



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.16>

УДК: 533.9.07:519.6

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ГЕНЕРАТОРОМ ВЗРЫВНОГО ТИПА

**В.А. Гасилов¹, Н.О. Савенко¹, Е.М. Урвачев^{1,2},
Т.В. Лосева², А.С. Грушин¹, Ю.В. Поклад²**

**¹ Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН
125047, Москва, Миусская пл., д.4**

**² Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН
119334, Москва, Ленинский пр-т., д.38, к.1**

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. Представлены результаты моделирования процессов, происходящих при работе взрывного генератора плазменной струи, в газодинамическом приближении с учетом уравнения состояния продуктов взрыва в форме Джонса-Уилкинса-Ли. Рассмотрены два размера генератора и два рабочих материала – алюминий и свинец. Определена суммарная инжектируемая масса и энергия результирующего плазменного образования. Получены временные зависимости плотности, скорости и температуры плазменной струи, проведено сравнение с ранее восстановленным сценарием инжекции на основе лабораторного эксперимента. Показано, что температура свинцовой струи практически на порядок превосходит значения для генератора с алюминием. Сделан вывод о перспективности множественного сценария инжекции для моделирования астрофизических процессов.

Ключевые слова: взрывной генератор плазменной струи, уравнения состояния JWL, детонация, сценарий инжекции, лабораторный эксперимент.

Финансирование: Работа В.А. Гасилова и Е.М. Урвачева по моделированию динамики плазмы во взрывном генераторе и подбору уравнений состояния выполнена в рамках Проекта РНФ № 25-61-00018. Работа Т.В. Лосевой и Ю.В. Поклада по анализу экспериментальных данных и выбору рабочего вещества выполнена в рамках Государственного задания № FMWN-2025-0006.

Автор для переписки: Савенко Никита Олегович, savenkonkt@gmail.com

Введение

Исследование эффекта влияния неоднородностей ионосферы на радиосвязь является важной научно-прикладной задачей [1-3]. Например, одним из интенсивных явлений в субавроральной ионосфере является поляризационный джет – узкий поток ионов, движущийся с огромными скоростями [4]. Высокая скорость дрейфа может приводить к изменениям структуры ионосферы в этом регионе, что скажется и на распространение радиоволн [5].

Формирование и эволюция различных неоднородностей в ионосфере являются очень сложными процессами [6, 7]. Для их описания необходимо корректно учитывать взаимодействие плазмы с магнитным полем Земли. Проведение активных геофизических ракетных экспериментов в конце XX века [8, 9] позволило получить уникальные данные, которые могут быть использованы как для построения, так и для проверки магнитогидродинамических моделей ионосферной плазмы.

Преимуществом активных экспериментов является контролируемость параметров начального возмущения. В проведенных экспериментах серии «Флаккус» и «Северная звезда» в ионосферу выпускалась высокоскоростная струя алюминиевой плазмы [10, 11]. Ее источником был взрывной генератор плазменной струи (ВГПС), разработанный в Институте динамике геосфер РАН [12, 13]. Использование таких генераторов позволило получить плазменные

образования с энергиями до 6 МДж, что превышает энергетику в экспериментах с бариевыми струями [14].

Более энергичное плазменное образование будет дольше и сильнее воздействовать на ионосферу, что может привести к возникновению сложных нелинейных плазменных эффектов, изучаемых, в том числе, на лабораторных установках [15, 16]. Повышение энергии открывает возможность проведения эксперимента, релевантного для моделирования астрофизических явлений [17, 18]. Увеличить энергию можно, например, за счет инжекции множества струй и их дальнейшего слияния [19, 20]. Большого потока излучения можно добиться, например, и за счет перехода к струям свинцовой плазмы [19].

Для моделирования динамики плазменной струи в активном эксперименте необходимо знать начальное распределение параметров плазмы на выходе из ВГПС – сценарий инжекции. Для уже проведенных экспериментов сценарий инжекции восстанавливался на основе показаний датчиков путем решения обратной задачи в рамках одномерного приближения [18]. Для планирования возможных экспериментов, в особенности при изменении конструкции ВГПС, уже невозможно обойтись без предсказательного численного моделирования процесса генерации плазменной струи.

В работе представлены результаты моделирования процессов внутри взрывного плазменного генератора на основе модели [21, 22], в том числе с учетом замены рабочего вещества на свинец. Расчеты проводились с помощью вычислительной платформы MARPLE [23].

1. Взрывной генератор плазменной струи

Размеры конструкции ВГПС и параметры, получаемой плазмы, различались в зависимости от проводимых активных экспериментов. Была разработана широкая серия генераторов, позволяющих получать плазменные струи с энергией от 1.9 кДж до 6 МДж [9, 24].

В настоящей работе рассмотрим генератор ВГПС-400, использовавшийся в экспериментах серии «Северная звезда». На рисунке 1 изображена схема

генератора, представленная в работе [25]. ВГПС состоит из конусообразного корпуса из алюминия. В центре находится отсек с пористым рабочим веществом в виде плазмообразующих металлических трубок, окруженный взрывчатым веществом (ВВ). Корпус в своей узкой части содержит выходное сопло из стали с малым отверстием [9].

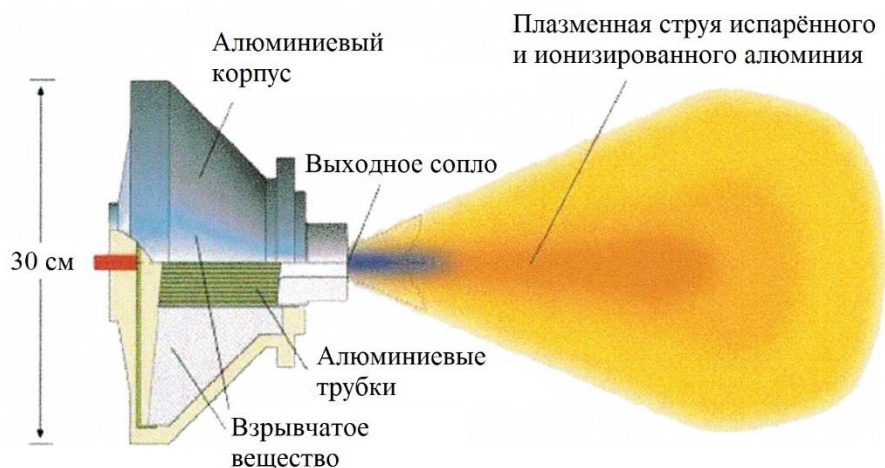


Рис. 1. Схема взрывного генератора плазменной струи. Изображены области алюминиевого корпуса генератора, выходного сопла, взрывчатого вещества, рабочего материала в виде тонких трубок и результирующей плазменной струи. Рисунок взят из работы [25].

