201 (2011). DOI: 10.1080/02640414.2011.587443
- [13] R. Cross, Exp. Mech., **54** (9), 1523 (2014). DOI: 10.1007/s11340-014-9938-3
- [14] R. Cross, Am. J. Phys., **83** (3), 238 (2015). DOI: 10.1119/1.4898312
- [15] A.E. Dubinov, S.A. Sadovoy, V.D. Selemir, Shock Waves, **10** (1), 73 (2000). DOI: 10.1007/s001930050180
- [16] Q. Liu, Y. Zhang, J. Appl. Phys., **116** (15), 153302 (2014). DOI: 10.1063/1.4898141
- [17] E.V. Parkevich, M.A. Medvedev, G.V. Ivanenkov, A.I. Khirianova, A.S. Selyukov, A.V. Agafonov, Ph.A. Korneev, S.Y. Gus'kov, A.R. Mingaleev, Plasma Sources Sci. Technol., **28** (9), 095003 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3768
- [18] J. Huang, L. Yang, H. Zhang, L. Chen, X. Wu, Chin. Phys. B, **28** (5), 055202 (2019). DOI: 10.1088/1674-1056/28/5/055202
- [19] A.E. Dubinov, J.P. Kozhayeva, V.V. Golovanov, V.D. Selemir, IEEE Trans. Plasma Sci., **47** (1), 76 (2018). DOI: 10.1109/TPS.2018.2868443
- [20] A.E. Дубинов, Ю.П. Кожаева, Письма в ЖТФ, **45** (8), 16 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.08.47614.17704 [A.E. Dubinov, J.P. Kozhayeva, Tech. Phys. Lett., **45** (4), 383 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019040242].
- [21] Č. Kodejška, Matematika—Fizika—Informatika, **28** (3), 201 (2019). [http://mfi.upol.cz/files/28/2803/mfi\\_2803\\_201\\_206.pdf](http://mfi.upol.cz/files/28/2803/mfi_2803_201_206.pdf)
- [22] R. Nath, M.M. Patidar, N.K. Ghodke, S.C. Das, V. Ganesan, Asian J. Conv. Technol., **6** (2), 28 (2020). DOI: 10.33130/AJCT.2020v06i02.005