

03.5;09.1

Спектр излучения баллистического геля после пролета пули

© Д.А. Бирюков¹, Д.Н. Герасимов², Е.И. Юрин²¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия² Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия

E-mail: deniger@mail.ru

Поступило в Редакцию 28 марта 2022 г.

В окончательной редакции 6 мая 2022 г.

Принято к публикации 6 мая 2022 г.

Представлены результаты исследования свечения, возникающего при пролете пули сквозь баллистический гель. Примечателен тот факт, что свечение возникает в различных областях геля, в том числе непосредственно с пулей не контактировавших. Спектр излучения геля состоит из сплошной составляющей с наложенными на нее атомарными линиями. Сплошная составляющая спектра может быть интерпретирована по-разному: одной из гипотез является тепловое излучение, однако описание наблюдаемого явления как люминесценции также возможно.

Ключевые слова: баллистический гель, пуля, излучение.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.13.52737.19204

Свечение жидкостей при механическом воздействии на них является достаточно старой и пока еще нерешенной проблемой. Наиболее известна сонолюминесценция [1,2]: свечение жидкости при ультразвуковом воздействии на нее. Это явление, открытое в 1934 г., наблюдалось во многих легко реализуемых экспериментах, однако строгое теоретическое обоснование этого процесса отсутствует до сих пор. На сонолюминесценцию, по крайней мере по внешним признакам, похожа гидролюминесценция [3] — свечение жидкости, протекающей под большим давлением в узком канале. Вообще подобное излучение может возникать в различных условиях (например, в [4] исследовалось свечение при схлопывании пузырька, созданного при помощи лазерной искры).

Одним из наиболее экзотических случаев возникновения свечения в конденсированной среде является вспышка в баллистическом геле после пролета пули сквозь него. Это явление наблюдается довольно часто, однако, насколько нам известно, с научной точки зрения оно не изучалось. Исследование кавитации, обусловленной взаимодействием пули и мишени, представляет собой достаточно развитую научную область (см., например, [5–7]), однако нас интересует только один из специфических аспектов подобной кавитации, а именно генерация излучения.

В наших опытах в качестве мишени использовался баллистический гель производства „ТехноХимПродукт“ (Санкт-Петербург). Плотность материала баллистического геля — разновидности термоэластопласта — составляет 852 kg/m^3 ; конкретный его химический состав является коммерческой тайной. Образцы геля имели размер $150 \times 150 \times 400 \text{ mm}$; выстрел производился стандартным способом — вдоль наиболее длинной стороны образца.

Выстрел производился патроном БПЗ FMJ 8.0 g 7.62×39 из нарезного карабина, скорость пули при вылете из ствола составляла $749 \pm 7 \text{ m/s}$. Пуля покрыта медной оболочкой. При выстреле дульный срез карабина находился на расстоянии 3 m от геля.

Спектроскопические измерения проводились с помощью спектрометра AvaSpec-2048 — чувствительного дифракционного спектрометра с разрешением 2.4 nm; спектральный рабочий диапазон от 200 до 1100 nm, однако на его краях присутствуют заметные шумы. Визуализация процесса осуществлялась при помощи высокоскоростной камеры Phantom VEO-E 310L (использовалась частота кадров 1000 fps). Далее описаны результаты эксперимента, в котором видеосъемка проводилась одновременно со съемкой спектра (спектр накапливался в течение всего опыта).

Пролет пули внутри образца геля сопровождается сильной его деформацией. Во-первых, внутри геля вдоль траектории полета пули образуется каверна сложной формы; во-вторых, деформации подвергаются даже те части геля, которые непосредственно не входили в контакт с пулей. Последнее обстоятельство неудивительно: пролет пули приводит к волнам расширения-сжатия внутри геля, которые в том числе отражаются от его поверхностей.

Деформации образца геля приводят к ярким вспышкам внутри него, которые наблюдаются сравнительно продолжительное время. Отметим, что когда пуля находится внутри геля, излучения еще нет, оно появляется позже при деформациях образца. На рис. 1, *a* показано свечение геля через 16 ms после выстрела, когда пуля уже покинула исследуемый образец. Следует отметить, что излучение возникает в том числе и в тех областях геля, которые непосредственно с пулей не контактировали (рис. 1, *b*, через 59 ms после выстрела).