В генераторе реализована симметричная схема инициации по внешнему радиусу нижней стенки, приводящая к схождению в центр ударных волн, испарению трубок рабочего вещества и дальнейшему вылету плазмы через сопло со скоростью порядка 40 км/с. Конструкция сопла за счет его деформации и перекрытия к концу работы генератора позволяет отделить плазменную струю от последующих продуктов взрыва [13].

Процессы внутри генератора будем рассматривать полностью в газодинамическом приближении. Будем считать, что стенки отсека с рабочим веществом, отделяющие его от ВВ, представляют собой газ с плотностью, соответствующей твердому веществу. Эффект наличия стенки в этом случае будет моделироваться инерциальным образом за счет повышенной массы вещества в данной области. Также не будем рассматривать процессы упругопластичной деформации и разрушения корпуса генератора, поскольку их характерное время значительно превышает время схождения ударных волн.

Будем считать, что инжекция формально прекращается, когда скорость плазмы становится равной 7 км/с [11]. Для согласованного определения этого момента необходим учет точной конструкции сопла и процесса его деформации.

Внешний диаметр генератора, изображенного на рисунке 1 из работы [25] составляет 30 см. Отметим, что данный размер скорее соответствует генератору ВГПС-300, использовавшемуся в эксперименте «Флаккус» [26]. Внешний диаметр генератора ВГПС-400 составляет 38 см. Радиус выходного отверстия сопла в том и другом случае составляет величину равную 1 см. В данной работе проведем моделирование генератора сразу в двух размерах. Для удобства примем обозначения – «Генератор А» (30 см) и «Генератор Б» (38 см). Для каждого из генераторов рассмотрим вариант и с алюминием в качестве рабочего вещества, и со свинцом.

Общий вид вычислительной области, учитывающий упрощенную геометрию ВГПС и восстановленный на основе схемы из работы [25], изображен на рисунке 2. Расчеты, несмотря на осевую симметрию, были проведены в трехмерной геометрии. Использовалась тетраэдральная дискретизация с разрешением 1 мм внутри генератора и 5 мм – снаружи. На рисунке 2 красным цветом отмечена область инициации ВВ в расчете (вдоль нижнего контура генератора). Расчетные области для генераторов А и Б полностью масштабируются за исключением радиуса сопла (1 см в обоих случаях).

Пористое рабочее вещество, представляющее собой тонкие металлические трубки, моделируется веществом с малой равномерной плотностью, соответствующей полной массой 40 г в объеме внутренней полости для обоих генераторов. Таким образом, при сохранении полной массы рабочего вещества его начальная плотность в расчете не будет изменяться при замене материала с алюминия на свинец при сохранении геометрии генератора.

Будем считать, что энергия, запасенная в ВВ в объеме, соответствующем генератору А составляет величину около 36 МДж, а для генератора Б – около 116 МДж. Начальные условия для ВВ задаются справочным данным [27].

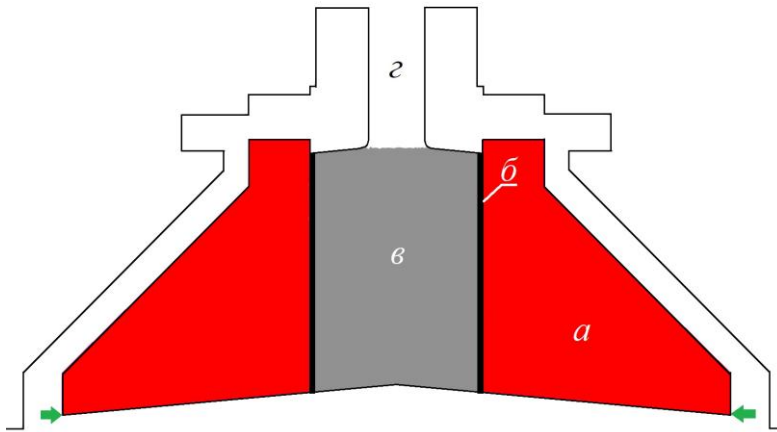


Рис. 2. Геометрия используемой области для генератора А:

- а) красным цветом изображено ВВ;
- б) черным – алюминиевая перегородка;
- в) серым – рабочее пористое вещество;
- г) белым – внешняя разреженная среда.

Зелеными стрелками отмечена кольцевая область, вдоль которой проходит инициация.

Использованию генератора ВГПС-400 в эксперименте «Северная звезда» предшествовал лабораторный эксперимент в вакуумной камере [11, 28]. Будем считать, что плотность среды вне генератора составляет $2.8 \cdot 10^{-8} \text{ г/см}^3$, что соответствует условиям в лабораторном эксперименте. Начальная температура во всей области составляет 300 К.

2. Физико-математическая модель

Используемая в работе система уравнений для однотемпературной идеальной гидродинамики имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla(\rho w) &= 0, \\
 \frac{\partial}{\partial t} \rho w_l + \sum_k \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho w_l w_k + P \delta_{lk}) &= 0, \quad \delta_{lk} = \begin{cases} 1, l = k, \\ 0, l \neq k, \end{cases} \\
 \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \varepsilon + \frac{\rho w^2}{2} \right) + \nabla \left[\left(\rho \varepsilon + \frac{\rho w^2}{2} + P \right) w \right] &= 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где ρ – плотность, w – скорость, P – давление, ε – внутренняя энергия. Для замыкания системы уравнений гидродинамики используются зависимости $P = P(T, \rho)$ и $\varepsilon = \varepsilon(T, \rho)$, называемые уравнением состояния.

