

УДК 533.95

СТИМУЛИРОВАННАЯ ДЕТОНАЦИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПЛАЗМОИДОВ, СОЗДАННЫХ ПЛАЗМЕННЫМ ЭРОЗИОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ И МАГНИТОПЛАЗМЕННЫМ КОМПРЕССОРОМ

© 2024 г. А. И. Климов^{1*}, В. Г. Бровкин¹, А. С. Пашина¹¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Москва, Россия

*E-mail: klimov.anatoly@gmail.com

Поступила в редакцию 12.04.2024;
после доработки 13.05.2024;
принята в печать 20.05.2024

Изучение физических свойств долгоживущих плазменных образований может приблизить нас к пониманию природы электрофизических явлений в грозовых облаках, нижней ионосфере, торнадо, вулканической активности и появлением связанных с ними природных плазмоидов (таких как шаровые молнии, спрайты, джеты и др.). В работе представлены результаты изучения стимулированной детонации долгоживущих энергоемких плазмоидов, получаемых в лабораторных условиях с помощью плазмогенератора комбинированного типа, состоящего из эрозионного плазмотрона и магнитоплазменного компрессора. Обнаружено, что необходимым условием детонации является превышение некоторых пороговых величин давления и температуры. Установлено существование режима направленного взрыва, который реализуется только при оптимальных временах задержки (порядка $t_d \sim 2000$ мкс) между моментами запусков импульсного эрозионного плазмотрона и магнитоплазменного компрессора. Измерены параметры ударных волн, а также оптические и рентгеновские спектры долгоживущих энергоемких плазмоидов в режиме стимулированной детонации.

Ключевые слова: плазма, магнитоплазменный компрессор, эрозионный разряд, детонация, ударная волна.

DOI: 10.31857/S0207401X24100074

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитоплазменный компрессор (МПК) находит широкое применение в исследованиях по физике плазмы и плазменной аэродинамике [1, 2]. В этом устройстве геометрия электродов и параметры электрического разряда позволяют получать локальную зону кумуляции плазменной энергии, названную “плазменным фокусом” [3], с экстремально высокими плазменными параметрами. В настоящее время такие устройства используются для получения нейтронных пучков малых энергий в исследованиях по физике плазмы, дефектоскопии, на таможне и в других областях [4–7].

Ранее в работе [2] сообщалось о впервые разработанном и испытанном новом комбинированном генераторе плазмы, состоящем из магнитоплазменного компрессора (МПК) [1–3] и эрозионного плазмотрона (ЭП) на основе импульсного

разряда в капилляре с испаряющейся стенкой [8–11]. При этом вместо традиционного металлического анода в МПК было предложено использовать эрозионную плазменную струю, созданную ЭП [2, 8]. Такая комбинация (МПК–ЭП) позволила расширить рабочий диапазон давлений устойчивой работы МПК вплоть до атмосферного давления и выше. На первой стадии ЭП создает долгоживущий энергоемкий плазмоид (ДЭП), включающий в себя гетерофазу, состоящую из металлических и углеродных наноразмерных кластеров, а также атомов и ионов водорода. На второй стадии происходит зажигание разряда МПК, обеспечивающего магнитное обжатие ДЭП и инициацию детонационных процессов в нем. В работе [2] было обнаружено, что при определенных параметрах плазмы и электрического разряда внутри ДЭП может реализоваться стимулированная детонация. Отметим, что эта работа вызвала широ-