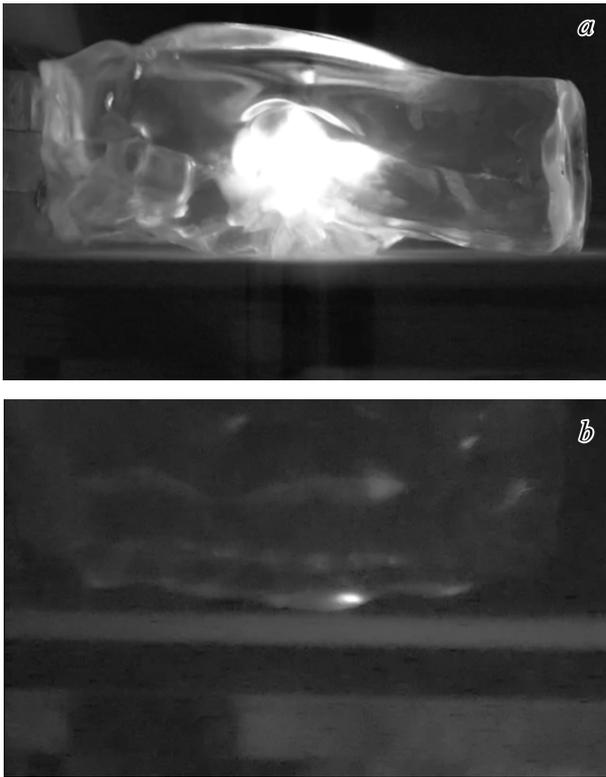


Рис. 1. Свечение геля после пролета пули: 16 (а) и 59 ms (b) после выстрела. На части b изменены яркость и контрастность изображения.

Для интерпретации спектра излучения важно знать спектральный показатель поглощения геля μ , с помощью которого ослабление излучения описывается множителем $\exp(-\mu x)$, где x — расстояние, которое излучение прошло внутри геля. Поскольку излучение доходит до спектрометра в том числе и после внутренних отражений, x может превышать толщину образца. Показатель поглощения μ был измерен нами при просвечивании геля источником излучения с непрерывным спектром. Результаты показаны на рис. 2.

Спектр излучения геля показан на рис. 3, а, b. Как видно, наиболее выраженный „провал“ в спектре совпадает со спектральным диапазоном наиболее интенсивного поглощения геля на длинах волн 900–950 нм. Спектр в основном состоит из сплошной составляющей, на которую наложены редкие атомарные линии. По-видимому, излучение обусловлено динамикой возникающих и схлопывающихся в геле кавитационных полостей (как и при соно- и гидролюминесценции), однако конкретная интерпретация сплошного спектра может быть различной.

Прежде всего необходимо проверить соответствие наблюдаемого спектра функции излучения черного тела с учетом того обстоятельства, что во время вспышки температура при схлопывании кавитационной полости увеличивается (предположительно) от исходного комнатного значения T_{\min} до некоторого максимального зна-

чения T_{\max} , а затем спадает обратно до T_{\min} (а не просто равна T_{\max}). Считая, что темп нагрева и охлаждения равномерный, можно заменить интеграл по времени интегралом по температуре и рассматривать спектральную функцию излучения в виде

$$I(\lambda) = \frac{2A \exp(-\mu x)}{T_{\max} - T_{\min}} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{dT}{\exp(c_2/\lambda T) - 1}, \quad (1)$$

где под интегралом стоит функция Планка;

$$c_1 = 2\pi hc^2 = 3.74 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2,$$

$$c_2 = hc/k = 1.44 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

— планковские коэффициенты. Отметим, что при комнатной температуре вклад в излучение, конечно, пренебрежимо мал, однако в целом формула (1) дает спектр, заметно отличающийся от планковской кривой с $T = T_{\max}$.