Для численного интегрирования системы (1) в программном комплексе MARPLE применяется двухэтапная (предиктор-корректор) разностно-объемная схема. Для вычисления газодинамических потоков через грани ячеек используется модифицированная схема Лакса-Фридрихса, успешно применявшаяся при моделировании инъекции плазменной струи в лабораторном эксперименте [29].

Систему уравнений (1) дополним моделью детонации [22], описывающую выделение энергии при детонации и преобразование ВВ в продукты взрыва (ПВ). Используемое приближение представляет собой вариацию модели детонации по лучам [30]. Изначально вся соответствующая область генератора заполнена ВВ. Далее из каждой точки области инициации начинает распространяться сфера с радиусом, равным

$$R = C_D(t - t_0), \quad (2)$$

где C_D – скорость детонационной волны, определяемой для конкретного ВВ из справочных данных [27], t – текущий момент времени, а t_0 – момент инициации детонирующего вещества. В расчете время будем отсчитывать от момента инициации. Все ячейки, попавшие внутрь получаемой области, будем считать прореагировавшими, ВВ в этих ячейках переводится в массу ПВ с выделением соответствующего количества энергии [27].

Поскольку в генераторе реализована цилиндрически симметричная схема инициации, то вместо использования сферы перейдем к использованию тора. Внешний радиус будет фиксированным и равным радиусу нижнего кольца генератора, т.е. радиусу узкой области инициации. Внутренний радиус заданного тора будет изменяться согласно выражению (2).

Важным моментом при решении системы уравнений (1) является её замыкание через уравнение состояния. Поскольку характерное время выделения энергии и преобразования ВВ в ПВ значительно меньше времени

распространения детонационной волны, будем считать, что ВВ описывается уравнением состояния идеального газа с соответствующей молярной массой.

Для описания ПВ будем использовать уравнение состояния в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL) [21, 31, 32]. Такой подход широко используется при работе с твердыми химическими ВВ, см., например, [33, 34]. Рассмотрим вариант JWL [21], в котором в качестве опорной изэнтропы принимается проходящая через точку Чепмена-Жуге. Тогда для любого состояния ПВ справедливо соотношение:

$$P(V, E) = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{W \cdot R_1}\right) \cdot e^{-R_1 \cdot W} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{W \cdot R_2}\right) \cdot e^{-R_2 \cdot W} + \frac{\omega \cdot \rho_0 \cdot E}{W}.$$

Уравнение для удельной внутренней энергии легко выводится из данного соотношения. Для вычисления температуры используется соотношение:

$$T(V, E) = T_s(V) + \frac{E - E_s(V)}{C_v},$$

где $T_s = T_{CJ} \cdot \left(\frac{V_{CJ}}{V}\right)^\omega$ и $E_s(V) = \left(\frac{A}{R_1} \cdot e^{-R_1 \cdot W} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 \cdot W} + \frac{C}{\omega} \cdot W^{-\omega}\right) / \rho_0$, здесь

$W = \frac{V}{V_0}$ – относительный удельный объем, $V = \frac{1}{\rho}$, ρ – плотность в ячейке,

$V_0 = \frac{1}{\rho_0}$, ρ_0 – начальная плотность детонирующего вещества, A, B, C, R_1, R_2 –

параметры конкретного ВВ, $\omega = \gamma - 1$, где $\gamma \approx 1.3$ – показатель изэнтропы, E – удельная энергия, T_{CJ}, V_{CJ} – температура и удельный объём в точке Чепмена-Жуге для конкретного ВВ.

Для описания рабочего тела как в случае алюминия, так и в случае свинца будем использовать плазменное уравнение состояния [35, 36], апробированное при расчете инъекции струи в лабораторном эксперименте [28].

3. Результаты численного моделирования

Перейдем к описанию результатов численного моделирования процессов, происходящих в генераторе. На рисунке 3 изображена относительная концентрация веществ ($\rho_{Al}/\rho_{ПВ}$) на моменты времени 15 и 20 мкс после инициации. В расчете наблюдается распространение сходящихся к центру ударных волн, приводящих к сжатию рабочего материала генератора и выходу плазменной струи из сопла. Таким образом, расчет корректно воспроизводит основные стадии работы ВГПС.