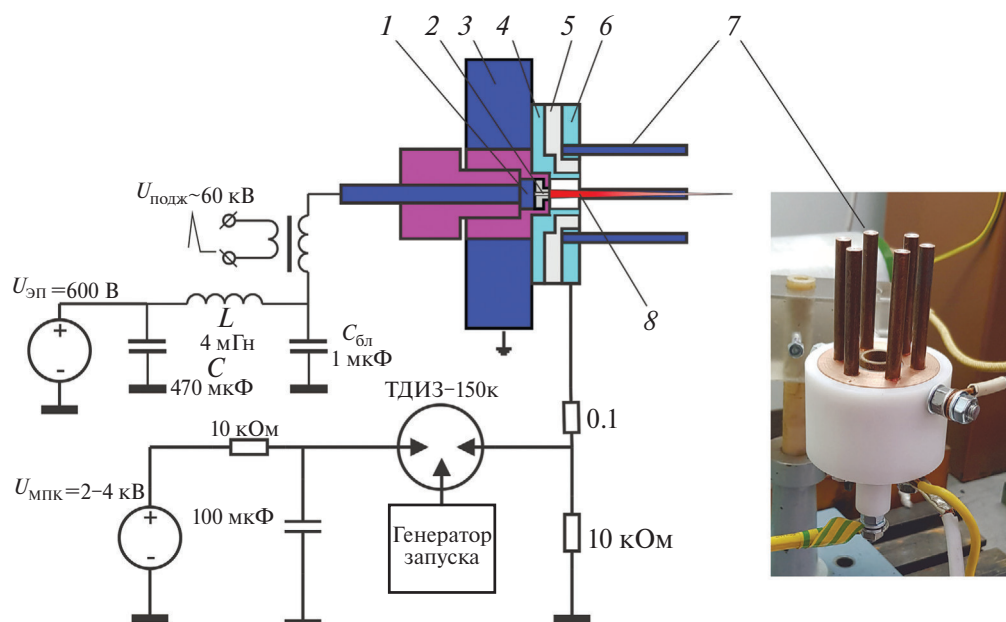


Рис. 1. Электрическая схема и общий вид комбинированного разрядника МПК-ЭП: 1 – внутренний электрод (анод) ЭП; 2 – капиллярный разрядный канал ЭП; 3 – корпус разрядника; 4 – катод ЭП / анод МПК; 5 – изолятор; 6 – катодный фланец МПК, 7 – катодные стержни МПК; 8 – гетерогенная плазменная струя (ДЭП).

кий резонанс среди специалистов физиков. По данным исследовательского портала Research Gate ее прочитали более 200 ученых за один только прошедший год.

Настоящая работа является продолжением исследований, начатых ранее [2, 8–13] и посвящена дальнейшему изучению процесса стимулированной детонации ДЭП в зависимости от временной задержки t_d между моментами запусков ЭП и МПК, а также поиску оптимального режима такой детонации.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Электрическая схема и общий вид комбинированного разрядника МПК-ЭП представлены на рис. 1. В этой установке на первой стадии с помощью ЭП (1–4) формируется эрозионная плазменная струя (8). При этом она выполняет роль плазменного анода МПК, срабатывание которого происходит на второй стадии разряда с некоторой задержкой t_d относительно момента запуска ЭП. Катодами МПК служат шесть медных стержней (7), расположенных на окружности радиуса 16 мм и смонтированных на катодном фланце (6). Эрозионная плазменная струя, формируемая ЭП, по существу, представляет собой ДЭП с заданным химическим составом. Типичные значения концентрации и температуры электронов в ДЭП, соответ-

ственно, составляют $n_e \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $T_e \approx 2\text{--}3 \text{ эВ}$ [8, 10]. Плазмохимический состав ДЭП зависит от эродирующего рабочего материала, используемого в разрядном промежутке ЭП (2), и материала эродирующих электродов (1, 4). В качестве испытуемых рабочих материалов использовали полиметилметакрилат (ПММА), из которого изготовлен капилляр ЭП (2 на рис. 1), а также гидрид титана (TiH_x) и гидрид никеля (NiH_x), которые в виде порошка или предварительно спрессованных шайб могли размещаться непосредственно за выходным отверстием капилляра ЭП. В качестве материала внутреннего электрода ЭП (анода, 1 на рис. 1) использовали никель. Наружный электрод (катод) ЭП (он же является анодом МПК, 4 на рис. 1), а также катоды МПК (7) были изготовлены из меди.

Вторая стадия комбинированного разряда включает в себя сжатие и разогрев плазмы ДЭП с помощью разряда МПК, инициируемого с определенной временной задержкой ($t_d \sim 0.1\text{--}3 \text{ мс}$) относительно момента зажигания разряда ЭП. В этом эксперименте реализуется направленная стимулированная детонация ДЭП. Отметим, что направленный взрыв ДЭП при оптимальном значении t_d был реализован и изучен в наших экспериментах впервые. В данной работе изучаются параметры ударных волн, создаваемых направленным взрывом ДЭП.

