

03

Динамика импульсного заполнения газом протяженной цилиндрической трубки

© А.В. Аржанников,¹ Д.А. Самцов,¹ С.Л. Синицкий,¹ Д.А. Старостенко,¹ М.А. Макаров,¹
А.Н. Григорьев,² Н.А. Лубенченко²

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

²Российский федеральный ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина,
456770 Снежинск, Челябинская обл., Россия
e-mail: A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 12 мая 2025 г.

В окончательной редакции 26 июня 2025 г.

Принято к публикации 7 июля 2025 г.

На основе пакета программ FlowVision в рамках Модели Навье—Стокса решена задача о заполнении водородом вакуумной полости протяженной цилиндрической трубки при кратковременной подаче газа через ее оба торца от управляемых импульсных клапанов. Формируемое в трубке газовое облако предназначено для создания в ней тонкого плазменного шнура путем высоковольтного разряда, что наложило требования на процесс заполнения. Описана процедура решения задачи и представлены результаты расчетов. Приведена картина пространственно-временной динамики потоков водорода, инжектируемых с торцов трубки через коаксиальные щелевые сопла навстречу друг другу. Показаны результаты измерений динамики по распространению потоков водорода по длинной трубке в геометрии, аналогичной использованной в расчетах. Проведено сопоставление результатов компьютерных расчетов с результатами измерений.

Ключевые слова: плазма, плазменный шнур, разряд в трубке, импульсное заполнение, терагерцовое излучение.

DOI: 10.61011/JTF.2026.03.62528.114-25

Введение

Электромагнитное излучение терагерцового (THz) диапазона частот (0.1–10 THz) активно применяется при решении широкого круга задач в научно-инженерной области и различных практических сферах. В качестве примеров его использования можно отметить следующие: нагрев плазмы при термоядерных исследованиях, обнаружение и визуализация скрытых объектов, исследование спектральных характеристик материалов и воздействие на них в соответствующей частотной области спектра, регистрация быстропротекающих процессов. С позиции возможности генерации потоков THz-излучения и регистрации спектральных характеристик объектов в указанном диапазоне частот, наименее освоенным спектральным интервалом в настоящее время остается интервал частот 0.3–1 THz. Один из подходов к решению проблемы генерации мощных потоков излучения в этом интервале частот заключается в использовании эмиссии из плазмы электромагнитных волн, получаемых в результате трансформации электронной плазменной волны, которая накачивается сильноточным релятивистским электронным пучком (РЭП). Экспериментальные исследования в этом направлении были начаты в ИЯФ СО РАН на установке ГОЛ-3 в 2010 г. [1] и в настоящее время проводятся на установке ГОЛ-ПЭТ [2]. В этих экспериментах используется плазма с

минимальным зарядовым состоянием ионов с тем, чтобы достигнуть высокого уровня плазменных колебаний, накачиваемых пучком релятивистских электронов. В связи с этим исходным газом для приготовления плазмы служит водород. Экспериментальные исследования на установке ГОЛ-ПЭТ показали, что спектральный состав потока, генерируемого в замагниченном плазменном столбе, охватывает диапазон частот 0.1–0.5 THz, а максимум спектральной плотности мощности локализован вблизи верхне-гибридной частоты 0.15–0.25 THz [3]. Длительность импульса составляет до 4 μs, полная энергия в импульсе — до 10 J [4]. Поток излучения, выведенный из вакуума в атмосферу, имеет угловую расходимость менее 10° и распространяется на расстояние в несколько метров [5]. Указанный частотный интервал в потоке излучения, генерируемом на установке ГОЛ-ПЭТ, обеспечивается инжекцией РЭП с плотностью тока 1–2 КА/см² в плазменный столб с концентрацией электронов $(5–7) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (см. [3,4]). Создание этого плазменного столба с отмеченной величиной концентрации электронов осуществлялось импульсным высоковольтным разрядом на основе опыта, накопленного в течение многолетних экспериментальных исследований [6–9].

Достигнутые в экспериментах на установке ГОЛ-ПЭТ результаты в совокупности с теоретическими исследованиями трансформации верхне-гибридных коле-

баний плазмы [10–12] позволили обеспечить глубокое понимание механизмов генерации излучения в пучково-плазменной системе, и на основе этого сформулировать путь перехода к генерации в такой системе потоков излучения в интервале частот 0.5–1 THz [13]. Для перехода в указанный частотный интервал необходимо обеспечить уровень концентрации плазмы $(5–7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и величину плотности тока пучка, проходящего по ней, масштаба $(10–15) \text{ КА/см}^2$ в условиях угловой расходимости его электронов менее 0.1 rad. Пучок электронов, удовлетворяющий этим требованиям, может быть получен при помощи линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) [14], созданного при сотрудничестве ИЯФ и ВНИИТФ. Проект пучково-плазменного генератора с использованием этого пучка под названием ЛИУ-ПЭТ был сформулирован в работе [13]. Возможность сжатия сечения пучка, генерируемого в ЛИУ, до указанной плотности тока уже продемонстрирована [15]. Одно из препятствий к реализации проекта ЛИУ-ПЭТ состоит в том, что в линейном индукционном ускорителе эмиссия электронов в ускорительном диоде осуществляется с поверхности накаливаемого катода, которая не допускает даже малых воздействий со стороны остаточных газов в высоковакуумном объеме ускорителя. По этой причине создание плазменного шнура с указанной выше концентрацией плазмы требует особых подходов в заполнении газом газоразрядного промежутка. Это заполнение должно осуществляться за минимальный временной интервал и таким образом, чтобы газ, поступивший через быстрые импульсные клапаны, не смог достичь диода ускорителя. Решение задачи по быстрому заполнению водородом разрядного промежутка, который представляет собой протяженную трубку из диэлектрического материала, и составляет содержание данного текста.

Вообще говоря, инженерно-техническая задача заполнения газом определенной пространственной области в вакуумной камере установки возникает довольно часто при постановке экспериментов по физике пучков и физике плазмы. В качестве примера можно указать на работу [16], в которой изложены результаты экспериментальных исследований различных газовых мишеней для использования в источнике точечной плазмы на основе разряда в неоднородном потоке газа. Но теоретическое рассмотрение задачи по заполнению конкретной области пространства при импульсной инжекции в нее газа встречает значительные трудности [17–20]. В этом отношении задача по импульсному заполнению газом протяженной трубки, внутри которой до начала инжекции газа поддерживался вакуум, в значительной степени зависит от геометрии задачи.

В рамках настоящей работы рассмотрена задача о быстром импульсном заполнении нейтральным газом вакуумного объема, ограниченного длинной цилиндрической трубкой. Решение задачи проведено для конкретной геометрии, которая приемлема для инициирования высоковольтного разряда применительно к созданию

плазменного шнура с параметрами, подходящими для инжекции в него РЭП с плотностью тока масштаба 10 КА/см^2 . Цель этих расчетов — найти оптимальные условия для инжекции газа в трубку через импульсные клапаны, при которых достигается необходимая однородность распределения концентрации газа по длине и сечению трубки. В разд. 1 настоящей работы дано краткое описание геометрии системы импульсного высоковольтного разряда и сформулированы требования к системе импульсной подачи газа в этот разрядный промежуток. Далее приведены картины динамики заполнения газом вакуумной полости внутри длинной кварцевой трубки, полученные в варианте компьютерного моделирования процесса распространения потоков газа с использованием пакета FlowVision в рамках модели Навье—Стокса. В последующем разделе приведены результаты измерений распространения потоков водорода по длинной вакуумной трубке в формирователе высоковольтного разряда установки ГОЛ-ПЭТ, особенности реализации которого призваны соответствовать требованиям к плазменному шнуру в будущей установке ЛИУ-ПЭТ. В Заключение обобщены установленные закономерности импульсного заполнения нейтральным газом вакуумной полости внутри трубки, где необходимо осуществить высоковольтный разряд применительно к достижению необходимых параметров плазменного шнура.

1. Геометрия пространства для импульсного заполнения газом

В экспериментах по генерации потоков THz-излучения, которые будут реализованы на ускорительном комплексе ЛИУ-ПЭТ, требуется создать тонкий плазменный шнур большой протяженности, параметры которого адекватны задаче возбуждения верхнегибридных 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 плотность тока в разрядном промежутке на уровне 5 КА/см^2 . В качестве ограничителя диаметра газового облака, по которому будет реализовываться высоковольтный разряд, нами выбрана кварцевая трубка диаметром 22 mm с диэлектрическими кольцами диаметром 16 mm, размещенными внутри нее, как это показано на рис. 1.

В настоящей работе рассмотрена система формирования цилиндрического газового облака путем импульсной инжекции водорода в кварцевую трубку через щелевые сопла, установленные на ее концах.

В данной системе быстрого импульсного создания тонкого цилиндрического облака можно выделить три

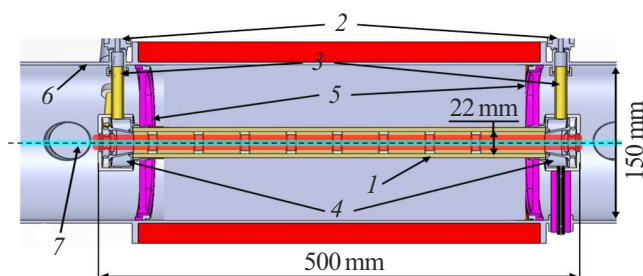


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры пучково-плазменного генератора ЛИУ-ПЭГ. 1 — кварцевая трубка, ограничивающая область формирования плазменного разряда; 2 — быстрые импульсные клапаны, обеспечивающие поступление газа в вакуумный объем; 3 — трубки для подачи газа от импульсных клапанов к соплам, расположенным на торцах кварцевой трубки; 4 — два коаксиальных сопла для инжекции водорода в кварцевую трубку; 5 — диафрагмы для фиксации кварцевой трубки в вакуумной камере; 6 — стальная цилиндрическая вакуумная камера; 7 — область прохождения РЭП в эксперименте.

основных элемента. Ключевым элементом является импульсный электромагнитный клапан фирмы Festo, на входе которого поддерживается необходимое давление напускаемого газа. Поток газа, инжектируемый через импульсный клапан, распространяется до щелевого сопла на торце кварцевой трубки по металлической трубке 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 РЭП требует поддержания остаточного вакуума за пределами секции высоковольтного плазменного разряда на уровне 10^{-7} Па (10^{-9} Torr). 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 области $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Этим несколько противоречивым требованиям должна удовлетворять система импульсного напуска газа в вакуумную полость кварцевой трубки, где осуществляется высоковольтный разряд, создающий плазменный шнур.

Размеры пространственной области, где с помощью высоковольтного разряда будет создаваться плазменный шнур, определяются внутренним диаметром кварцевой трубки (22 мм) и ее длиной (330 мм). Диаметр проходящего по шнуру пучка релятивистских электронов должен не превышать 12 мм, а диаметр плазменного шнура, который задается диафрагмами, имеет величину 16 мм. Инжекция потоков газа осуществляется с двух концов трубки навстречу друг другу через аксиально симметричные сопла. До этих сопел потоки газа распространяются от клапанов по специальным трубкам диаметром 8 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 трубки, предназначенной для осуществления высоковольтного разряда.

2. Процесс решения задачи в рамках пакета FlowVision и его результаты

Проводимые модельные расчеты в рамках газовой динамики призваны характеризовать зависимости параметров протяженного газового облака (характерное время заполнения газом трубки, достигаемая концентрация, однородность по сечению и длине) от геометрических размеров системы импульсной подачи газа, времени открытого состояния клапана для подачи газа при особом внимании к динамике процесса его открывания. В тексте мы описываем вариант расчета с фиксацией характерных особенностей решаемой задачи и анализом полученных результатов.

Для реализации конкретного решения поставленной задачи в рамках избранного нами подхода, прежде всего, была создана трехмерная компьютерная модель пространственной области, занимаемой плазменной секцией. В ходе процесса моделирования требовалось описать динамику изменения во времени распределения плотности газа по длине газоразрядной трубки. В процессе моделирования прослеживалась динамика распространения газа от импульсных клапанов через присоединенные к ним подводящие трубки к кольцевым щелевым соплам, расположенным по концам газоразрядной кварцевой трубки (на рис. 1 кварцевая трубка обозначена позицией 3, подводящие трубки — позициями 6 и 7, а клапаны не изображены). Особенно детально распространение газа прослеживалось именно в кварцевой газоразрядной трубке, где должен создаваться тонкий плазменный шнур.

Для модельных расчетов нами использован специализированный программный пакет FlowVision. Проведение расчетов с использованием данного программного пакета осуществлялось в рамках модели Навье—Стокса. В расчеты закладывался режим работы клапана „ступенчатой“ моделью, которая отражала полное открывание клапана за бесконечно малый промежуток времени, и также его мгновенное закрывание. Расход водорода за 0.5 ms открытого состояния такого варианта работы клапана приблизительно соответствует расходу водорода при работе клапана по модели линейного нарастания и линейного спада пропускаемого потока с общей длительностью 1 ms („треугольный“ тип временной диаграммы).

С помощью пакета было проведено несколько серий расчетов, призванных определить характерные времена заполнения газом вакуумной полости кварцевой трубки. Проведение расчетов с использованием пакета FlowVision проводилось по типичной для подобного программного продукта процедуре. Для начала задаются геометрия (в виде 3D-объекта) и условия на границах объекта, через которые входят и/или выходят потоки газа. При этом формулируются начальные условия, которые включают используемый газ (в данном случае — водород) и используемую в расчетах модель турбулентности. Далее задаются сечения пространственных областей, в которых необходимо отслеживать интересующие нас параметры потоков газа (концентрация, давление, температура). В заданные начальные моменты времени открываются участки границы объекта, через которые в вакуум подается газ (это соответствует срабатыванию на открывание клапанов, которые стоят на входе подводящих трубок). В последующем в заданный момент времени (в нашем моделировании это 0.5 ms) на входе этих трубок задается условие „стенка“, что означает прекращение поступления газа из-за мгновенного закрывания клапана. Дальнейший расчет проводится в условиях отсутствия поступления газа от внешних источников.

Использовалась база данных FlowVision: водород — как газообразная равновесная материальная среда. В процессе проведения расчета из этой базы брались следующие табличные величины: молярная масса, теплопроводность, вязкость, удельная теплоемкость, энтальпия; плотность определялась из уравнения идеального газа. В рамках уравнения идеального газа величины давления и температуры вычислялись итерационно до достижения точности 0.01 %. При этом используемая в расчете модель теплопереноса через полную энтальпию подразумевала изменение температуры в ходе расчета.

Характерная скорость течения в подводящей трубке $\sim 2\text{--}3\text{ км/с}$, число Маха достигает $M \sim 2.5$. Диаметр отверстия в клапане — 1 mm, который покрывается десятью ячейками сетки, число Рэйнольдса¹ за клапаном $Re_{valve} \sim 4000$; диаметр трубок, подводящих к цилиндрическому ресиверу, — 8 mm, $Re_{inlet tube} \sim 700$; диаметр кварцевой трубки — 22 mm (18 ячеек укладывается в этом диаметре), число Рэйнольдса за цилиндрическим ресивером $Re_{quartz tube} \sim 3\text{--}9$. Минимальный шаг сетки — 0.1 mm, максимальный шаг сетки — 2.5 mm; шаг расчета по времени переменный — $10^{-10}\text{--}10^{-3}\text{ с}$ (шаг подбирается автоматически солвером), расчет проводился до момента времени $t = 3\text{ мс}$. Расчет одного варианта занимает по времени около одного месяца.

В первых (предварительных) расчетах при решении задачи о заполнении газоразрядной трубки водородом учитывалась турбулентность в рамках К-ε-модели. При

¹ Число Рэйнольдса оценивалось как $Re = \frac{\rho |V| L}{\mu}$, где ρ — плотность, $[\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}]$; $|V|$ — модуль скорости, $[\text{м}\cdot\text{с}^{-1}]$; L — характерный размер (в оценках использовался диаметр трубок), $[\text{м}]$; μ — вязкость (динамический коэффициент молекулярной вязкости), $[\text{Па}\cdot\text{с}]$.

этом оказалось, что в условиях учета турбулентности движения при описании прохождения потока газа через трубку, передающую водород от клапана к соплу, значительно увеличивается продолжительность проведенного расчета при сравнительно слабом (менее чем на 2%) повышении отрезка времени, который необходим для заполнения водородом кварцевой трубки. Исходя из этой серии предварительных расчетов, в последующих сериях проведения систематических расчетов по динамике заполнения кварцевой газоразрядной трубки нами не предусматривался учет турбулентности при решении задачи о распространении газа по подводящим трубкам. Уравнение Навье—Стокса в данной постановке задачи решалось без добавок к вязкой силе. Надо отметить, что постановка задачи без учета такой добавки к вязкой силе могла привести к завышению температуры в области пространства, где встречаются потоки в средней части по длине газоразрядной трубки, которые распространяются от сопел, установленных на ее концах. В дополнении к уравнению Навье—Стокса, при решении использовалась модель теплопереноса через полную энтальпию (уравнение сохранения энергии через полную энтальпию).

Вообще говоря, реализованный нами во FlowVision численный алгоритм не зависит от локального числа Маха, и при правильно заданных параметрах позволяет рассчитывать течения со скоростями до-, транс-, сверх- и гиперзвуковых величин.

Максимальная скорость водорода в решателе была установлена на уровне 4000 m/s, что соответствует максимальному значению тепловой скорости молекул водорода в их функции распределения по скоростям. Ограничение пришлось ввести из-за используемого в расчетах допущения о мгновенном открывании клапана² из-за возникающего большого температурного перепада по объему всей расчетной области пространства, что также может быть вызвано недостаточным учетом эффектов, связанных с движением и сжатием газа.

В расчетной области пространства было задействовано более 1.2 млн ячеек. В качестве примера расположения ячеек на рис. 2, а изображена расчетная сетка объемов подводящей трубки и сопла. В условиях использования такой сетки реализована неявная разностная схема второго порядка точности с числом Куранта—Фридрихса—Леви CFL = 1.

В качестве начальных условий задавались давление над клапанами напуска (10^5 Па), постоянная начальная температура (297 K), начальное давление в камере (1 Pa) и температура газа (297 K) в расчетной области в начальный момент времени. В этом отношении с самого начала нам необходимо отметить, что, как выяснилось в

² Проводимые в настоящее время дополнительные расчеты показывают, что при задании реалистичной модели процесса открывания клапана, которая обеспечивает нарастание давления без скачков, скорость истечения не превышает 3.2 км/с, т. е. число Маха достигает величины $M \sim 2.5\text{--}2.6$ (значения скорости звука в водороде составляют $v_s \sim 1290\text{ м/с}$ при 1 atm и $v_s \sim 1200\text{ м/с}$ при 1 Pa).

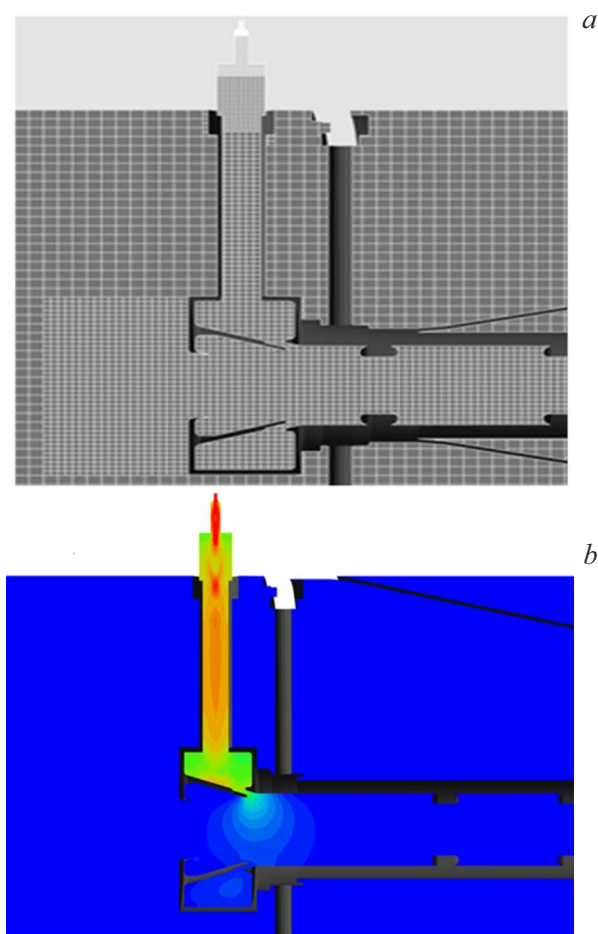


Рис. 2. Расчетная сетка, покрывающая объем подводящей трубки, сопла, газоразрядной трубки и окружающего их пространства (а) и расчетное распределение концентрации водорода в момент времени $t = 0.8 \text{ ms}$ от момента начала открывания клапана (б).

ходе проведения расчетов, для корректного использования FlowVision требуется ограничить исходное давление остаточного газа в вакуумной камере на уровне не ниже 1 Па. Данное ограничение определяется нарушением условий применимости используемых в программе уравнений Навье–Стокса. Критерием применимости выступает число Кнудсена K_n , которое определяется как отношение средней длины свободного пробега частиц $\langle l \rangle$ к характерному размеру системы L :

$$K_n = \langle l \rangle / L.$$

Уравнения Навье–Стокса можно использовать, когда выполнено условие $K_n \ll 1$. Оценив длину свободного пробега для молекул водорода (для которых проводились расчеты) из кинетической теории газов, получим, что

$$\langle l \rangle = k_B T \sqrt{2} \pi d^2 p \approx 10 \text{ м}.$$

При характерном размере системы $L = 22 \text{ мм}$ (диаметр трубки) и остаточном давлении $p = 10^3 \text{ Па}$ полу-

чаем, что $K_n = 4.6 \cdot 10^{-2}$. Таким образом, рассматриваемая газовая среда по параметрам находится далеко от области применимости уравнений Навье–Стокса. С другой стороны, при величине остаточного давления $p = 1 \text{ Па}$ получаем оценку для числа Кнудсена на уровне $K_n = 4.6 \cdot 10^{-1}$, это означает, что условия задачи соответствуют описанию условий переходной области между сплошной средой и свободным молекулярным течением.

Таким образом, в проведенном решении задачи на входе в клапаны было зафиксировано давление, равное атмосферному, а, согласно проведенному выше анализу, задача распространения газа по объему могла быть корректно решена до уровня минимального давления в нем порядка 1 Па. В областях с более низким уровнем давления решение в рамках специализированной программы FlowVision может быть некорректным.

Отметим, что проведение серии расчетов с целью получения хотя бы приближенной зависимости времени заполнения трубки от исходного остаточного давления газа в ней сопряжено с большим расходом расчетного компьютерного времени. По этой причине решение указанной задачи является предметом отдельной серии расчетов с большим объемом расходуемого машинного времени. Однако, принимая во внимание зависимость скорости потока газа от градиента давления, можно предположить, что снижение исходного давления в кварцевой трубке на порядок величины дает увеличение времени ее заполнения до необходимого распределения водорода всего лишь на несколько процентов.

Прежде всего, в ходе моделирования было установлено то, как влияют диаметр и протяженность трубки, по которой газ подается от выхода клапана к соплу, на поступление газа через сопло в область высоковольтного разряда в кварцевой трубке. По результатам этих расчетов был выбран диаметр подводящей трубки. С учетом условий практической реализации системы импульсного напуска газа в предстоящих экспериментах, диаметр подводящей трубки выбран равным 8 мм. Результаты расчетов заполнения внутренней полости кварцевой трубки при использовании такой подводящей трубки представлены рис. 3–7.

Распределение концентрации водорода для момента времени $t = 0.8 \text{ ms}$, который отсчитывается от момента мгновенного открывания клапана, приведено на рис. 2, б. Напомним, что продолжительность открытого состояния клапана 0.5 ms.

Результаты расчета с визуализацией линий тока скорости водорода в потоке газа при его распространении в геометрии системы формирования плазменного разряда установки ЛИУ-ПЭТ показаны на рис. 3.

Полученные результаты по динамике заполнения водородом внутренней полости кварцевой газоразрядной трубки представлены рис. 4. Указанная в правой части рисунка верхняя граница концентрации водорода C не в полной мере отражает максимальное значение концентрации в локальной области. В связи с этим, в подписях

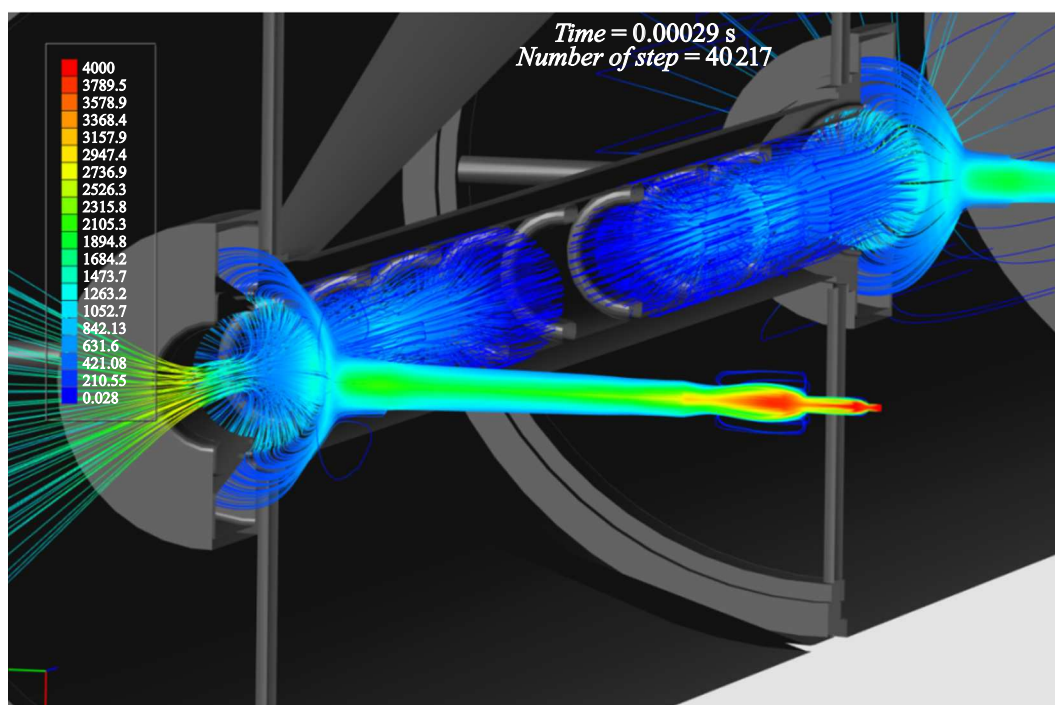


Рис. 3. Визуализация линий тока скорости, [m/s], водорода в газоразрядной камере пучково-плазменного генератора ЛИУ-ПЭТ.

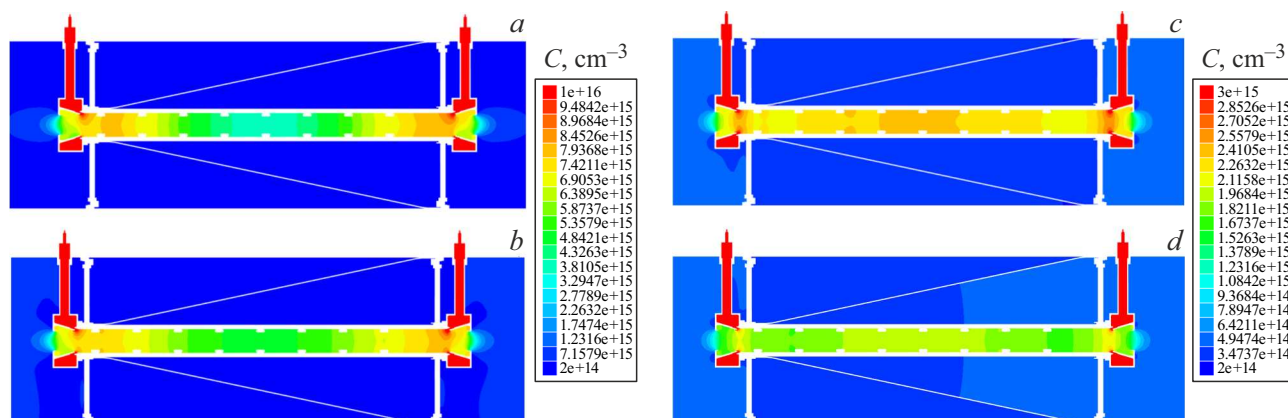


Рис. 4. Распределение концентрации водорода (осевое сечение) в различные моменты времени: $a - t = 0.92$ ms; $b - t = 1.12$ ms, $C_{t,m} \sim 2.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $c - t = 1.81$ ms; $d - t = 2.20$ ms, $C_{t,m} \sim 1.6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

к рисункам также указаны максимальные значения концентрации водорода в подводящей трубке $C + t.m$.

Как видно из представленных графиков, за время масштаба 0.6 ms происходит заполнение газоразрядной трубки потоками водорода, поступающими одновременно с обоих ее концов через аксиально-симметричные сопла. Отсюда следует, что характерный масштаб времени, за который происходит распространение потока водорода на длину газоразрядной трубки, составляет около 1 ms.

Важно отметить, что требование по недопущению попадания водорода на поверхность накаливаемого катода в диоде ускорителя ЛИУ, от которого поступает

инжектируемый в плазменный шнур пучок, достигалось за счет использования большого буферного объема, имеющий диаметр 10 см и протяженность 0.3 м. Истечение водорода из этого объема в сторону диода ускорителя лимитировалось диафрагмой с отверстием диаметром 16 мм. Истечение водорода из буферного объема через эту диафрагму описывалось в модели свободного истечения потока газа с расширением в вакуум.

Распределение концентрации водорода вне газоразрядной трубки в окрестности отверстия, предназначенного для ввода электронного пучка в торец плазменного шнура, представлено на рис. 5 для момента времени $t = 2.3$ ms. Это отверстие показано на оси симметрии

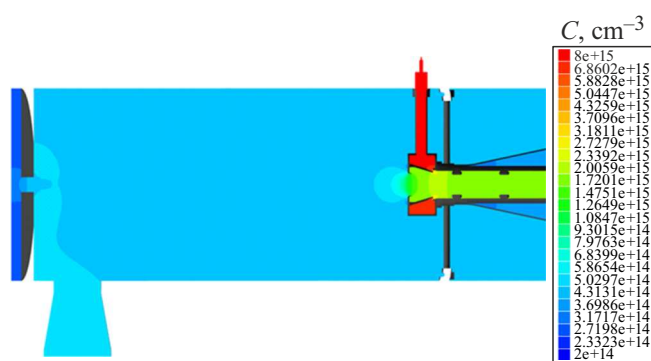


Рис. 5. Распределение концентрации водорода по буферному объему между газоразрядной трубкой и отверстием для ввода пучка от ускорителя в момент времени $t = 2.3$ ms.

рисунка на левом краю представленного изображения. Видно, что расширившийся по большому буферному объему поступающий от клапана поток водорода дает низкий уровень плотности за этим отверстием, что приемлемо для подвода пучка электронов от ускорителя.

При этом внутри газоразрядной трубки концентрация водорода имеет необходимую для высоковольтного разряда величину. На рис. 6 представлены распределения концентрации водорода по длине газоразрядной трубки

в осевом сечении для серии последовательных моментов времени.

Из представленных на рисунке распределений видно, что за время масштаба $1.5\text{--}2$ ms, отсчитываемого от момента начала открывания водородных клапанов, происходит приемлемое выравнивание распределения концентрации водорода по длине газоразрядной трубки. Зависимость от времени усредненной по объему этой трубки концентрации C_{av} водорода приведена на рис. 7, а. На рисунке штриховая вертикальная линия служит границей между двумя вариантами заполнения газом трубки. Первое мы относим к неоднородному, когда относительное отклонение величины концентрации δ_c от ее среднего значения соответствует условию $\delta_c > 15\%$. Второе — к однородному, когда $\delta_c < 15\%$.

Требуемое относительное отклонение $\delta_c = \pm 15\%$ от среднего по объему значения концентрации $C_{av} = 2.0\text{--}2.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ достигается после 1.65 ms (в качестве $t = 0$ принят момент начала открывания клапана). Такое требование по однородному распределению концентрации водорода сохраняется в течение отрезка времени $t_v = 0.45$ ms (до $t = 2.1$ ms). В последующие моменты времени концентрация водорода становится ниже, чем $C_{av} = 2.0 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, что неприемлемо с позиции требования получения плазмы с необходимой плотностью за счет высоковольтного разряда.

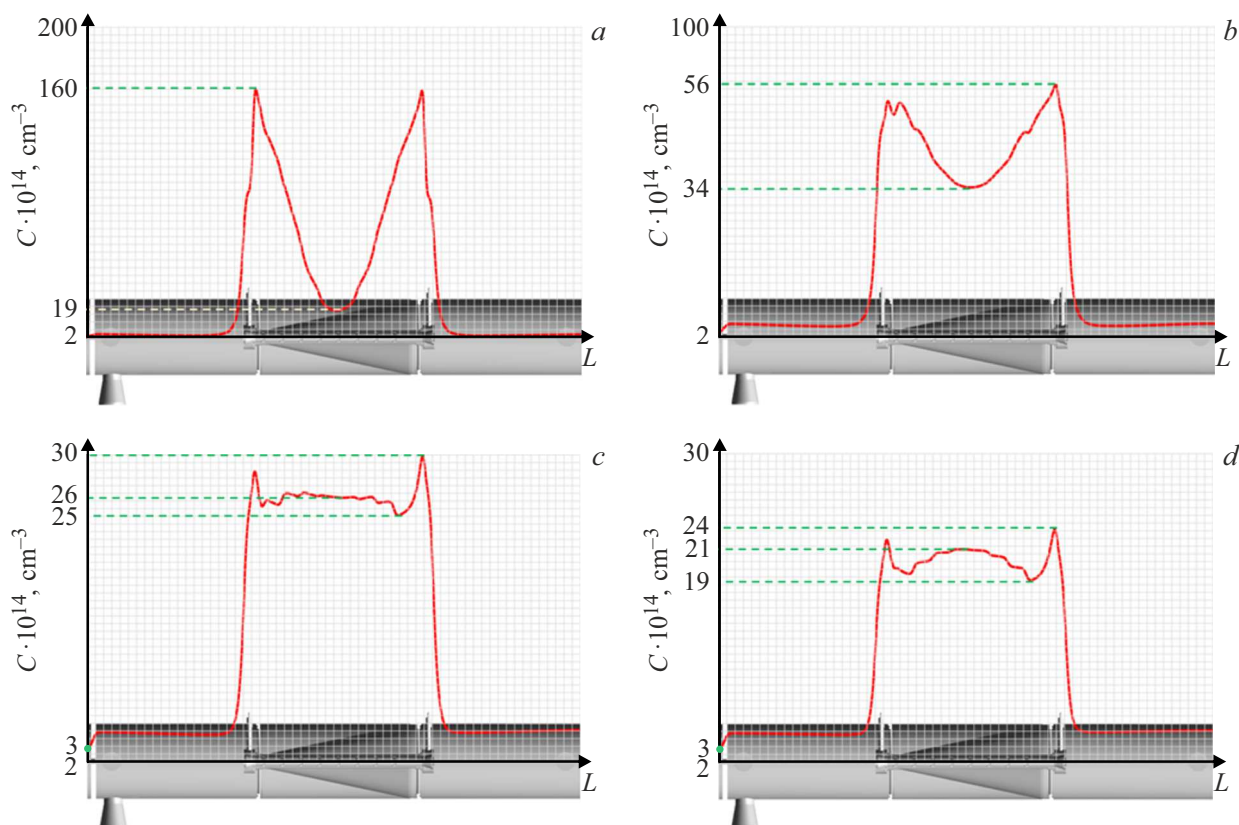


Рис. 6. Распределение максимального значения концентрации водорода (осевое сечение) в различные моменты времени, t , ms: а — 0.52, б — 0.112, в — 1.61, д — 2.01.

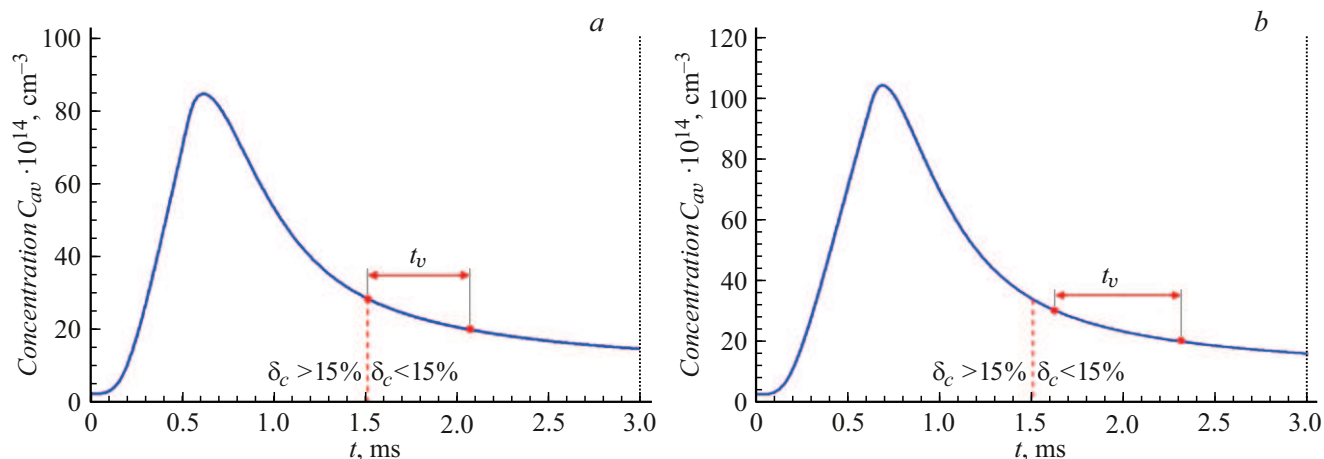


Рис. 7. Зависимости усредненной по объему концентрации C_{av} водорода в трубке от времени: *a* — клапан открыт в течение 0.5 ms; *b* — клапан открыт в течение 0.6 ms. Штриховая вертикальная линия соответствует переходу от неоднородного ($\delta_c > 15\%$) распределения концентрации к однородному ($\delta_c < 15\%$); t_v — время, в течение которого среднее значение концентрации в центральной области трубки находится в диапазоне $C_{av} \approx (2-3) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

На рис. 7, *b* представлен результат, когда продолжительность открытого состояния клапана была увеличена с 0.5 до 0.6 ms. Из сопоставления рис. 7, *a* и *b* видно, что вид кривой зависимости концентрации от времени $C_{av} = f(t)$ хорошо воспроизводится при некотором варьировании длительности открытого состояния клапана. Также видно, что в момент времени $\sim 2 \text{ ms}$ концентрация водорода в газоразрядной трубке C_{av} имеет величину на уровне $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ при хорошей однородности распределения по объему газового шнура, что необходимо для экспериментов по инъекции пучка в создаваемый плазменный шнур. Следует отметить, что в ходе проведения экспериментов, наряду с продолжительностью открытого состояния клапана, варьирование необходимой плотности плазмы может достигаться путем смещения по времени момента инициирования высоковольтного разряда t_w и соответственно момента инъекции в плазму электронного пучка.

Таким образом, по результатам описанных модельных расчетов можно сформулировать следующие утверждения. Режим подачи водорода через подводящие трубки к соплам слабо влияет на распределение концентрации газа по кварцевой газоразрядной трубке. Из представленных распределений концентрации водорода по длине разрядной трубки видно, что пониженный уровень концентрации водорода реализуется именно в средней по ее длине области, где сталкиваются встречные потоки газа, инжектируемые из сопел навстречу друг другу. Средние и максимальные значения концентрации водорода в этой газоразрядной трубке главным образом определяются суммарным объемом водорода, поступающего по подводящим трубкам от импульсных клапанов. Величина средней по сечению шнура концентрации водорода на момент закрытия клапанов в представленных вариантах

расчетов удовлетворяет требуемому интервалу значений $(2-3) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Однородное распределение концентрации газа длится в интервале времени 560–680 μs . Такой продолжительности ($\sim 120 \mu\text{s}$) в полной мере достаточно для создания плазменного шнура, поскольку время нарастания тока в высоковольтном разряде, который обеспечивает необходимую степень ионизации газа, имеет величину 2.5–3 μs . Можно утверждать, что в эксперименте без каких-либо затруднений можно реализовать техническое решение по ионизации газа в случае именно однородного распределения его плотности, которое существует столь продолжительное время. При этом требуется подбор момента времени его зажигания по отношению к времени открытого состояния клапанов. Следует отметить, что в процессе эксперимента плазменный шнур, создаваемый высоковольтным разрядом, существует несколько десятков микросекунд.

3. Результат измерений времени прохождения потока водорода по трубке

Подтверждением достоверности представленных выше результатов модельного описания процесса заполнения водородом протяженной трубки служат эксперименты этой направленности, проведенные ранее на установке ГОЛ-ПЭТ. Модернизация установки ГОЛ-ПЭТ применительно к проведению таких экспериментов описана в работе [21], где дана информация о системах для напуска газа и формирования тока высоковольтного разряда. В настоящем тексте мы лишь кратко остановимся на результатах измерений прохождения потоков водорода по трубке. Схема проведения измерений прохождения водорода по газоразрядной трубке на установке

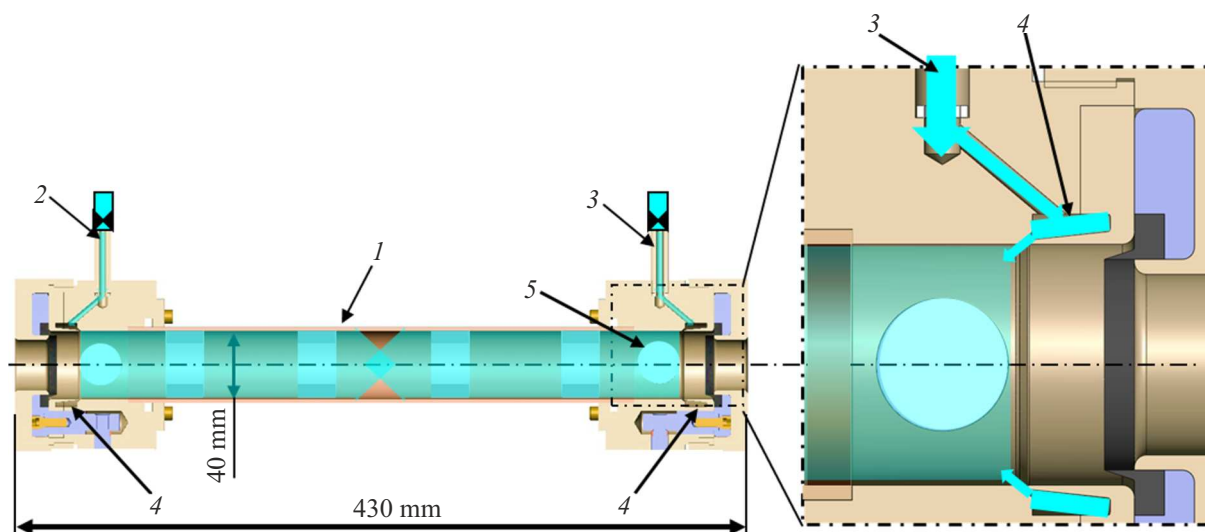


Рис. 8. Схема системы формирования плазменного шнура высоковольтным разрядом на установке ГОЛ-ПЭТ. 1 — кварцевая трубка — 40 mm с кольцевыми диафрагмами \varnothing 36 mm, ограничивающая диаметр газового шнура; 2 — клапан с трубкой для импульсной подачи водорода к первому соплу; 3 — клапан с трубкой для импульсной подачи водорода ко второму соплу; 4 — два коаксиальных щелевых сопла для инжекции водорода, поступающего от клапанов в кварцевую трубку; 5 — окно, через которое присоединена измерительная лампа ПМИ-10-2.

ГОЛ-ПЭТ при подаче его через импульсные клапаны FESTO MH-1 представлена на рис. 8. Подвод газа от импульсных клапанов к аксиально-симметричным щелевым соплам, размещенным на концах газоразрядной кварцевой трубки, осуществлялся по длинным металлическим трубкам. Присоединение такой трубки к соплу показано в увеличенном масштабе на фрагменте, расположенном на правой стороне рис. 8.

Геометрия проведенных экспериментов на установке ГОЛ-ПЭТ отличается от геометрии моделирующих расчетов, описывающих заполнение трубки на будущей установке ЛИУ-ПЭТ. На действующей установке ГОЛ-ПЭТ ведущее магнитное поле в вакуумной камере имеет величину 4 Т, и поэтому импульсные клапаны отнесены от оси камеры на расстояние 50 см. Это значительно дальше, чем на установке ЛИУ-ПЭТ, где при индукции поля 1 Т это расстояние составит 8 см. Определение величины времени прохождения потока водорода по кварцевой трубке осуществлялось путем регистрации процесса нарастания давления в окрестности измерительной лампы ПМИ-10, которая находилась на одном из ее концов. Срабатывание импульсных клапанов проводилось при фиксированном давлении на их входе клапанов величиной 2 atm. Регистрация процесса нарастания давления в окрестности регистрирующей лампы осуществлена в трех вариантах временной динамики работы клапанов. Первый вариант — напуск водорода осуществляется только через импульсный клапан, который находится на другом конце разрядной трубки по отношению к регистрирующей лампе; второй — напуск водорода осуществляется только через клапан, размещенный на конце трубки, близко расположенный к

регистрирующей лампе; и третий вариант — напуск водорода происходит через оба одновременно работающих клапана. Результаты регистрации изменений давления в вакуумной камере в области размещения измерительной лампы ПМИ-10 для этих трех вариантов представлены на рис. 9.

Величина давления в локальной области в окрестности лампы представлена в относительных единицах. На рис. 9, а показана динамика открывания и закрывания клапанов, используемых в данных экспериментах. На рис. 9, б представлен полный цикл импульсного изменения давления в вакуумной камере от его подъема при открывании клапанов до возвращения в исходное состояние с высоким вакуумом.

Из временных диаграмм, представленных на рис. 9, а, б, видно, что время распространения потока газа от импульсных клапанов до щелевых сопел, размещенных на концах газоразрядной трубки, имеет величину около 5 ms. Такое запаздывание в инжекции газа в газоразрядный промежуток по отношению к открыванию клапанов вызвано большой (50 см) длиной трубок, соединяющих клапаны с соплами. При этом из временной динамики сигналов 1 и 2, представленной на рис. 9, с, можно определить, что при данной геометрии и параметрах системы подачи водорода к щелевым соплам время прохождения волны давления от одного конца кварцевой разрядной трубки до другого имеет величину около 2 ms. Эта измеренная величина хорошо соответствует времени заполнения водородом такой трубки, которое получено в результате компьютерного моделирования.

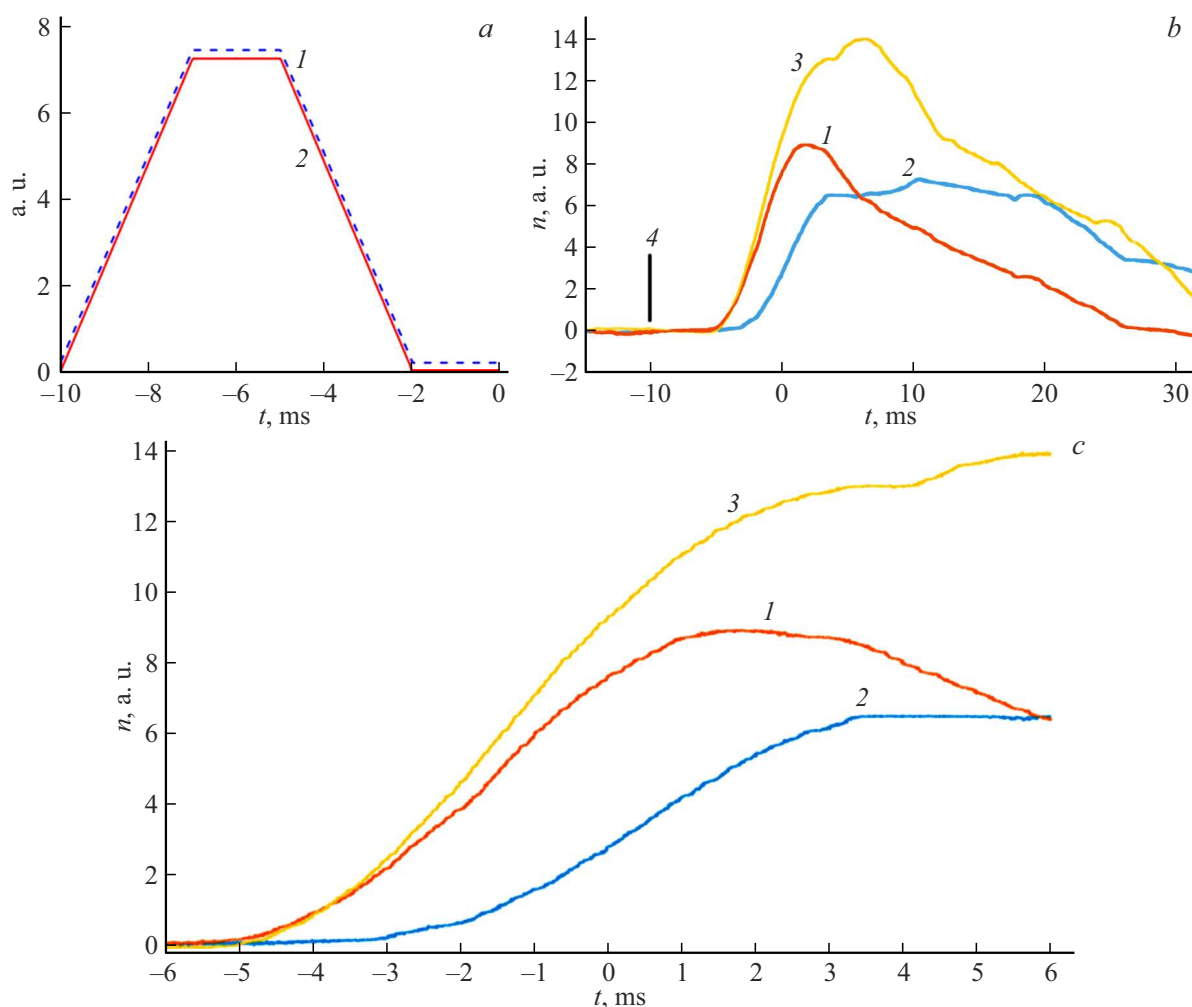


Рис. 9. Результаты регистрации изменений давления в локальной области вакуумной камеры, где размещена регистрирующая лампа: *a* — временная диаграмма поступления водорода через 1 и 2 — клапаны; *b* — изменение во времени сигналов от лампы, измеряющей давление. Сигнал от лампы: красная линия 1 — при срабатывании ближнего к ней клапана; синяя линия 2 — при срабатывании клапана, размещенного на противоположном конце кварцевой трубки; желтая линия 3 — при одновременном срабатывании обоих клапанов. Вертикальная линия на рисунке (*b*), отмеченная цифрой 4, показывает момент времени, когда начинается открывание клапанов, динамика которого показана на рисунке (*c*).

Заключение

Проведено компьютерное моделирование пространственно-временной динамики заполнения водородом протяженной кварцевой трубки применительно к созданию в ней высоковольтным разрядом тонкого плазменного шнура, который предназначен для генерации терагерцового излучения на основе интенсивной релаксации релятивистского электронного пучка в замагниченной плазме. В ходе выполнения моделирования показано.

При заполнении протяженной (длина 30 см, диаметр 20 мм) кварцевой газоразрядной трубки водородом, поступающим с двух ее концов через коаксиальные щелевые сопла от двух импульсных клапанов, оказывается достаточно их открытого состояния продолжительностью около 1 ms для того, чтобы при давлении на клапанах

1 atm обеспечить в трубке концентрацию молекул на уровне $(2-3) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

В условиях заполнения этой трубки двумя встречными потоками водорода, поступающими через щелевые сопла с двух ее концов, однородное распределение концентрации водорода по длине трубки достигается за время их взаимного проникновения по длине, которое оказывается на уровне 2 ms. Исходя из опыта, накопленного авторами в проведении аналогичных численных расчетов, можно оценить погрешность в полученной расчетной величине времени заполнения разрядной трубки на уровне не выше 20 %.

В свою очередь, эксперименты по импульсному заполнению водородом протяженной кварцевой трубки, проведенные на установке ГОЛ-ПЭТ, показали, что время ее заполнения встречными потоками с двух концов действительно составляет 2–3 ms.

Таким образом, по результатам компьютерного моделирования и проведенных тестовых экспериментов установлено, что подачу высокого напряжения к электродам на концах кварцевой трубки с целью зажигания сильноточного разряда применительно к созданию в ней плазменного шнура следует производить через 2–3 ms после начала выхода потоков водорода из щелевых сопел. Достигнутые результаты позволяют создать тонкий плазменный шнур для генерации терагерцового излучения при интенсивном пучково-плазменном взаимодействии на установке ЛИУ-ПЭТ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.V. Arzhannikov, A.V. Burdakov, P.V. Kalinin, S.A. Kuznetsov, M.A. Makarov, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky, V.F. Sklyarov, V.D. Stepanov, Yu.S. Sulyaev, M.K.A. Thumm, L.N. Vyacheslavov. *Vestnik Novosibirsk State University. Series: Phys.*, **5** (4), 44 (2010). DOI: 10.54362/1818-7919-2010-5-4-44-49
- [2] A.V. Arzhannikov, A.V. Burdakov, V.S. Burmasov, I.A. Ivanov, A.A. Kasatov, S.A. Kuznetsov, M.A. Makarov, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, S.S. Popov, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky, V.F. Sklyarov, V.D. Stepanov, I.V. Timofeev, M.K.A. Thumm. *IEEE Transactions on Terahertz Sci. Technol.*, **6** (2), 245 (2016). DOI: 10.1109/TTHZ.2016.2525783
- [3] А.В. Аржанников, С.Л. Синецкий, Д.А. Самцов, И.В. Тимофеев, Е.С. Сандалов, С.С. Попов, М.Г. Атлуханов, М.А. Макаров, П.В. Калинин, К.Н. Куклин, А.Ф. Ровенских, В.Д. Степанов. *Физика плазмы*, **50** (3), 293 (2024). DOI: 10.31857/S0367292124030042 [A.V. Arzhannikov, S.L. Sinitsky, D.A. Samtsov, I.V. Timofeev, E.S. Sandalov, S.S. Popov, M.G. Atlukhanov, M.A. Makarov, P.V. Kalinin, K.N. Kuklin, A.F. Rovenskikh, V.D. Stepanov. *Plasma Phys. Rep.*, **50** (3), 331 (2024). DOI: 10.1134/S1063780X24600051]
- [4] A.V. Arzhannikov, S.L. Sinitsky, S.S. Popov, I.V. Timofeev, D.A. Samtsov, E.S. Sandalov, P.V. Kalinin, K.N. Kuklin, M.A. Makarov, A.F. Rovenskikh, V.D. Stepanov, V.V. Annenkov, V.V. