

Научная статья

УДК 03.1, 04.1
DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-2-54-67

Математическое моделирование импульсного заполнения водородом вакуумированной трубки

Андрей Васильевич Аржанников¹, Денис Алексеевич Самцов^{*1}
Станислав Леонидович Синицкий¹, Дмитрий Анатольевич Старостенко¹
Дмитрий Владимирович Хмельницкий², Диляра Фуатовна Ганеева²
Дмитрий Александрович Мастьюк^{2,3}, Роман Викторович Протас^{2,4}
Дмитрий Витальевич Петров²

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

³Южно-Уральский государственный университет (НИУ)
Челябинск, Россия

⁴Снежинский физико-технический институт –
филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Снежинск, Россия

*D.A.Samtsov@inp.nsk.su

Аннотация

Решена задача о быстром импульсном заполнении водородом длинной вакуумированной цилиндрической трубы. Численное решение задачи проведено в рамках системы уравнений газовой динамики. По результатам этого решения представлена картина пространственно-временной динамики процесса заполнения трубы водородом, инжектируемым в нее через сопла, установленные на ее концах. В результате проведенного моделирования продемонстрировано, что выбранное инженерно-физическое решение по заполнению трубы водородом удовлетворяет требованиям задачи по созданию в ней тонкого плазменного шнура с высокой концентрацией электронов.

Ключевые слова

взаимодействие РЭП с плазмой, килоамперный релятивистский электронный пучок, зарядовая нейтрализация, пенниговский разряд

Для цитирования

Аржанников А. В., Самцов Д. А., Синицкий С. Л., Старостенко Д. А., Хмельницкий Д. В., Ганеева Д. Ф., Мастьюк Д. А., Протас Р. В., Петров Д. В. Математическое моделирование импульсного заполнения водородом вакуумированной трубы // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 2. С. 54–67. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-2-54-67

© Аржанников А. В., Самцов Д. А., Синицкий С. Л., Старостенко Д. А., Хмельницкий Д. В., Ганеева Д. Ф., Мастьюк Д. А., Протас Р. В., Петров Д. В., 2025

Mathematical Simulation of the Pulsed Fulfilling with the Hydrogen of the Vacuumed Tube

Andrey V. Arzhannikov¹, Denis A. Samtsov^{*1}, Stanislav L. Sinitsky¹
Dmitry A. Starostenko¹, Dmitry V. Khmelnitsky², Dilyara F. Ganeeva²
Dmitry A. Mastyuk^{2,3}, Roman V. Protas^{2,4}, Dmitry V. Petrov²

¹ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

² Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute
of Technical Physics named after Academician E. I. Zababakhin”,
Snezhinsk, Russian Federation

³ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education (NRU),
Chelyabinsk, Russian Federation

⁴ Snezhinsk Institute of Physics and Technology –
Department of National Research Nuclear University MEPhI,
Snezhinsk, Russian Federation

^{*}D.A.Samtsov@inp.nsk.su

Abstract

The problem concerned rapid pulsed hydrogen filling of a long, vacuumed cylindrical tube was solved. The numerical solution was performed with a system of gas dynamics equations. According to the results of this solution provide a picture of the spatiotemporal dynamics of the tube filling with hydrogen injected through nozzles installed at its ends. Results of the simulation demonstrated that the chosen engineering and physical solution for filling the tube with hydrogen satisfies the requirements for creating a thin plasma column with a high electron concentration.

Keywords

Interaction of REB with plasma, kiloampere relativistic electron beam, charge neutralization, Penning discharge

For citation

Arzhannikov A. V., Samtsov D. A., Sinitsky S. L., Starostenko D. A., Khmelnitsky D. V., Ganeeva D. F., Mastyuk D. A., Protas R. V., Petrov D. V. Mathematical simulation of the pulsed fulfilling with the hydrogen of the vacuumed tube. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, № 2, pp. 54–67. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-2-54-67

Введение

Один из подходов к решению проблемы генерации мощных потоков излучения в интервале частот 0,3–1 ТГц заключается в использовании эмиссии из плазмы электромагнитных волн, получаемых в результате трансформации электронной плазменной волны, которая накачивается сильноточным релятивистским электронным пучком (РЭП). Экспериментальные и теоретические исследования в этом направлении осуществляются в ИЯФ СО РАН с 2010 г. [1; 2]. В настоящее время они проводятся на установке ГОЛ-ПЭТ [3; 4]. На этой установке инъекцией релятивистского электронного пучка (РЭП) с плотностью тока 1–2 кА/см² в плазменный столб с концентрацией электронов $(5\text{--}7)\cdot10^{14}$ см⁻³ в ведущем магнитном поле с индукцией 3–4 Тл осуществлена генерация потока терагерцевого излучения в интервале частот 0,1–0,5 ТГц (см. [3; 4]). Плазменный столб с указанными параметрами создавался импульсным высоковольтным разрядом на основе опыта, накопленного в течение многолетних экспериментальных исследований [5–7].

Достигнутые в экспериментах на установке ГОЛ-ПЭТ результаты в совокупности с теоретическими исследованиями трансформации верхне-гибридных колебаний плазмы [2; 8–9] позволили сформулировать путь перехода к генерации в такой пучково-плазменной системе потоков излучения в области 1 ТГц [10]. Для перехода в указанный частотный интервал необходимо повысить концентрацию плазмы до $(5\text{--}7)\cdot10^{15}$ см⁻³ с соответствующим повышением плотности тока пучка до (10–15) кА/см². Проект установки с такими параметрами пучка и плаз-

мы был сформулирован в работе [10] и получил название ЛИУ-ПЭТ. Одно из препятствий к реализации проекта ЛИУ-ПЭТ состоит в том, что в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ), из которого пучок инжектируется в плазму, эмиссия электронов осуществляется с поверхности накаливаемого катода, которая не допускает даже малых воздействий со стороны остаточных газов в высоковакуумном объеме ускорительного диода. По этой причине заполнение газом области вакуумной камеры, где электронный пучок проходит по плазменному шнуре, должно осуществляться на минимальном интервале времени и таким образом, чтобы этот газ не смог достигнуть диода ускорителя.