Результаты сравнения экспериментального спектра с кривой (1) показаны на рис. 3, а для $T_{\min} = 300 \text{ K}$, $T_{\max} = 4500 \text{ K}$, $x = 30 \text{ cm}$; параметр A , как и прочие, подбирался из условия наилучшего совпадения с экспериментом, интеграл в (1) брался численно. Как и ожидалось, чтобы описать наиболее значительный „провал“ на спектре в инфракрасной области, необходимо задать размер, превышающий габариты образца геля, так как излучение регистрировалось после внутренних отражений. Представленные значения температуры являются оценочными; ввиду сильной зашумленности экспериментального спектра вычислять количественные характеристики соответствия спектров типа коэффициента корреляции не представлялось целесообразным. Безусловно, погрешность T_{\max} составляет несколько сотен кельвинов.

Вместе с тем „тепловая гипотеза“, согласно которой высвечивание кавитационной полости обусловлено ее

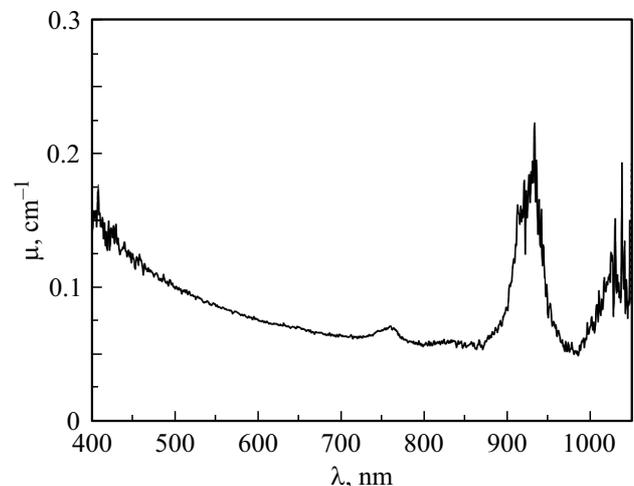


Рис. 2. Спектральный показатель поглощения исследуемого геля.

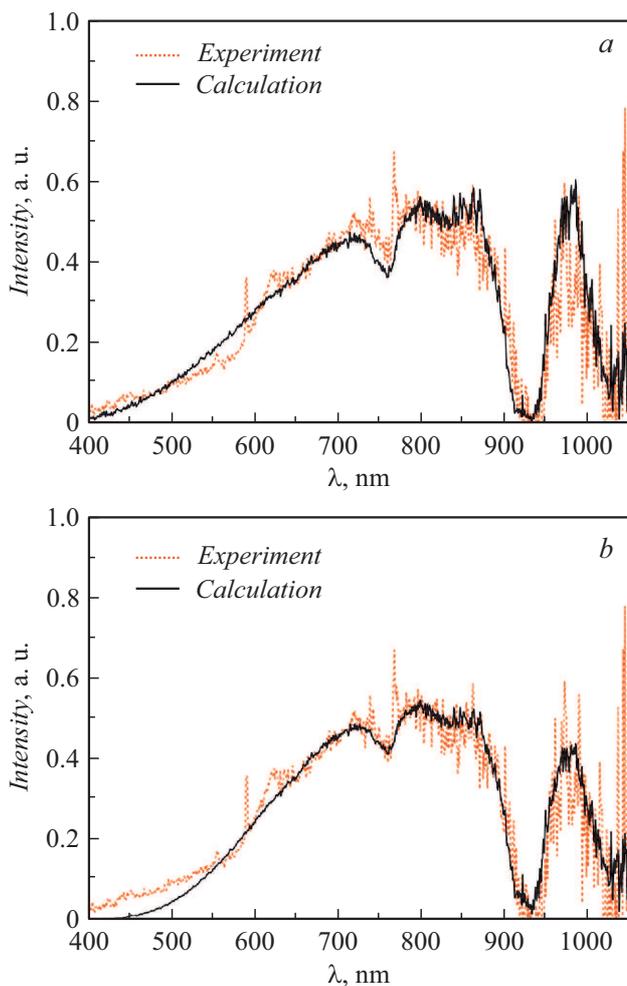


Рис. 3. Спектр излучения баллистического геля в сравнении с кривой излучения черного тела (1) (a) и кривой высвечивания люминесцентного центра (2) (b).

высоким разогревом на стадии схлопывания, не является единственной. В работе [8] наблюдаемый при соно- и гидролюминесценции сплошной спектр в глицерине был скорее похож на высвечивание возбужденного люминесцентного центра: единичный пик, соответствующий некоторой энергии перехода и значительно уширенный вследствие неопределенности этой энергии в конденсированной среде. В первом приближении форму пика можно считать гауссовой по энергии [8], что приводит к выражению для распределения спектральной интенсивности излучения по длинам волн:

$$I(\lambda) = A \frac{1}{\lambda^3} \exp \left[- \left(\frac{\delta}{\lambda} - \frac{\delta}{\lambda_0} \right)^2 \right] \exp(-\mu x). \quad (2)$$

Данное выражение описывает высвечивание люминесцентного центра со средней длиной волны λ_0 ; размытие линии характеризуется параметром δ , амплитуда A по-прежнему берется для наилучшего совпадения с измеренной интенсивностью излучения. Сопоставление

экспериментального спектра с формулой (2) показано на рис. 3, b для $\lambda_0 = 1070$ nm, $\delta = 1700$ nm, $x = 20$ cm.

Обсуждая „люминесцентную“ гипотезу, необходимо исследовать вопрос о возможности собственной люминесценции геля. Так, в работе [9] гидродинамическая люминесценция индустриального масла И-40А оказалась во многом обусловлена обычной люминесценцией этого масла: при фотовозбуждении был обнаружен аналогичный спектр излучения. Добиться фотолюминесценции исследуемого геля нам не удалось, что означает, что в данном случае можно обсуждать лишь гипотезу, высказанную в [8], об образовании неких специфических люминесцентных центров на колеблющейся межфазной поверхности.

Как следует из рис. 3, a, b, обе теории могут одинаково неплохо объяснить наблюдаемый сплошной спектр свечения геля. В итоге, как нам представляется, вопрос о физической природе излучения баллистического геля является на данный момент открытым. Возможно, корректной окажется и какая-то иная гипотеза.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Борисёнок, *Акуст. журн.*, **61** (3), 333 (2015). [V.A. Borisenok, *Acoust. Phys.*, **61** (3), 308 (2015). DOI: 10.1134/S1063771015030057].
- [2] D. Biryukov, D. Gerasimov, E. Yurin, *Cavitation and associated phenomena* (CRC Press, Oxon, 2022). DOI: 10.1201/9780367853495
- [3] D.A. Biryukov, D.N. Gerasimov, in *Triboluminescence*, ed by D.O. Olawale, O.O.I. Okoli, R.S. Fontenot, W.A. Hollerman (Springer, Cham, 2016), p. 95. DOI: 10.1007/978-3-319-38842-7_5
- [4] I. Akhatov, O. Lindau, A. Topolnikov, R. Mettin, N. Vakhitova, W. Lauterborn, *Phys. Fluids*, **13** (10), 2805 (2001). DOI: 0.1063/1.1401810
- [5] L. Susu, X. Cheng, W. Yaoke, W. Shu, Z. Jingling, Z. Xinkai, *Int. J. Impact Eng.*, **122**, 296 (2018). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.006
- [6] V.R. Feldgun, D.Z. Yankelevsky, Y.S. Karinski, *Int. J. Impact Eng.*, **151**, 103837 (2021). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103837
- [7] Z. Guo, W. Zhang, X. Xiao, G. Wei, P. Ren, *Int. J. Impact Eng.*, **49**, 43 (2012). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.04.004
- [8] И.А. Беляев, Д.А. Бирюков, Д.Н. Герасимов, *Оптика и спектроскопия*, **125** (1), 39 (2018). DOI: 10.21883/OS.2018.07.46264.304-17 [I.A. Belyaev, D.A. Biryukov, D.N. Gerasimov, *Opt. Spectrosc.*, **125** (1), 42 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18070056].
- [9] Д.А. Бирюков, М.И. Власова, Д.Н. Герасимов, О.А. Синкевич, *Оптика и спектроскопия*, **114** (5), 768 (2013). [D.A. Biryukov, M.I. Vlasova, D.N. Gerasimov, O.A. Sinkevich, *Opt. Spectrosc.*, **114** (5), 704 (2013). DOI: 10.1134/S0030400X13050032].