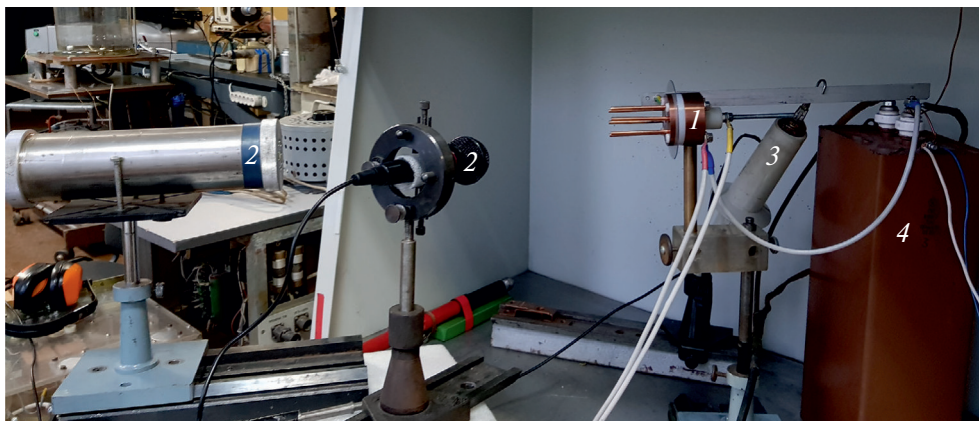


Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда: 1 – комбинированный разрядник МПК-ЭП; 2 – датчики давления; 3 – высоковольтный пробник P6015; 4 – емкостной накопитель.

3. УДАРНАЯ ВОЛНА СОЗДАННАЯ С ПОМОЩЬЮ МПК-ЭП. РЕЖИМ ОПТИМАЛЬНЫХ ВРЕМЕН ЗАДЕРЖКИ

$T_d \sim 2000$ мкс

Общий вид лабораторного стенда представлен на рис. 2. Для изучения параметров ударных волн использовались датчики давления (2), размещаемые на заданных расстояниях от комбинированного разрядника МПК-ЭП (1). В ходе экспериментов измерены распределение давления $P_2(X)$ за фронтом ударной волны (УВ), создаваемой МПК-ЭП, и средняя скорость УВ $V_{УВ}(X)$.

Для изучения структуры, а также пространственной и временной эволюции комбинированного разряда МПК-ЭП использовали высокоскоростную видеокамеру Photron FASTCAM Nova S9 (Photron, USA), (рис. 3). В ходе экспериментов было обнаружено, что в определенном диапазоне времен задержки включения МПК возникает направленное движение ДЭП вдоль оси разрядника, которое можно охарактеризовать как движение “плазменного поршня”, форма которого близка к цилиндрической (см. рис. 3). Измерения, проведенные с помощью датчиков давления, выявили сильную анизотропию распределения давления на фронте УВ вблизи границы “плазменного поршня”, что принципиально отличается от картины распределения давления, измеренной в работе [2] для случая сферической стимулированной детонации ДЭП. Этот результат был также подтвержден с помощью оптического теневого метода. При оптимальном времени задержки включения МПК $t_d \sim 2000$ мкс средняя скорость переднего фронта плазменной струи (“плазменного поршня”) достигает $V_{p2} \sim 1000$ – 1200 м/с (здесь и

далее индекс “ p ” означает, что переменная относится к плазменному поршню). Эта величина значительно превышает скорость переднего фронта плазменной струи $V_{p1} \sim 450$ – 600 м/с, зарегистрированной в работе [2] при малых временах задержки $t_d \sim 50$ мкс.

Установлено, что при использовании в качестве рабочего тела ЭП одних лишь продуктов эрозии ПММА число Маха, определенная на расстоянии $X_1 = 30$ см от выходной плоскости МПК-ЭП, (где расположены торцы катодных стержней (7 на рис. 1), не превышает величины, равной $M_{УВ} \sim 1.46$. Таким образом, на расстояниях $X > 30$ см формировалась и распространялась довольно слабая УВ. Этот результат был получен как путем измерения амплитуды УВ с помощью калиброванного пьезодатчика давления, так и путем измерения скорости ее распространения (по времени прихода УВ к измерительному датчику давления). Разница в определении чисел Маха перечисленными методами не превышает 3%.

Как указывалось выше, средняя скорость “плазменного поршня” достигает значений $V_{p2} \sim 1000$ – 1200 м/с. Ее величина была оценена в результате обработки отдельных кадров высокоскоростной видеосъемки (рис. 3). Из проведенного анализа была получена также величина максимального объема “плазменного поршня”, которая составила $W_p \sim 130$ см³.