В статье рассмотрена задача о быстром импульсном заполнении нейтральным газом вакуумного объема, ограниченного длинной цилиндрической трубкой. Решение задачи проведено для конкретной геометрии, которая приемлема для создания плазменного шнура, подходящего для инжекции в него РЭП с плотностью тока масштаба $10 \text{ кA}/\text{см}^2$. Цель этих расчетов состояла в том, чтобы найти оптимальные условия для инжекции газа в трубку через импульсные клапаны, при которых достигается необходимая концентрация водорода и не допускается его распространение в сторону ускорителя. В первом разделе основного текста статьи дано краткое описание геометрии системы импульсного высоковольтного разряда и сформулированы требования к системе импульсной подачи газа в разрядный промежуток. Далее приведены картины динамики заполнения газом вакуумной полости внутри длинной кварцевой трубы, полученные в рамках компьютерного моделирования процесса распространения потоков газа. В заключении текста обобщены установленные закономерности импульсного заполнения нейтральным газом вакуумной полости внутри трубы.

1. Геометрия и характерные временные масштабы создания плазменного шнура

В экспериментах по генерации потоков ТГц-излучения, которые будут реализованы на ускорительном комплексе ЛИУ-ПЭТ, требуется создать тонкий плазменный шнур большой протяженности, параметры которого адекватны задаче возбуждения верхне-гибридных плазменных волн при прохождении пучка релятивистских электронов. Геометрия высоковольтного разрядного промежутка для создания такого плазменного шнура представлена на рис. 1. Для обеспечения требуемой плотности электронов плазмы ($\sim 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) путем ионизации водорода высоковольтным разрядом необходима высокая плотность тока ($\sim 3 \text{ кA}/\text{см}^2$) в разрядном промежутке. Чтобы достигнуть такой высокой плотности тока в разряде, потребовалось ограничить диаметр протяженного газового облака. В качестве ограничителя диаметра газового облака, по которому будет реализовываться высоковольтный разряд, была выбрана кварцевая трубка диаметром 22 мм с диэлектрическими кольцами диаметром 16 мм, размещенными внутри нее, как это показано на рис. 1.

Вообще говоря, для получения тонкого цилиндрического плазменного шнура необходимо создать две взаимодополняющие системы: систему импульсного формирования протяженного цилиндрического газового облака и систему формирования импульса высоковольтного разряда, обеспечивающих необходимую степень ионизации в этом облаке. В данной статье мы ограничимся рассмотрением системы формирования цилиндрического газового облака путем импульсной подачи водорода в кварцевую трубку за счет быстрого открывания и закрывания импульсных клапанов.

В данной системе быстрого импульсного создания тонкого цилиндрического облака можно выделить три основных элемента. Ключевым элементом является быстрый импульсный клапан, через который осуществляется инжекция газа в вакуумный объем установки. В экспериментах на установке ГОЛ-ПЭТ используется импульсный электромагнитный клапан фирмы Festo. На входе клапана необходимо поддерживать заданную величину давления напускаемого газа. Это достигается работой схемы подачи газа, которая включает баллон высокого давления

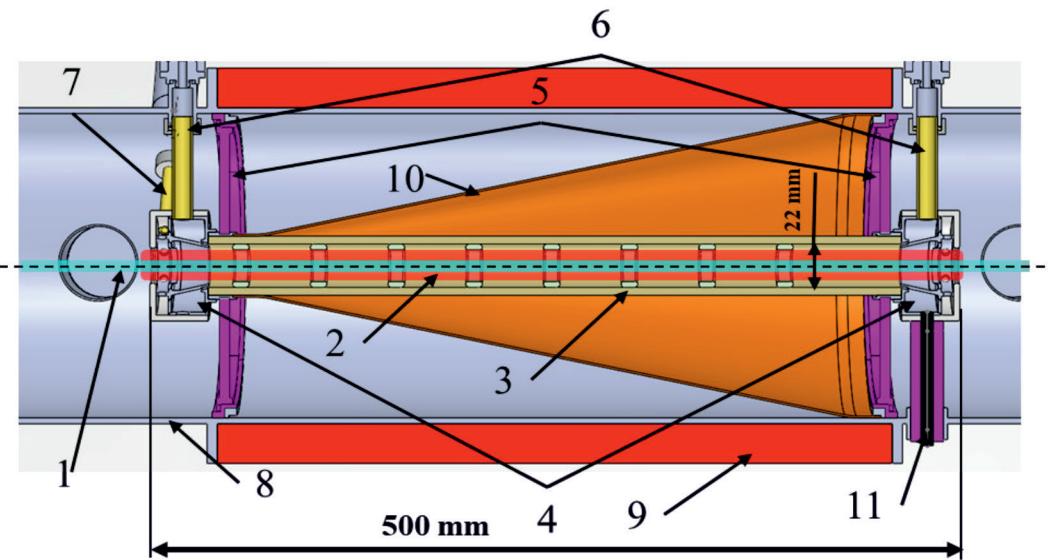


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры пучково-плазменного генератора ЛИУ-ПЭТ: 1 – РЭП, поступающий от ЛИУ в условиях его сжатия до Ø10–12 мм; 2 – плазменный шнур диаметром 16 мм; 3 – кварцевая трубка, ограничивающая диаметр газового шнура из водорода; 4 – два коаксиальных сопла для инъекции водорода в кварцевую трубку; 5 – диэлектрические перегородки для фиксации кварцевой трубки; 6 – трубы подачи водорода к соплам от импульсных клапанов; 7 – трубка для подачи криптона; 8 – стальная вакуумная камера; 9 – соленоид; 10 – медный конус для подключения заземляемого кольцевого электрода; 11 – подвод высокого напряжения на потенциальный кольцевой электрод.

Fig. 1. Scheme of the gas-discharge chamber of the beam-plasma generator LIA-PET: 1 – REB coming from the LIA under conditions of its compression to Ø10–12 mm; 2 – plasma cord with a diameter of 16 mm; 3 – quartz tube limiting the diameter of the hydrogen gas cord; 4 – two coaxial nozzles for injecting hydrogen into the quartz tube; 5 – dielectric partitions for fixing the quartz tube; 6 – tubes for supplying hydrogen to the nozzles from pulse valves; 7 – tube for supplying krypton; 8 – stainless steel vacuum chamber; 9 – solenoid; 10 – copper cone for connecting the grounded ring electrode; 11 – high voltage supply for the potential ring electrode

для хранения запаса газа, промежуточный объем на входе в клапан и редуктор, который задает требуемый перепад давления между баллоном и промежуточным объемом. Потоки газа, инжектируемые через импульсные клапаны, распространяются до торцов кварцевой трубы по металлическим трубкам с внутренним диаметром 6 мм и протяженностью около 100 мм. Это распространение газа при импульсной работе клапанов и моделировалось в ходе компьютерных расчетов.

Следует отметить, что использование ЛИУ в качестве исходного источника килоамперного РЭП требует поддержания остаточного вакуума за пределами секции высоковольтного плазменного разряда на уровне 10^{-7} Па (10^{-9} торр.). В этих условиях необходимо максимально понижать количество газа, инжектируемого через импульсные клапаны в вакуумный объем. При этом в плазменном шнуре, создаваемом в кварцевой трубке, требуется обеспечить концентрацию плазмы в интервале от $2 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Этим несколько противоречивым требованиям должна удовлетворять система импульсного напуска газа в вакуумную полость кварцевой трубы, где осуществляется высоковольтный разряд, создающий плазменный шнур.

Напомним, что размеры пространственной области, где с помощью высоковольтного разряда создается плазменный шнур, определяются внутренним диаметром кварцевой трубы (22 мм) и ее длиной (330 мм). Диаметр проходящего по шннуру пучка релятивистских электронов должен не превышать 12 мм, а диаметр плазменного шнура, который задается диафрагмами, имеет величину 16 мм. На торцах используемой кварцевой трубы располагаются высоковольтные электроды, обеспечивающие протекание разрядного тока по этому шннуру, масштаба 10 кА. Для обеспечения требуемых условий формирования высоковольтного плазменного раз-

ряда система напуска газа будет работать следующим образом. Инжекция потоков газа осуществляется с двух концов трубы навстречу друг другу через аксиально симметричные сопла, в которых смонтированы указанные электроды. До этих сопел потоки газа распространяются от клапанов по специальным трубкам диаметром 6 мм. Истечение газа из сопел должно формировать однородное по азимуту распределение газа. В представленной геометрии импульсной подачи газа в трубку должно достигаться минимальное его поступление в остальное пространство, где поддерживается высокий вакуум за счет интенсивной откачки. Именно эта геометрия импульсного напуска газа была положена в модельные расчеты заполнения газом протяженной кварцевой трубы, предназначеннной для осуществления высоковольтного разряда.

2. Темп напуска газа через импульсный клапан, использованный при проведении расчетов

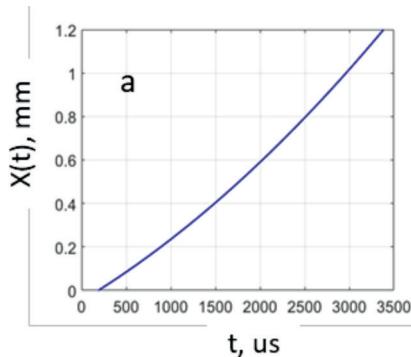
Проводимые модельные расчеты в рамках газовой динамики призваны характеризовать зависимости параметров протяженного газового облака (характерное время заполнения газом трубы, достигаемая концентрация, однородность по сечению и длине) от геометрических размеров системы импульсной подачи газа, параметров работы клапана, включая время открывания, и давление газа в промежуточном объеме на его входе.

Для выбора конкретного решения по реализации рассматриваемого нами подхода была создана трехмерная компьютерная модель плазменной секции. По результатам проведения моделирования необходимо было описать динамику изменения во времени распределения плотности газа по длине газоразрядной трубы. В процессе моделирования прослеживалась динамика распространения газа от импульсных клапанов по подводящим трубкам к кольцевым щелевым соплам, расположенным по концам трубы, и далее внутри кварцевой газоразрядной трубы (см. рис. 1). При этом важным элементом системы импульсного напуска газа является собственно импульсный клапан, который не отображен на этом рисунке.

В рассматриваемой схеме напуска газа для установки ЛИУ-ПЭТ, которая аналогична той, что реализована на установке ГОЛ-ПЭТ, будет применен импульсный электромагнитный клапан FESTO MH-1. Управление клапаном осуществляется путем пропускания тока через катушку соленоида. Возбуждаемое таким образом магнитное поле втягивает в полость катушки шток, выполненный из магнитного материала. Этот шток, исходно запирающий отверстие клапана, предназначенное для пропускания газа, при втягивании в полость катушки открывает это отверстие, обеспечивая прохождение газа через клапан. Важной характеристикой клапана является скорость поступления газа при его открытом состоянии. Отметим, что данная характеристика клапана зависит прежде всего от перепада давления на входе и выходе клапана. Для корректного учета расхода газа через клапан были проведены измерения такого смещения штока при импульсном включении тока в катушке с фронтом нарастания ~ 100 мкс. График зависимости смещения штока от времени с момента начала подачи тока в электромагнит приведен на рис. 2. Для аналитического описания зависимости смещения поршня от времени до момента его максимального смещения (момент времени 3.2 мс), приведенной на графике, можно использовать аналитическое выражение следующего вида:

$$x(t) = A + B \cdot t + C \cdot t^2, \quad (1)$$

где $A = -0,016 \pm 0,001$ мм, $B = (8,23 \pm 0,01) \cdot 10^{-2}$ мм/мс и $C = (1,20 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$ мм/мс².



Rис. 2. Зависимость смещения штока от времени
Fig. 2. Dependence of the piston rod displacement on time

В свою очередь, при подготовке к проведению моделирования распространения газа в вакуумной камере была проведена серия предварительных расчетов по определению количества молекул водорода, выходящих через сечение клапана, когда клапан находится в полностью открытом состоянии при двух значениях давления газа на его входе. Результаты этих расчетов приведены в табл. 1, где в правом столбце приведено количество молекул водорода NH₂, прошедших через клапан за время 1 мс.

Таблица 1

Результат расчета расхода газа при работе клапана

Table 1

Result of the calculation of gas consumption during valve operation

№ расчета	Давление на входе, Па	Давление на выходе, Па	N _{max} , кг/с·м ²
1	101325	1,3332e-05	58,4
2	10132,5	1.3332e-05	5,74

В дальнейшем, в расчетах зависимость смещения клапана от времени принималась линейной: коэффициенты A и C равны нулю, поскольку A характеризует задержку между моментом подачи тока и началом открытия клапана, а C в связи с его малостью. Нормировка расхода газа при частичном открытии клапана осуществлялась в соответствии с пространственным смещением запорного поршня клапана в приближении, даваемом следующим выражением:

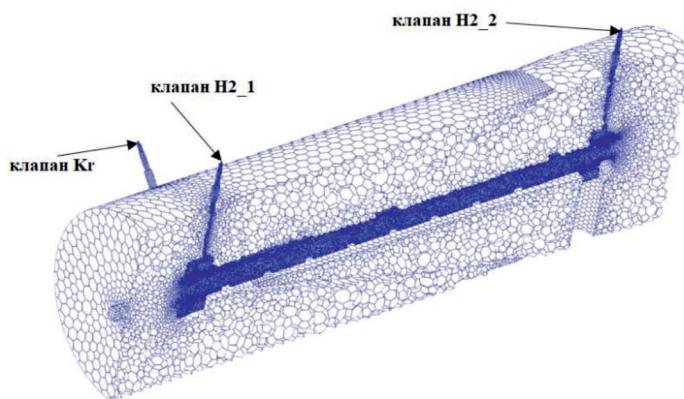
$$N(P,t) = N_{\max}(P) \cdot x(t)x_{\max}. \quad (2)$$

3. Расчеты пространственно-временной динамики распространения газа при заполнении трубы

Расчеты пространственно-временного распределения концентрации водорода при различных режимах заполнения области локализации высоковольтного разряда проводились в трехмерной геометрии. Решалась система уравнений газодинамики с учетом процессов теплопроводности и вязкости, замкнутая уравнением состояния идеального газа. В силу малой длительности процесса в расчетах не учитывался теплообмен между газом и стенками кварцевой трубы.

Для численного решения системы уравнений использовался метод конечных объемов. Расчетные элементы – произвольные выпуклые многогранники. Для более детального описания особенностей геометрии применялось локальное измельчение расчетных элементов. Пример сеточной модели представлен на рис. 3.

В качестве начальных условий задавались давление в вакуумной камере 10^{-5} Па, давление в ресивере (на входе клапана) P_p и температура в системе 273 К. На всех границах расчетной области задавалось условие непроницаемой стенки, кроме границ, моделирующих клапан, на которых задавался расход газа.



*Рис. 3. Пример сеточной модели
Fig. 3. Example of a grid model*

Результаты расчетов для различных режимов инжекции газа в виде средней по объему кварцевой трубы концентрации водорода $\langle n \rangle$ и ее неоднородности $\frac{|n_{\max} - \langle n \rangle|}{\langle n \rangle}$ на момент прекращения подачи водорода представлены в табл. 2. В варианте 1 рассматривался режим инжекции, когда в ресивере находится водород с начальным давлением, равным 1 атм, а время инжекции газа составляет 1 мс.

Таблица 2

Результаты расчетов для различных режимов инжекции газа

Table 2

Calculation results for different gas injection modes

№ расчета	Давление в ресивере P , атм.	Время инжекции газа t_i , мс	Средняя концентрация водорода $\langle n \rangle$, см^{-3}	Неоднородность концентрации $\frac{ n_{\max} - \langle n \rangle }{\langle n \rangle}$, %
1	1	1	$7 \cdot 10^{16}$	42
2	0,1	2	$6,5 \cdot 10^{15}$	50
3	0,1	1	$2,7 \cdot 10^{15}$	55
4	0,1	0,5	$1,1 \cdot 10^{15}$	45
5	0,1	0,8	$1,93 \cdot 10^{15}$	56
6	0,1	0,8	$1,9 \cdot 10^{15}$	57

В варианте 1 рассматривался режим инжекции, когда в ресивере находится водород с начальным давлением, равным 1 атм, а время инжекции газа составляет 1 мс. Полученное значение средней концентрации водорода превышает требуемое ($2 - 3 \cdot 10^{15}$) на два порядка, поэтому в последующих вариантах давление в ресивере было уменьшено до 0,1 атм. Варьирование времени инжекции газа (варианты 2–5) показало, что наиболее приемлемым режимом является вариант 5 с $t_i = 0,8$ мс. Зависимость от времени подачи водорода в трубку для этого варианта инжекции газа показана на рис. 4, *a*. Для уменьшения вытекания водорода через торцы кварцевой трубы дополнительно к варианту 5 был рассмотрен вариант 6, в котором предусматривается подача тяжелого газа – криптона в область вакуумной камеры вне газоразрядной трубы в окрестности ее торца. Динамика подачи газов через импульсные клапаны для этого варианта 6, когда поступление водорода в полость трубы сопровождается одновременной подачей криптона в окрестность, представлена на рис. 4, *б*.

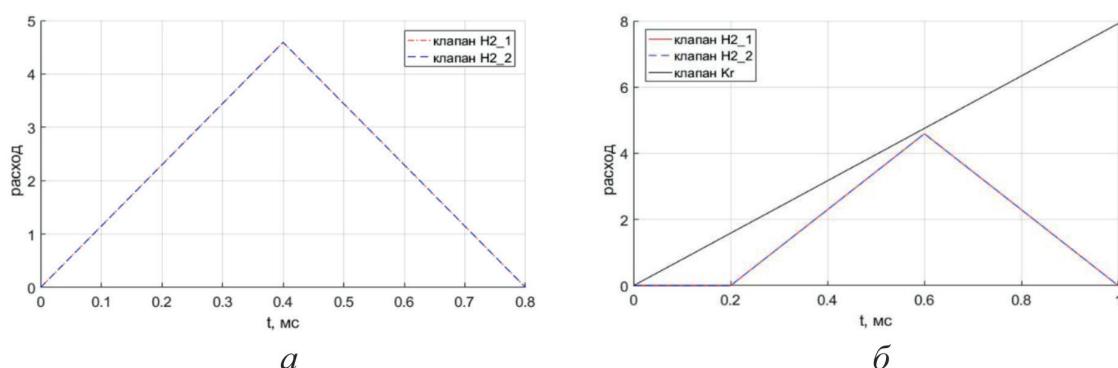


Рис. 4. Зависимости расхода газа (кг/с·м²) от времени для вариантов 5 (а) и 6 (б)

Fig. 4. Gas consumption (kg/s·m²) versus time for options 5 (a) and 6 (b)

Пространственные распределения концентрации водорода в полости трубы на момент закрытия клапанов по варианту 5 представлены на рис. 5. Из представленной картины распределения концентрации водорода видно, что на момент времени 0,8 мс от начала процесса открывания клапанов, когда уже завершилось их закрывание, инжектируемые из противоположных щелевых сопел потоки водорода только достигли середины трубы. Распределение концентраций водорода по оси трубы для этого момента времени представлены на рис. 6. Из представленного на рисунке распределения концентрации водорода видно, что в средней по длине области трубы величина концентрации водорода в 2,5 раза ниже, чем ее максимальная величина, локализованная у ее концов.

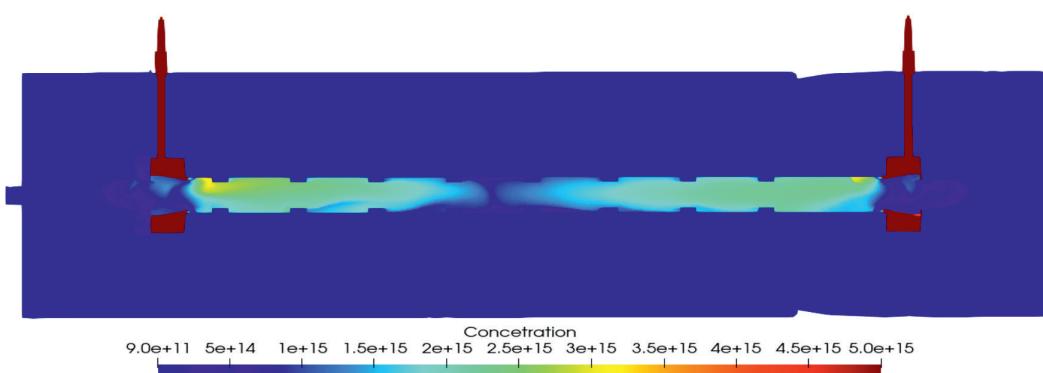


Рис. 5. Распределение концентрации водорода в варианте 5 на момент закрытия клапанов водорода (0,8 мс)

Из этого следует, что для достижения однородного распределения концентрации требуется дополнительное время, и масштаб этого времени определился в расчетах, проведенных для последующих моментов времени.

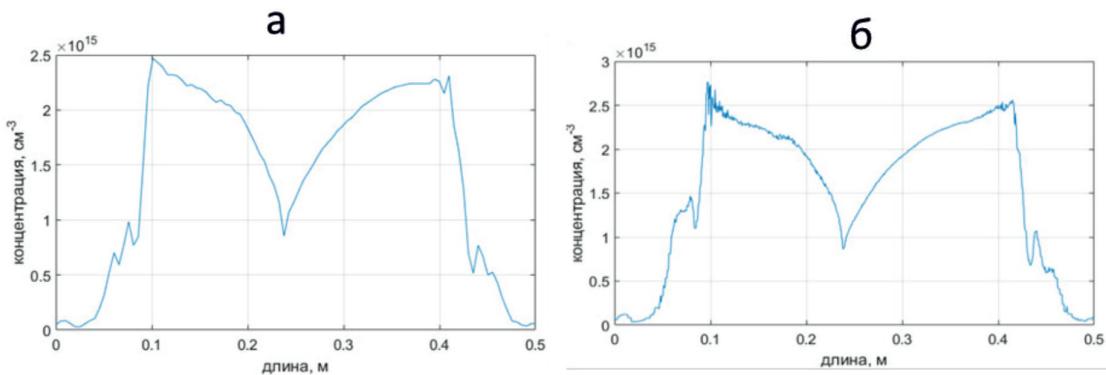


Рис. 6. Распределение концентрации водорода в момент окончания подачи газа для двух вариантов напусков газов: *а* – вариант 5 без подачи криптона; *б* – вариант 6 с импульсной подачей криптона в торец трубы со стороны, где в трубку инжектируется РЭП

Fig. 6. Distribution of hydrogen concentration at the end of gas supply for two gas injection options: *a* – option 5 without krypton supply; *b* – option 6 with pulsed krypton supply to the end of the tube from the side where the REP is injected into the tube.

В этих расчетах, которые обозначены как вариант 7, импульсная подача водорода и криптона осуществлялись только с одного конца трубы, именного того, через который пучок инжектируется в плазменный шнур. Как демонстрирует динамика срабатывания клапанов, представленная на рис. 7, *а*, вначале осуществляется подача криптона, а затем с задержкой 0,5 мс начинается подача водорода. Распределения водорода вдоль оси трубы для этого варианта в различные моменты времени представлены на рис. 7, *б*.

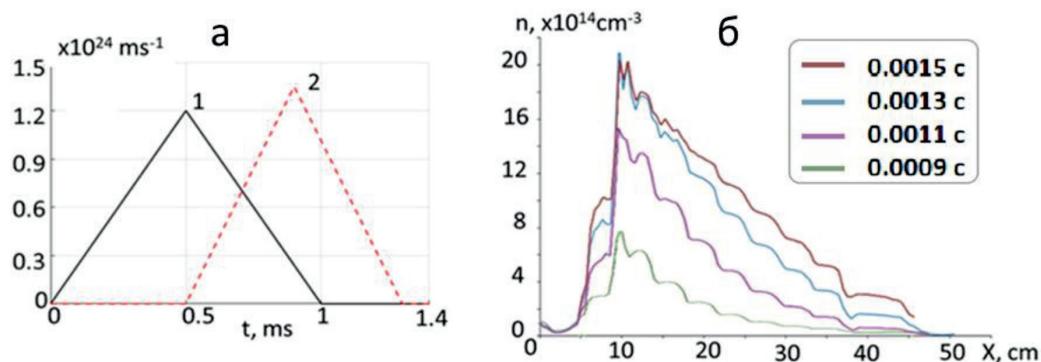


Рис. 7. Зависимость расхода газа от времени через криптоновый клапан (зеленая линия под цифрой 1) и водорода (красная штриховая линия под цифрой 2) (а). Распределение концентрации газа по оси трубы в различные моменты времени, которые перечислены в квадратной вставке (б)

Fig. 7. Dependence of gas flow rate on time through the krypton valve (green line under number 1) and hydrogen (red dashed line under number 2) (a). Distribution of gas concentration along the tube axis at different moments of time, which are listed in the square inset (b)

Характерный спад на левой границе распределения, именно на торце кварцевой трубы, где должен входить релятивистский электронный пучок, задается геометрией коаксиального

сопла, обеспечивающей направление движение потока водорода именно в полость кварцевой трубы. Нарастание концентрации водорода происходит в течение 1,3 мс, что соответствует завершению открытого состояния клапана. В течение 0,2 мс после окончания подачи водорода максимальная концентрация водорода вблизи торца трубы ($X = 0,1$ м) практически не изменяется, после чего происходит выравнивание концентрации по длине кварцевой трубы. «Волнообразный» характер изменения концентрации вдоль оси кварцевой трубы можно объяснить наличием набора диафрагм, расположенных по ее длине.

Из представленных в табл. 2 и рис. 4–6 результатов расчетов видно, что режим подачи водорода через трубы к соплам слабо влияет на распределение его концентрации в кварцевой трубке, средние и максимальные значения которой в основном определяются суммарной массой поданного от клапанов водорода. Величина средней по сечению шнуря концентрации водорода на момент закрытия клапанов в представленных вариантах расчетов удовлетворяет требуемому интервалу значений $(2\text{--}3)\cdot10^{15}$ см $^{-3}$, но неоднородность распределения концентрации нейтрального водорода оказалась масштаба 30 %, что не удовлетворяет требованию по этому параметру.

Особенностью расчетных распределений концентрации водорода для всех рассмотренных вариантов является резкий «провал» в центре кварцевой трубы. Этот результат может объясняться следующими факторами. В проведенных расчетах количество поступающего через клапаны газа характеризуется его суммарной массой $\sim 3\cdot10^{-8}$ г. При таком малом количестве поступившего газа в проведенных расчетах наблюдалась высокая (~ 1200 К) температура вещества именно в центральной по длине части трубы, что является следствием газодинамического процесса распространения ударной волны в результате распада произвольного разрыва в его начальный момент времени. В реальности ограничения на такой рост температуры могут быть связаны с процессами, которые не учитывались в расчетах (термодиффузия, тепловое излучение). Для прояснения возможности влияния этих процессов были проведены дополнительные расчеты в условиях принудительного ограничения на максимальную температуру газа. Результаты этих расчетов представлены на рис. 8 и в табл. 3.

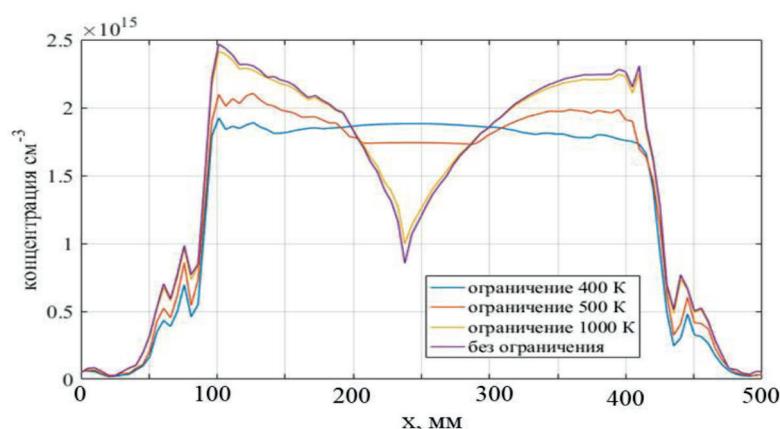


Рис. 8. Распределение концентрации водорода вдоль центральной оси трубы при разной величине ограничения на максимальную температуру газа

Fig. 8. Distribution of hydrogen concentration along the central axis of the tube for different values of the maximum gas temperature limitation

Из представленных на рисунке распределений концентрации видно, что если в газовой среде будут реализовываться процессы и условия, ограничивающие ее температуру на уровне 500 К, то это обеспечит необходимую низкую (в пределах 15 %) неоднородность в распределении концентрации водорода по длине кварцевой трубы.

Таблица 3

Результаты вычисления неоднородности распределения водорода при разной величине ограничения на максимальную температуру газа

Table 3

Results of calculating the heterogeneity of hydrogen distribution for different values of the limitation on the maximum gas temperature

Максимальная температура, К	Средняя концентрация, см^{-3}	Неоднородность концентрации, %
400	$1,83 \cdot 10^{15}$	5
500	$1,88 \cdot 10^{15}$	12
1000	$1,94 \cdot 10^{15}$	48
без ограничения	$1,93 \cdot 10^{15}$	56

Заключение

Проведено численное решение системы уравнений газодинамики применительно к моделированию динамики импульсного заполнения водородом вакуумированной полости протяженной трубы (внутренний диаметр 20 мм, длина 40 см) при инжекции двух потоков этого газа встречно друг другу через сопла, установленные на ее концах. Сформированное таким образом в ограниченном пространстве газовое облако должно послужить основой для создания высоковольтным разрядом тонкого плазменного шнура, что наложило определенные ограничения на распределение концентрации газа в ней. Компьютерные расчеты динамики заполнения трубы газом, проведенные для различных режимов подачи газа через импульсные клапаны, позволили прийти к следующим выводам.

- Концентрация водорода в полости трубы, которая формирует протяженное газовое облако, задается массой поданного в нее через клапаны газа и слабо (в пределах 10 %) зависит от временной динамики процессов открывания и закрывания используемых клапанов.
- Формирование дополнительного облака на конце трубы из тяжелого газа криптона блокирует вытекание из нее водорода, но не вызывает в ней значительных изменений в распределении концентрации водорода.
- Для обеспечения требуемого значения средней концентрации молекулярного водорода $(2-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в трубке необходимо подать в нее через импульсные клапаны суммарно (4–6) г этого газа в течение времени (1,5–2 мс).
- Расчеты показали, что при учете выноса энергии из области встречи двух потоков, который должен обеспечить ограничение температуры газа и, следовательно, повышение его давления в этой части формируемого газового шнура, удается достигнуть снижения неоднородности в вычисленном распределении концентрации водорода до требуемого ($\sim 15\%$) уровня. Для обеспечения ограничения температуры газа в этой локальной области при решении системы уравнений газодинамики, по нашему мнению, следует учитывать вынос энергии из нее тепловым излучением.

Таким образом, по результатам компьютерного моделирования продемонстрировано, что при наполнении протяженной трубы водородом, инжектируемым в нее через сопла, необходимое распределение концентрации газа в ней достигается за время $\sim 1,5$ мс, что удов-

летворяет требованиям по зажиганию высоковольтного разряда для создания плазменного шнуря.

Список литературы

1. Arzhannikov V., Burdakov A. V., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A., Makarov M. A., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitsky S. L., Sklyarov V. F., Stepanov V. D., Sulyaev Yu. S., Thumm M. K. A., Vyacheslavov L. N. Subterahertz generation by strong langmuir turbulence at two-stream instability of high current 1-MeV REBs // Vestnik Novosibirsk State University. Series: Phys. 2010. Vol. 5 (4). P. 44–49. DOI: 10.54362/1818-7919-2010-5-4-44-49
2. Arzhannikov A. V., Timofeev I. V. Generation of powerful terahertz emission in a beam-driven strong plasma turbulence // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2012. Vol. 54 (10). P. 105004. DOI: 10.1088/0741-3335/54/10/105004
3. Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Popov S. S., Timofeev I. V., Samtsov D. A., Sandalov E. S., Kalinin P. V., Kuklin K. N., Makarov M. A., Rovenskikh A. F., Stepanov V. D., Annenkov V. V., Glinsky V. V. Energy Content and Spectral Composition of a Submillimeter Radiation Flux Generated by a High-Current Electron Beam in a Plasma Column With Density Gradients // IEEE Transactions on Plasma Science. 2022. Vol. 50, no. 8. P. 2348–2363. DOI: 10.1109/TPS.2022.3183629
4. Аржанников А. В., Синицкий С. Л., Самцов Д. А., Тимофеев И. В., Сандалов Е. С., Попов С. С., Атлуханов М. Г., Макаров М. А., Калинин П. В., Куклин К. Н., Ровенских А. Ф., Степанов В. Д. Частотный спектр и энергосодержание в импульсном потоке терагерцевого излучения, генерируемом РЭП в плазменном столбе с различными распределениями плотности // Физика плазмы. 2024. Т. 50, № 3. С. 293–305. DOI: 10.31857/S0367292124030042
5. Аржанников А. В., Бурдаков А. В., Дейчули П. П., Койдан В. С., Конюхов В. В., Меклер К. И., Рогозин А. И. Увеличение эффективности взаимодействия сильноточного релятивистского электронного пучка с плазмой // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 27, вып. 3. С. 173–176.
6. Аржанников А. В., Бурдаков А. В., Бурмасов В. С., Иванов И. А., Кузнецов С. А., Куклин К. Н., Меклер К. И., Полосаткин С. В., Поступаев В. В., Ровенских А. Ф., Синицкий С. Л., Скляров В. Ф. Плазменная система установки ГОЛ-3Т // Физика плазмы. 2015. Т. 41, № 11. С. 935–945. DOI: 10.7868/S0367292115110013
7. Arzhannikov A. V., Ivanov I. A., Kalinin P. V., Kasatov A. A., Makarov M. A., Mekler K. I., Rovenskikh A. F., Samtsov D. A., Sandalov E. S., Sinitsky S. L. Creation of plasma column with different density gradients to generate terahertz radiation during beam-plasma interaction // Journal of Physics: Conf. Ser. IOP Publishing. 2020. Т. 1647, № 1. С. 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/1647/1/012011
8. Timofeev I. V., Annenkov V. V., Arzhannikov A. V. Regimes of enhanced electromagnetic emission in beam-plasma interactions // Physics of Plasmas. 2015. Т. 22, № 11. С. 113109. DOI: 10.1063/1.4935890
9. Аржанников А. В., Тимофеев И. В. Интенсивное пучково-плазменное взаимодействие как источник субмиллиметрового излучения // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 4. С. 78–104. DOI: 10.54362/1818-7919-2016-11-4-78-104
10. Аржанников А. В., Синицкий С. Л., Старostenко Д. А., Логачев П. В., Бак П. А., Никифоров Д. А., Попов С. С., Калинин П. В., Самцов Д. А., Сандалов Е. С., Атлуханов М. Г., Григорьев А. Н., Воробьев С. О., Петров Д. В., Протас Р. В. Пучково-плазменный генератор ТГц-излучения на основе индукционного ускорителя (проект