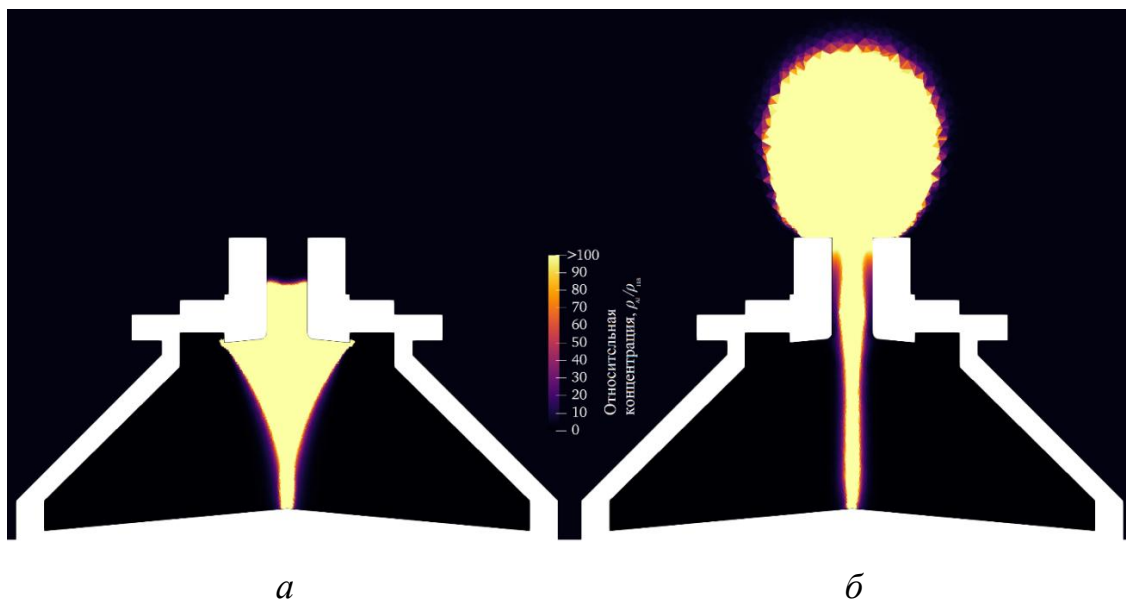


Рис.3. Пространственное распределение отношения концентрации рабочего вещества к концентрации ПВ в расчете для генератора А на момент времени: а) 15 мкс; б) 20 мкс.

Поскольку для ВГПС-400 с алюминиевой плазмой имеются экспериментальные данные, то в начале проведем расчеты для генераторов А и Б с алюминием в качестве рабочего материала. Одним из ключевых параметров генератора является инжектируемая масса. Поскольку в расчете мы не учитываем упругопластичную деформацию сопла и его перекрытие, то время инжекции на основе восстановленного сценария инжекции [11] примем равным 22 мкс. В численном расчете плазма начинает выходить из генератора А примерно через 18 мкс после инициации, а из генератора Б – через 11.5 мкс. На рисунке 4 изображены временные зависимости инжектируемой массы для

рассматриваемых генераторов. Для сравнения приводятся данные, полученные при решении обратной задачи в одномерном приближении на основе экспериментальных данных [11]. Кривые были смещены относительно друг друга таким образом, чтобы сопоставить время начала выхода плазмы из генератора. За 22 мкс из меньшего генератора **А** успевает выйти 23 г плазмы, а из большего **Б** – около 24.9 г. В лабораторном эксперименте для генератора ВГПС-400 масса инжектируемой плазмы составляет приблизительно 30 г. Таким образом, расчетное значение массы для генератора **Б** с размерами, согласующимися с ВГПС-400, хорошо совпадает с экспериментальными данными.

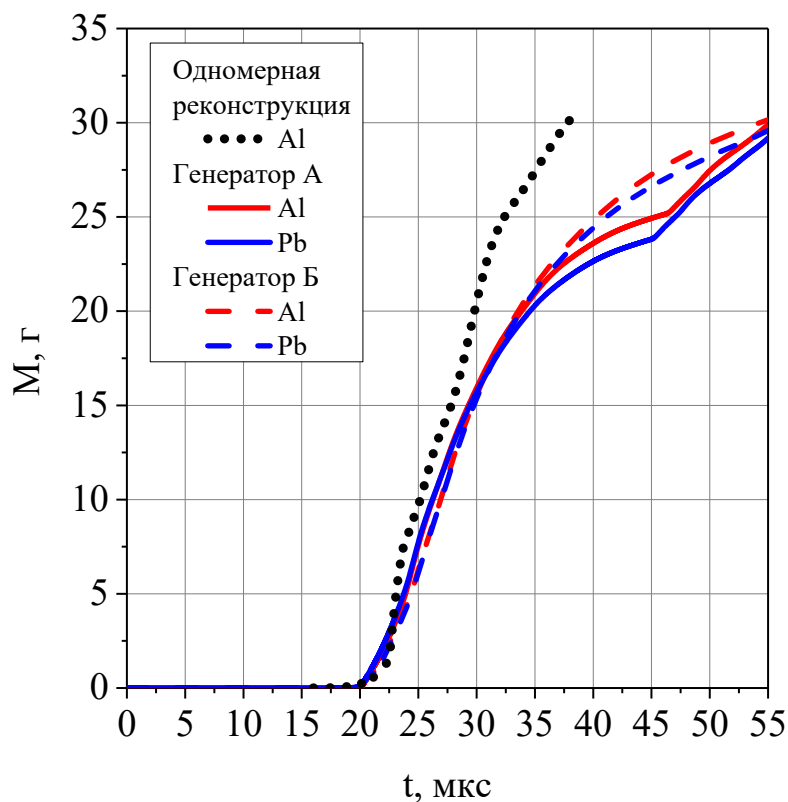


Рис. 4. Временная зависимость вылетевшей массы рабочего вещества в сравнении с одномерной реконструкцией сценария инъекции для генератора с алюминием [11].

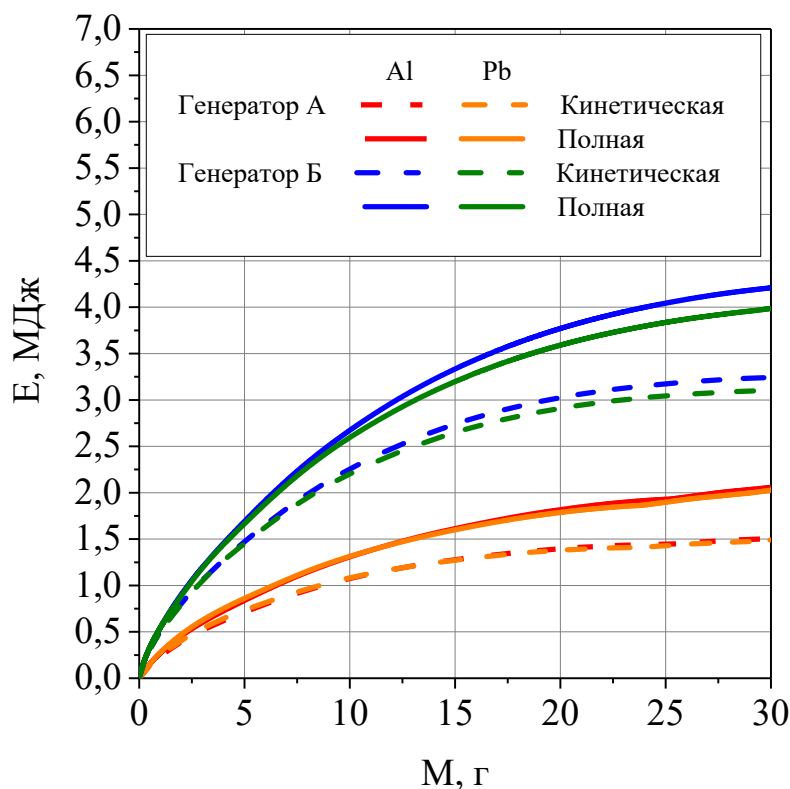


Рис. 5. Массовая зависимость кинетической и полной энергий плазмы.