Чтобы оценить величину давления P_2 за фронтом УВ с числом Маха $M_{УВ} \sim 1.46$ на расстоянии $X_1 = 30$ см, воспользуемся известным соотношением на фронте УВ:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} M^2 + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right). \quad (1)$$

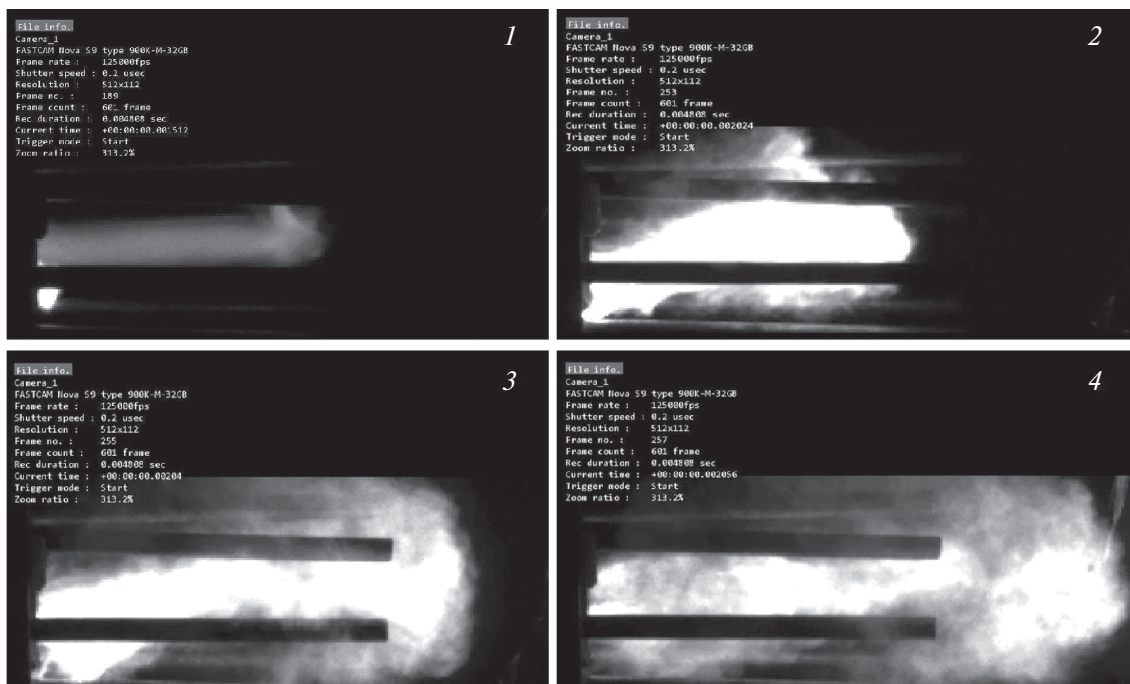


Рис. 3. Кадры высокоскоростной видеосъемки эволюции “плазменного поршня”, созданного МПК-ЭП: время задержки между включением ЭП и МПК - $t_d \sim 2000$ мкс, частота кадров – 125 000 кадр/с, время экспозиции кадра – 0.2 мкс. Кадры 1 соответствует состоянию плазменной струи ЭП до момента включения МПК; кадры 2–4 эволюция плазменной струи после включения МПК. Моменты времени t относительно начала разряда ЭП: 1 – 1512 мкс, 2 – 2024 мкс, 3 – 2040 мкс, 4 – 2056 мкс.

Здесь индексы “1” и “2” соответствуют параметрам перед и за ударной волной. Из выражения (1) получаем, что $P_2 = 2.5P_1$ (при $\gamma = 1.4$), а перепад давления на фронте УВ составляет $\Delta P_2 = P_2 - P_1 = 1.5P_1 = 1.5$ бар.

В рамках приближения слабой ударной волны можно оценить перепад давления на фронте УВ вблизи границы “плазменного поршня” для $X_2 \sim 10$ см (см. рис. 3):

$$\Delta P_2 \approx \left(\frac{30}{10}\right)^2 \cdot 1.5 = 13.5 \text{ бар.} \quad (2)$$

Тогда детонационная энергия, запасенная в “плазменном поршне”, может быть определена как произведение перепада давлений (2) в УВ на объем плазменного поршня $W_p \sim 130 \text{ см}^3$:

$$E_d = \Delta P_2 \cdot W_p = 175 \text{ Дж.} \quad (3)$$

Ближние значения величин перепада давления ΔP_2^* и энергии детонации E_d^* получаются на основе данных измерений скорости “плазменного поршня” $V_p \sim 1100$ м/с (см. выше) при использовании известной формулы для УВ:

$$V_p = M_{UB} C_s (1 - \rho_1 / \rho_2), \quad (4)$$

где C_s – скорость звука, ρ_1, ρ_2 – соответственно плотность газа перед и за фронтом УВ.