ЛИУ-ПЭТ) // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 1. С. 28–42. DOI: 10.2541-9447-2023-18-1-28-42

References

1. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A., Makarov M. A., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitsky S. L., Sklyarov V. F., Stepanov V. D., Sulyaev Yu. S., Thumm M. K. A., Vyacheslavov L. N. Subterahertz generation by strong langmuir turbulence at two-stream instability of high current 1-MeV REBs. *Vestnik Novosibirsk State University. Series: Phys.*, 2010, vol. 5(4), pp. 44–49, doi: 10.54362/1818-7919-2010-5-4-44-49
2. Arzhannikov A. V., Timofeev I. V. Generation of powerful terahertz emission in a beam-driven strong plasma turbulence. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2012, vol. 54(10), p. 105004, doi: 10.1088/0741-3335/54/10/105004
3. Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Popov S. S., Timofeev I. V., Samtsov D. A., Sandalov E. S., Kalinin P. V., Kuklin K. N., Makarov M. A., Rovenskikh A. F., Stepanov V. D., Annenkov V. V., Glinsky V. V., Energy Content and Spectral Composition of a Submillimeter Radiation Flux Generated by a High-Current Electron Beam in a Plasma Column With Density Gradients. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2022, vol. 50, no. 8, pp. 2348–2363, doi: 10.1109/TPS.2022.3183629
4. Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Samtsov D. A., Timofeev I. V., Sandalov E. S., Popov S. S., Atlukhanov M. G., Makarov M. A., Kalinin P. V., Kuklin K. N., Rovenskikh A. F., Stepanov V. D., The Frequency Spectrum and Energy Content in a Pulse Flux of Terahertz Radiation Generated by a Relativistic Electron Beam in a Plasma Column with Different Density Distributions. *Plasma Phys. Rep.*, 2024, vol. 50, no. 3, pp. 331–341, doi: 10.1134/S1063780X24600051
5. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Deychuli P. P., Koidan V. S., Konyukhov V. V., Meckler K. I., Increasing the interaction efficiency of a high-current relativistic electron beam with plasma. *Letters to JETP*, 1978, vol. 27, iss. 3, pp. 173–176. (in Russ.)
6. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Ivanov I. A., Kuznetsov S. A., Kuklin K. N., Mekler K. I., Polosatkin S. V., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitsky S. L., Sklyarov V. F. Plasma system of the GOL-3T facility. *Plasma Phys. Rep.*, 2015, vol. 41, no. 11, pp. 863–872, doi: 10.1134/S1063780X1511001X
7. Arzhannikov A. V., Ivanov I. A., Kalinin P. V., Kasatov A. A., Makarov M. A., Mekler K. I., Rovenskikh A. F., Samtsov D. A., Sandalov E. S., Sinitsky S. L. Creation of plasma column with different density gradients to generate terahertz radiation during beam-plasma interaction. *Journal of Physics: Conf. Ser.*, IOP Publishing, 2020, vol. 1647, no. 1, p. 012011, doi: 10.1088/1742-6596/1647/1/012011
8. Timofeev I. V., Annenkov V. V., Arzhannikov A. V. Regimes of enhanced electromagnetic emission in beam-plasma interactions. *Physics of Plasmas*, 2015, vol. 22, no. 11, p. 113109, doi: 10.1063/1.4935890
9. Arzhannikov A. V., Timofeev I. V. Intense Beam-Plasma Interaction As A Source Of Sub-Millimeter Radiation. *Bulletin of NSU. Series: Physics*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 78–104, doi: 10.54362/1818-7919-2016-11-4-78-104
10. Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Starostenko D. F., Logachev P. V., Bak P. A., Nikiforov D. A., Popov S. S., Kalinin P. V., Samtsov D. A., Sandalov E. S., Atlukhanov M. G., Grigoriev A. N., Vorobyov S. O., Petrov D. V., Protas R. V. Beam-Plasma Generator of the THz Radiation Based on an Induction Accelerator (LIA-PET Project). *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 28–42, doi: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2023-18-1-28-42> (in Russ.)

Сведения об авторах

Аржанников Андрей Васильевич, главный научный сотрудник
Самцов Денис Алексеевич, старший научный сотрудник
Синицкий Станислав Леонидович, старший научный сотрудник
Старostenко Дмитрий Анатольевич, научный сотрудник
Хмельницкий Дмитрий Владимирович, доктор физико-математических наук
Ганеева Диляра Фуатовна, младший научный сотрудник
Мастюк Дмитрий Александрович, младший научный сотрудник
Протас Роман Викторович, кандидат технических наук
Петров Дмитрий Витальевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Information about the Authors

Andrey V. Arzhannikov, Chief Researcher
Denis A. Samtsov, Senior Researcher
Stanislav L. Sinitsky, Senior Researcher
Dmitry A. Starostenko, Researcher
Dmitry V. Khmelnitsky, Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Dilyara F. Ganeeva, Junior Researcher
Dmitry A. Mastyuk, Junior Researcher
Roman V. Protas, PhD in Engineering
Dmitry V. Petrov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences

*Статья поступила в редакцию 10.06.2025;
одобрена после рецензирования 21.06.2025; принята к публикации 25.06.2025*

*The article was submitted 10.06.2025;
approved after reviewing 21.06.2025; accepted for publication 25.06.2025*