Другим важным параметром является энергия инжектируемой струи. В лабораторном эксперименте для ВГПС-400 энергия составляла порядка 6 МДж. Поскольку энергия напрямую связана с инжектированной массой, то определим расчетную энергию, заключенную в 30 г плазмы. Зависимость суммарной энергии плазменного образования от вышедшей массы изображена на рисунке 5. Для генератора А на момент вылета 30 г полная выходная энергия составляет приблизительно 2 МДж, из которых 1.5 МДж — кинетическая, а 0.5 МДж — тепловая. Для генератора Б на тот же момент полная энергия приблизительно 4.25 МДж, из которых 3.25 МДж — кинетическая, а 1 МДж — тепловая. Таким образом, по энергии плазменного образования, генератор Б также лучше согласуется с реальным ВГПС-400. Отметим, что увеличение энергии, запасенной в ВВ, более чем в 3 раза привело к увеличению энергии инжектируемой плазмы всего лишь в 2 раза. Этот факт подтверждает перспективность сценариев с инъекцией и столкновением множества струй [19, 20], поскольку энергия результирующей струи может оказаться гораздо больше, чем для струи из одного генератора, пусть даже большего размера.

Далее перейдем к сравнению временных характеристик инжектируемой плазмы для различных генераторов – см. рисунок 6. На рисунке также приведены кривые для восстановленного ранее сценария инъекции [11]. Одной из наиболее показательных величин является скорость. В лабораторном эксперименте с ВГПС-400 инъекция прекратилась, когда скорость плазмы стала равной приблизительно 7 км/с [11]. В расчете для генератора **Б** этот момент наступает через 19.5 мкс. Таким образом, расчетное время окончания инъекции согласуется со временем 22 мкс, определенным из сценария [11]. При совмещении временных зависимостей друг относительно друга расчетные значения скорости для генератора **Б** полностью повторяют оценку [11], начиная с момента, когда скорость падает до 20-30 км/с. Это соответствует началу выхода основной массы струи – см. зависимость массы от скорости на рисунке 6(а). Отличия в самом начале – в пике скорости, вероятно, связаны с отсутствием учета различных диссипативных процессов в расчете. Более того, струя в начале имеет капельную фазу, когда плазма летит не однородной, а разделенной на отдельные сгустки. Вопросы корректного учета сложных неравновесных процессов конденсации струи или образования пылевых частиц [37, 38] заслуживают отдельного большого исследования. Тем не менее, уже проведенный расчет показал, что малая масса струи имеет высокие скорости. Так для малого генератора **А** скорость достигает 50-60 км/с, а для большего генератора **Б** – 120-130 км/с. Это может объяснить факт детектирования в эксперименте «Северная звезда» высокоскоростных частиц [39]. В ранее проведенных газодинамических расчетах на основе восстановленного сценария с максимальной скоростью порядка 40 км/с [11] данный эффект не был объяснен.

Профили плотности для генератора **Б**, также хорошо совпадают с ранее восстановленным сценарием инъекции [11]. Таким образом, согласуются значения плотности и скорости, полученные с помощью двух полностью независимых методик – путем решения обратной задачи на основе экспериментальных данных и в самосогласованном расчете процессов внутри плазменного генератора на основе его размеров. В профилях температур при

этом наблюдается незначительное расхождение, вероятно, связанное с отсутствием учета переноса излучения. Температура в сценарии инъекции для ВГПС-400 восстанавливалась на основе лабораторного эксперимента [11]. Дополнительная калибровка температуры по показаниям фотометров в ближней зоне, как, например, для генератора ВГПС-300 в эксперименте «Флаккус» [20], при этом не проводилась, в виду отсутствия соответствующей измерительной аппаратуры в эксперименте.

В целом, значения всех параметров для генератора **A** оказываются меньше, чем для генератора **B**. В расчетах с помощью комплекса MARPLE производится отслеживание массовой доли каждой компоненты генератора (сама плазма, ВВ, ПВ). Важным результатом является и то, что в расчетах подтверждено отсутствие в плазменной струе продуктов взрыва, несмотря на газовое приближение для твердой перегородки между ВВ и рабочим веществом, что хорошо показано на рисунке 3. После проведенной валидации методики путем сравнения расчетных параметров генератора **B** с экспериментальными значениями для ВГПС-400, можно перейти к расчетам с заменой рабочего материала на свинец. Для генератора **A** энергия свинцовой плазменной струи оказывается практически равной алюминиевой. Для генератора **B**, получаемая энергия в 30 г плазмы оказывается несколько ниже и составляет величину порядка 4 МДж – см. рисунок 5. Также за 22 мкс свинца вылетит несколько меньше, чем алюминия. Временные зависимости профилей плотности и скорости при этом оказываются идентичными – см. рисунок 6(б, в). Таким образом, при планировании перспективных генераторов можно пользоваться хорошо верифицированным сценарием инъекции, представленным в работе [11].

Отдельного внимания заслуживают значения температуры получаемой плазмы. Из-за использования вещества с большим атомным весом удастся добиться повышения температуры плазмы почти на порядок, по сравнению с алюминием – см. рисунок 6(г). Данный результат подтверждает сделанные ранее предположения об использовании свинцового генератора в качестве

мощного источника ультрафиолетового излучения [19]. Такой калиброванный источник может использоваться для исследования влияния мощного излучения на ионосферу [40].

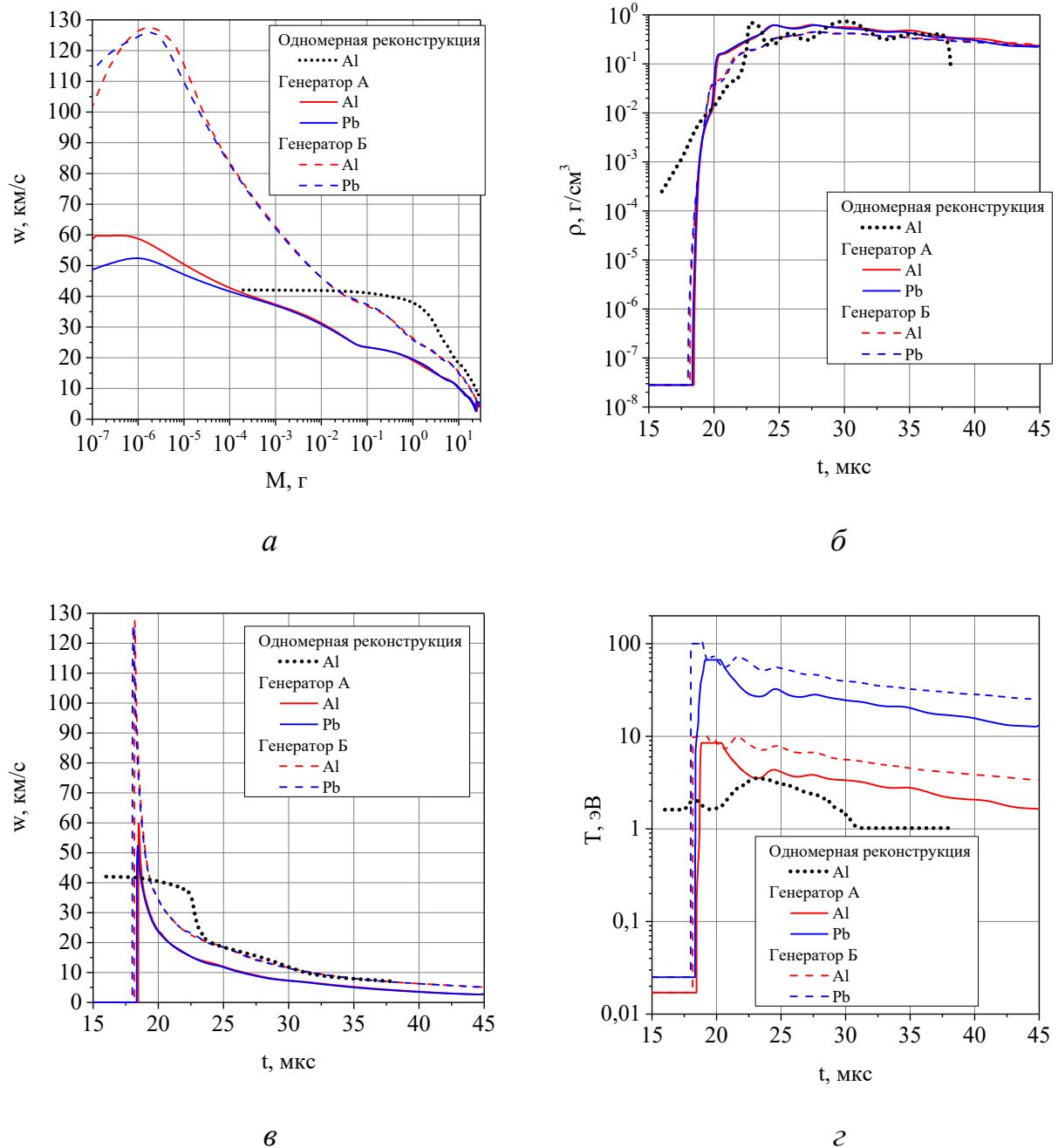


Рис. 6. Зависимости для генераторов А и Б с различным рабочим веществом:

От инжектируемой массы: а) скорости;

От времени: б) плотности; в) скорости; г) температуры.

Приведены зависимости, определенные при реконструкции сценария инъекции на базе экспериментальных данных [11].

Заключение

Проведено моделирование процессов, происходящих во взрывных генераторах плазменных струй. Для описания использовалось газодинамическое приближение с описанием продуктов взрыва с помощью уравнения состояния в форме Джонса-Уилкинса-Ли. Используемая модель позволила описать все ключевые этапы работы генератора: схождение ударных волн, образование горячей плазмы и ее выход с высокой скоростью через сопло.

Были рассмотрены генераторы двух размеров: с диаметром основания 30 и 38 см. Размеры большего генератора соответствуют ВГПС-400, использовавшемуся в активных экспериментах серии «Северная звезда». Для данного генератора проведено сравнение расчетных параметров с имеющимися экспериментальными данными. Временные зависимости скорости, плотности и температуры, полученные в рамках прямого расчета, оказались в хорошем согласии с ранее восстановленным сценарием путем решения обратной задачи на основе показаний датчиков в лабораторном эксперименте [11]. Таким образом, полученное согласие двух независимых методик верифицирует ранее проведенные расчеты на основе сценария инъекции [11, 28].

Численные расчеты предсказывают наличие у небольшой массы инжестируемой плазмы высокой скорости (порядка 120-130 км/с). Этот может объяснить факт детектирования высокоскоростных частиц в эксперименте «Северная звезда» [39]. В ранее реконструированном сценарии инъекции максимальная скорость составляла величину всего лишь порядка 40 км/с [11].

На основе сравнительных расчетов генераторов разных размеров показано, что увеличение энергии, запасенной внутри ВВ, при увеличении размера генератора не приводит к кратному повышению энергии плазменного образования. Таким образом, для повышения энергетики активного эксперимента, целью которого является воспроизведение условий, релевантных для моделирования астрофизических явлений, лучше использовать сценарий со слиянием множества струй [41]. Проанализирован эффект замены рабочего материала генератора с алюминия на свинец. Расчеты подтвердили значительное

повышение температуры плазмы при переходе к материалу с большим атомным весом. Параметры скорости и плотности свинцового плазменного образования при этом оказались идентичными алюминиевому.

Проведенные расчеты подтвердили факт отсутствия смешивания плазмы рабочего вещества с продуктами взрыва. В дальнейшем планируется провести расчеты с учетом деформации и разрушения материала генератора. Также планируется расширить уравнения состояния для учета возможности конденсации плазмы струи и предсказать спектр неоднородностей инжектируемой плазмы. Это может позволить объяснить, в том числе, экспериментальное обнаружение в плазме алюминия из ВГПС-400 кластеров с большим атомным весом [39]. В лабораторном эксперименте этот факт может быть проверен путем высокоточной рентгенографии [42] или через просвет сопла генератора гамма-излучением [43].

Представленные результаты вычислительных экспериментов получены на многопроцессорной гибридной суперкомпьютерной системе К-60 в ЦКП ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Авторы глубоко признательны Ю. И. Зецеру за обсуждение результатов активных экспериментов.

Финансирование: Работа В.А. Гасилова и Е.М. Урвачева по моделированию динамики плазмы во взрывном генераторе и подбору уравнений состояния выполнена в рамках Проекта РНФ № 25-61-00018. Работа Т.В. Лосевой и Ю.В. Поклада по анализу экспериментальных данных и выбору рабочего вещества выполнена в рамках Государственного задания № FMWN-2025-0006.

Литература

1. Blaunstein N., Plohotniuc E. Ionosphere and applied aspects of radio communication and radar. – CRC press, 2008.
<https://doi.org/10.1201/9781420055177>

2. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Обратная задача радиочастотного зондирования ионосферы // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – №. 10. – С. 10.
3. Пашинцев В.П. и др. Структурно-многолучевой подход к разработке пространственно-временной модели одномодового декаметрового канала связи с диффузной многолучевостью // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.6.3>
4. Galperin I.U.M., Gurevich V.L., Kozub V.I. Thermoelectric effects in superconductors // Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki. – 1974. – Т. 66. – С. 1387-1397.
5. Sinevich A.A. et al. The Internal structure of a polarization jet/SAID: A stratified polarization jet/SAID // Geomagnetism and Aeronomy. – 2023. – Т. 63. – №. 6. – С. 747-756. <https://doi.org/10.1134/S0016793223600583>
6. Mishin E.V. The evolving paradigm of the subauroral geospace // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. – 2023. – Т. 10. – id. 1118758. <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1118758>
7. Sinevich A.A. et al. The Polarization Jet/SAID and Plasma Irregularities of Different Scales // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2024. – Т. 88. – №. 3. – С. 375-380. <https://doi.org/10.1134/S1062873823705548>
8. Erlandson R.E. et al. The APEX North Star experiment: observations of high-speed plasma jets injected perpendicular to the magnetic field // Advances in Space Research. – 2002. – Т. 29. – №. 9. – С. 1317-1326. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00183-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00183-7)
9. Zetser J.I., Poklad Y.V., Erlandson R.E. Active Experiments in the Ionosphere at Altitudes of 140–360 km. Optical Observations Results Reanalysis // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2021. – Т. 57. – №. 5. – С. 745-760. <https://doi.org/10.1134/S1069351321050219>

10. Лосева Т.В. и др. Характеристики плазменной струи взрывного генератора в экспериментах «Флаккус»: измерения и численное моделирование // Динамические процессы в геосферах. – 2021. – №. 13. – С. 175-186.
https://doi.org/10.26006/22228535_2021_1_175
11. Losseva T.V. et al. Numerical Simulations of the First Stage of Dynamics of a High-Speed Plasma Jet in Fluxus and North Star Active Geophysical Rocket Experiments // Plasma Physics Reports. – 2022. – Т. 48. – №. 10. – С. 1106-1110.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X2260058X>
12. Kiselev Y.N. et al. Investigation of high-speed air jets of an explosive plasma generator // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 1986. – Т. 27. – №. 4. – С. 492-495. <https://doi.org/10.1007/BF00910188>
13. Киселев Ю.Н., Поклад Ю.В., Рондественский В.Б., Христофоров Б.Д., Юрьев В.Л. Взрывные источники высокоскоростной плазмы и УФ-излучения. 2-й Всесоюзный симпозиум по радиационной плазмодинамике. Тезисы докладов, ч;1, МГТУ, 1991, с.59-60.
14. Swenson C.M. et al. CRIT II electric, magnetic, and density measurements within an ionizing neutral stream // Geophysical research letters. – 1990. – Т. 17. – №. 13. – С. 2337-2340. <https://doi.org/10.1029/GL017i013p02337>
15. Zakharov Y.P. et al. New type of large-scale experiments for laboratory astrophysics with collimated jets of laser plasma in a transverse magnetic field // Quantum Electronics. – 2019. – Т. 49. – №. 2. – С. 181-186.
<https://doi.org/10.1070/QEL16884>
16. Zakharov Y.P. et al. On the opportunity of Laser Plasma simulation of Plasma Jets formation in moderate magnetic fields~ kGs // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2067. – №. 1. – id. 012021. – С. 5.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2067/1/012021>
17. Беляев В.С. и др. Численное моделирование замагниченных астрофизических джетов и сравнение с лабораторным лазерным экспериментом // Астрономический журнал. – 2018. – Т. 95. – №. 3. – С. 171-192. <https://doi.org/10.7868/s0004629918030039>

18. Бескин В.С., Крауз В.И., Ламзин С.А. Лабораторное моделирование струйных выбросов из молодых звёзд на установках с плазменным фокусом // Успехи физических наук. – 2023. – Т. 193. – №. 4. – С. 345-381. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.12.039130>
19. Киселев Ю.Н., Поклад Ю.В., Христофоров Б.Д. Область соударения вы-сокоскоростных плазменных струн свинца-мощный источник жесткого УФ-излучения. 3-й Межгосударственный симпозиум по радиационной плазмодинамике. Тезисы докладов, “Инженер”, 1994, с.28-29.
20. Лосева Т.В. и др. Начальная стадия развития плазменной струи в активных геофизических ракетных экспериментах // Динамические процессы в геосферах. – 2024. – №. 9. – С. 102-110.
21. Валько В.В. и др. Уравнения состояния продуктов детонации взрывчатых веществ // Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. – 2021. – №. 51. – С. 38. <https://doi.org/10.20948/prepr-2021-51>
22. Валько В.В. и др. Моделирование воздушной ударной волны с использованием уравнений состояния продуктов детонации в форме Джонса–Уилкинса–Ли // Математическое моделирование. – 2022. – Т. 34. – №. 4. – С. 3-22. <https://doi.org/10.20948/mm-2022-04-01>
23. Gasilov V.A. et al. MARPLE: software for multiphysics modelling in continuous media // Вычислительные методы и программирование. – 2023. – Т. 24. – №. 4. – С. 316-338. <https://doi.org/10.26089/NumMet.v24r423>
24. Поклад Ю.В. Взрывные генераторы плазменных струй для экспериментального моделирования и активных геофизических экспериментов : дис. – Ин-т динамики геосфер, 1996.
25. Erlandson R.E. et al. North star Plasma-jet space experiment // Journal of Spacecraft and Rockets. – 2004. – Т. 41. – №. 4. – С. 483-489. <https://doi.org/10.2514/1.11943>
26. Адушкин В.В. и др. Активные эксперименты” Флаккус 1, 2”: исследование взаимодействия плазменной струи с геофизической средой на высоте 140 км // ДАН РФ. – 1998. – Т. 361. – №. 6. – С. 818-821.

27. Chemezov D.A. Description of library materials software package ANSYS AUTODYN // ISJ Theoretical & Applied Science. – 2014. – Т. 16. – №. 8. – С. 4-23. <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2014.08.16.2>
28. Savenko N.O. et al. Numerical Simulation of Plasma Jet Expansion in a Laboratory Experiment // Plasma Physics Reports. – 2025. – Т. 51. – №. 6. – С. 697-707. <https://doi.org/10.1134/S1063780X25602755>
29. Савенко Н.О., Урвачев Е.М. Численное моделирование высокоскоростных плазменных струй при произвольном угле инъекции // Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. – 2025. – №. 28. – С. 21. EDN: [QJIUBT](#)
30. Bdzil J.B., Stewart D.S. The dynamics of detonation in explosive systems // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2007. – Т. 39. – №. 1. – С. 263-292. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092049>
31. Lee E., Finger M., Collins W. JWL equation of state coefficients for high explosives. – Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States), 1973. – №. UCID-16189.
32. Горбатенко А.А. Анализ уравнения состояния продуктов детонации JWL // Молодежный научно-технический вестник. – 2012. – №. 3. – С. 11.
33. Медин С.А., Паршиков А.Н. Использование уравнения состояния jwl и макрокинетического уравнения разложения вв в методе sph // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2012. – Т. 13. – №. 4. – С. 6.
34. Герасимов С.И. и др. Скорость детонации пиротехнического состава ВС-2 и параметры уравнения состояния продуктов его взрыва в форме Джонса–Уилкинса–Ли // Физика горения и взрыва. – 2022. – Т. 58. – №. 2. – С. 100-108. <https://doi.org/10.15372/FGV20220211>
35. Nikiforov A.F., Novikov V.G., Uvarov V.B. Quantum-statistical models of hot dense matter: methods for computation opacity and equation of state. – Basel : Birkhäuser Basel, 2005.

36. Vichev I.Y. et al. On certain aspects of the THERMOS toolkit for modeling experiments // High Energy Density Physics. – 2019. – Т. 33. – id. 100713. – С. 7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hedp.2019.100713>.
37. Popel S.I. et al. Shock waves in charge-varying dusty plasmas and the effect of electromagnetic radiation // Physics of Plasmas. – 2000. – Т. 7. – №. 6. – С. 2410-2416. <http://dx.doi.org/10.1063/1.874079>
38. Лосева Т.В., Попель С.И., Голубь А.П. Пылевые ионно-звуковые ударные волны в лабораторной, ионосферной и астрофизической плазме // Физика плазмы. – 2020. – Т. 46. – №. 11. – С. 1007-1025. <https://doi.org/10.31857/S0367292120110049>
39. Pfaff R.F. et al. Electric field, magnetic field, and density measurements on the active plasma experiment sounding rocket // Journal of spacecraft and rockets. – 2004. – Т. 41. – №. 4. – С. 521-532. <https://doi.org/10.2514/1.11945>
40. Корсунская Ю.А., Панкова М.В. Влияние жесткого рентгеновского и гамма излучений солнца на ионосферу земли и другие процессы в геосферах. Часть III. Ночная область // Динамические процессы в геосферах. – 2021. – №. 13. – С. 166-175. https://doi.org/10.26006/22228535_2021_1_166
41. Losseva T.V. et al. Numerical Simulation of the Interaction of High-Velocity Plasma Jets Injected in the Earth's Ionosphere // Plasma Physics Reports. – 2023. – Т. 49. – №. 8. – С. 991-999. <https://doi.org/10.1134/S1063780X23600810>
42. Roussikh A.G. et al. Radiographic investigation of metal-puff plasma jets generated by vacuum arcs // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2018. – Т. 46. – №. 10. – С. 3487-3492. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2849205>
43. Lobok M.G., Brantov A.V., Bychenkov V.Y. Shielded radiography with gamma rays from laser-accelerated electrons in a self-trapping regime // Physics of Plasmas. – 2020. – Т. 27. – №. 12. <https://doi.org/10.1063/5.0028888>

Для цитирования:

Гасилов В.А., Савенко Н.О., Урвачев Е.М., Лосева Т.В., Грушин А.С., Поклад Ю.В. Моделирование динамики плазменной струи в лабораторном эксперименте с генератором взрывного типа // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.16>