Из формулы (4) можно получить искомое число Маха $M_{UB} \sim 3.8$, а отношение давлений достигает величины $(P_2/P_1)^* \sim 17$ на фронте УВ при ее положении, близком к границе “плазменного поршня”. Тогда перепад давления $\Delta P_2^* = P_2^* - P_1^*$ составляет величину порядка $\Delta P_2^* \sim 16$ бар, что достаточно близко к величине $\Delta P_2 = 13.5$ бар, полученной по формуле (2).

Также было обнаружено, что интенсивность УВ в значительной мере зависит от состава рабочей смеси. В случае, когда состав рабочей смеси определяется исключительно продуктами абляции стенки капилляра (ПММА), перепад давления на фронте УВ оказывается минимальным. Добавление к этой смеси примесей TiH_x или NiH_x приводит к росту давления за фронтом УВ примерно в $P_2^*/P_2^* \sim 1.3$ раза (рис. 4). Предположим, что дополнительная величина давления связана с дополнительным выделением тепловой энергии δE_{ch} (индекс “ch” означает химический источник энерговыделения), первоначально запасенной во внутренних степенях свободы молекул активированных рабочих химических веществ, за счёт проте-

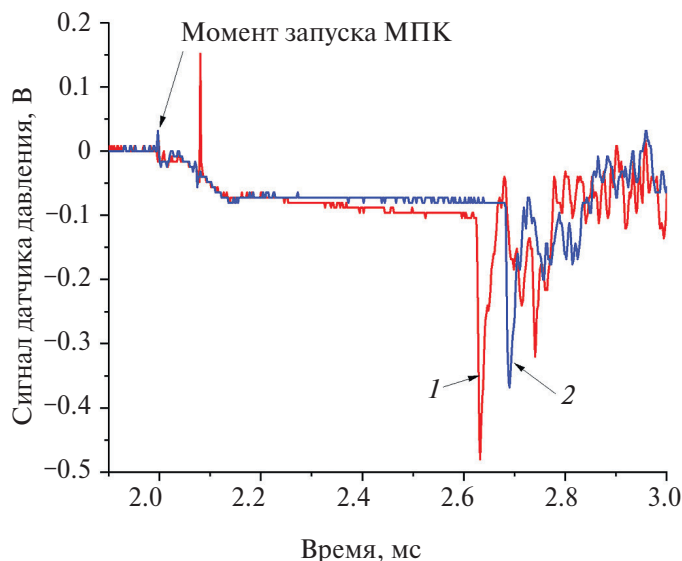


Рис. 4. Временная эволюция давления $P_2(t)$ за фронтом УВ, зарегистрированная датчиком давления: 1 – рабочая смесь ПММА + TiH_x , 2 – рабочая смесь ПММА. Время задержки между включением ЭП и МПК – $t_d \sim 2000$ мкс.

кания в них специфических плазмохимических реакций [9–13]. Тогда эту величину можно оценить с помощью следующего соотношения:

$$\delta E_{ch} = 0.3 \cdot E_d \approx 0.3 \cdot 175 \text{ Дж} = 52 \text{ Дж}.$$

Согласно результатам измерений, масса примеси TiH_x , поступающая в объем плазменной струи в течение разрядного импульса, составляет $\delta M_{er} = 1.2$ мг/импульс. Поэтому величина удельной дополнительной энергии может быть оценена с помощью следующей формулы

$$q_x = \frac{\delta E_{ch}}{\delta M_{er}} = \frac{52 \text{ Дж}}{1.2 \text{ мг}} = 43 \text{ кДж/г}.$$

Отметим, что величина q_x превышает величину удельной энергоемкости тротилового эквивалента (эквивалента тринитролуола (ТНТ)) в 10 раз:

$$K = \frac{q_x}{q_{\text{ТНТ}}} = \frac{43 \text{ кДж/г}}{4.2 \text{ кДж/г}} \approx 10.$$

Таким образом, оценки показывают, что энергосодержание ДЭП может достигать больших величин.

4. ОПТИЧЕСКИЕ И РЕНТГЕНОВСКИЕ СПЕКТРЫ ДЭП

Оптические спектры ДЭП были зарегистрированы волоконно-оптическим спектрометром AvaSpec-ULS 2048 (Avantes BV, Netherlands). В представленных на рис. 5 спектрах излучения наблюдаются линии возбужденных атомов H, K, Ni, Na, Li, а также достаточно интенсивное не-

прерывное излучение. Наличие последнего обусловлено образованием внутри ДЭП металлических и углеродных нанокластеров [2, 14]. Оценка температуры металлических нанокластеров по непрерывному излучению в приближении Вина приводит к значениям $T \sim 3000\text{--}4000$ К.

Обнаружено, что дополнительное инжектирование частиц TiH_x в разрядную область МПК-ЭП приводит к появлению в оптических спектрах интенсивных линий Li I: 610.35 нм и 670.78 нм (кривая 1 на рис. 5). Обращает на себя внимание отсутствие названных линий в исходном спектре

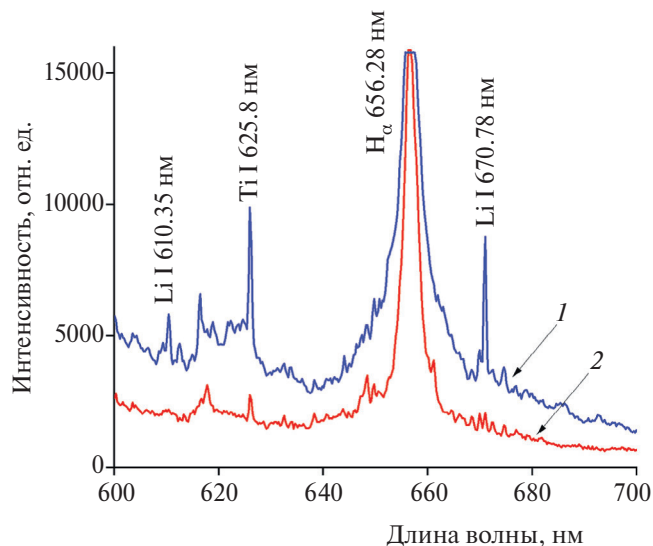


Рис. 5. Оптические спектры излучения ДЭП: 1 – спектр излучения при инжекции примеси TiH_x , 2 – исходный спектр излучения при отсутствии инжекции примеси.

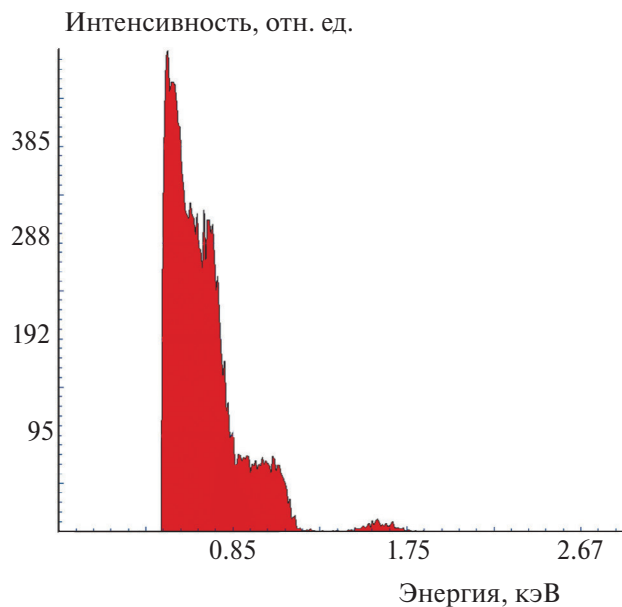


Рис. 6. Типичный спектр излучения ДЭП в рентгеновском диапазоне.

излучения ДЭП, зарегистрированном без инъекции такой примеси (кривая 2 на рис. 5). Этот результат не совсем понятен и требует детального изучения в будущих экспериментах.

Спектротромом Х-123 было зафиксировано интенсивное мягкое рентгеновское излучение с энергией квантов порядка $E_x \sim 1$ кэВ (рис. 6). В этом же эксперименте, с помощью радиометра-спектротромом МКС-А03-1 (НПЦ “АСПЕКТ”, Дубна), зарегистрированы сигналы, которые могут трактоваться как поток холодных нейтронов из пространственной области, занимаемой ДЭП (см. также [2, 14]). Этот результат также требует дальнейшего анализа и экспериментальной проверки.

5. ВЫВОДЫ

1. Впервые был спроектирован, изготовлен и испытан комбинированный разрядник на основе магнитоплазменного компрессора и импульсного эрозионного плазмотрона — МПК-ЭП. Этот МПК-ЭП был использован для изучения физических свойств высокоэнергетического долгоживущего гетерогенного плазменного образования в широких диапазонах давлений и температур.

2. Определены давление $P_2(t)$ за фронтом ударной волны, создаваемой МПК-ЭП, и средняя скорость ударной волны $V_{ув}(t)$, возникающей в результате стимулированной детонации ДЭП.

Обнаружено, что при оптимальной временной задержке $t_d \sim 2000\text{--}4000$ мкс между моментами зажигания разрядов ЭП и МПК возможна реализация режима направленного взрыва ДЭП. Измерения выявили сильную анизотропию распределения давления за фронтом УВ. Оптическим теневым методом было подтверждено, что в этом режиме формируется искривленный фронт УВ, близкий к цилиндрическому.

3. Обнаружено, что в диапазоне оптимальных времен задержки срабатывания МПК средняя скорость фронта “плазменного поршня” составляет $V_{p2} \sim 1000\text{--}1200$ м/с, что значительно превышает значения $V_{p1} \sim 450\text{--}500$ м/с, зарегистрированные в режиме малых временных задержек ($t_d \sim 50$ мкс) [2].

4. Выявлена зависимость перепада давления на фронте УВ от состава тестируемых эродирующих материалов (таких как, $C_5H_8O_2$, TiH_x , NiH_x), заполняющих разрядный промежуток МПК-ЭП при прочих равных параметрах электрического разряда. Предполагая, что дополнительное выделение энергии за фронтом УВ связано высокопороговыми плазмохимическими реакциями с участием электронов внутренних электронных оболочек, протекающими внутри ДЭП, можно определить величину удельного выделения энергии реакции $q_x \sim 43$ кДж/г. Такое предположение подтверждается спектрами излучения ДЭП, зарегистрированными в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн. Отметим, что эта выделенная в результате детонации ДЭП удельная дополнительная энергия q_x значительно превышает удельную энергию тротила более чем в 10 раз: $K = q_x/q_{тнт} \approx 10$. При этом значение K значительно превышает таковое, измеренное в работе [2] при малых временах задержки ($K^* = 2\text{--}4$ при $t_d \sim 50$ мкс).

5. Авторы предполагают, что полученные в работе экспериментальные результаты будут способствовать развитию представлений о природе электрофизических явлений в грозовой атмосфере, нижней ионосфере, торнадо, вулканической активности и связанных с ними появлением природных плазмоидов (таких как шаровые молнии, спайты, джеты и др.) [15].

Авторы выражают благодарность Н.М. Рязанскому за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 075-01129-23-00). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mashek I.C., Lashkov V.A., Kolesnichenko Y.F., Brovkin V.G.* // AIAA 2011-1274; <https://doi.org/10.2514/6.2011-1274>
2. *Klimov A.I., Belov N.K., Brovkin V.G., Pashchina A.S.* // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2100. P. 012006; <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2100/1/012006>
3. Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. Морозова А.И., Минск: Наука и техника, 1974. С. 103.
4. *Rout R.K., Mishra P., Rawool A.M. et al.* // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2008. V. 41. № 20. P. 205211. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/20/205211>
5. *Shumlak U.* // J. Appl. Phys. 2020. V. 127. № 20. P. 200901; <https://doi.org/10.1063/5.0004228>
6. *Soto L., Pavéz C., Moreno J. et al.* // Phys. Plasma. 2017. V. 24. № 8. P. 082703; <https://doi.org/10.1063/1.4989845>
7. *Verma R., Rawat R.S., Lee P. et al.* // Plasma Phys. Controlled Fusion. 2009. V. 51. № 7. P. 075008; <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/7/075008>
8. *Pashchina A.S., Efimov A.V., Chinnov V.F.* // High Temp. 2017. V. 55. № 5. P. 650; <https://doi.org/10.1134/S0018151X17040174>
9. *Пащина А.С., Климов А.И.* // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 2. С. 78; <https://doi.org/10.7868/S0207401X14020083>
10. *Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И. и др.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 12. С. 57.
11. *Климов А.И.* // Хим. физика. 2006. Т. 25. № 3. С. 104.
12. *Емелин С.Е., Пирозерский А.Л.* // Хим. физика. 2006. Т. 25. № 3. С. 7.
13. Шаровая молния в лаборатории. Сб. статей. М.: Химия, 1994.
14. *Klimov A.I., Belov N.K., Tolkunov B.N.* // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1698. P. 012034; <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1698/1/012034>
15. *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури и смерчи. Л.: Наука, 1969.

STIMULATED DETONATION OF A HIGH-ENERGY HETEROGENEOUS PLASMA FORMATION CREATED BY CAPILLARY EROSION PLASMA GENERATOR AND MAGNETO- PLASMA COMPRESSOR

A. I. Klimov^{1*}, V. G. Brovkin¹, A. S. Pashchina¹

¹Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: klimov.anatoly@gmail.com

Studying the physical properties of long-lived plasma formations can help us to understanding the nature of electro-physical phenomena in thunder clouds, the lower ionosphere, tornadoes, volcanic activity and the associated appearance of natural plasmoids (such as ball lightning, sprites, jets, etc.). The study of the stimulated detonation of long-lived energy-consuming plasmoids obtained in laboratory using a combined type plasma generator consisting of an erosive plasma generator and a magnetoplasma compressor is presented in this paper. It was found that a necessary condition for detonation is the excess of certain threshold values of pressure and temperature. The existence of a directed explosion mode has been established, which is realized only at optimal delay times (of the order of $t_d \sim 2000$ μ s) between the beginning of a pulsed erosion discharge and the discharge of a magnetoplasma compressor. The parameters of shock waves, as well as the optical and X-ray spectra of long-lived energy-consuming plasmoids in the stimulated detonation mode were measured.

Keywords: plasma, magneto-plasma compressor, erosive discharge, detonation, shock wave.

REFERENCES

1. Mashek I.C., Lashkov V.A., Kolesnichenko Y.F., Brovkin V.G. AIAA paper 2011-1274. <https://doi.org/10.2514/6.2011-1274>
2. Klimov A.I., Belov N.K., Brovkin V.G., Pashchina A.S., J. Phys. Conf. Ser., **2100**, 012006 (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2100/1/012006>
3. Vinogradova A.K. and Morozov A.I., in *Physics and Application of the Plasma Accelerators*, edited by A.I.Morozov (Nauka i Technika, Minsk, 1974), pp. 103–141. [In Russian].
4. Rout R.K., Mishra P., Rawool A.M., Kulkarni L.V., Gupta Satish C., J. Phys. D: Appl. Phys. **41**(20), 205211 (2008). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/20/205211>
5. Shumlak U., J. Appl. Phys. **127**(20), 200901 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0004228>
6. Soto L., Pavéz C., Moreno J., Altamirano L., Huerta L., Barbaglia M., Clausse A., Mayer R.E., Phys. Plasmas **24**(8), 082703 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4989845>
7. Verma R., Rawat R.S., Lee P., Krishnan M., Springham S.V., Tan T.L., Plasma Phys. Controlled Fusion **51**(7), 075008 (2009). <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/7/075008>
8. Pashchina A.S., Efimov A.V., Chinnov V.F., High Temp., **55** (5), 650 (2017). <https://doi.org/10.1134/S0018151X17040174>
9. Pashchina A.S., Klimov A.I., Khim. Fizika, **33** (2), 78 (2014). [In Russian]. <https://doi.org/10.7868/S0207401X14020083>
10. Avramenko R.F., Bahtin B.I., Nikolaeva V.I., Poskacheva L.P., Shirokov N.N., Sov. Tech. Phys., **60** (12), 57 (1990). [In Russian].
11. Klimov A.I., Khim. Fizika, **25** (3), 104 (2006). [In Russian].
12. Emelin S.E., Pirozersky A.L., Khim. Fizika, **25** (3), 7 (2006). [In Russian].
13. *Ball lightning in laboratory* (Chemistry, Moscow, 1994). [In Russian].
14. Klimov A.I., Belov N.K., Tolkunov B.N., J. Phys. Conf. Ser., **1698**, 012034 (2020). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1698/1/012034>
15. Nalivkin D.V., Hurricanes, storms and tornadoes (Nauka, Leningrad, 1969). [In Russian].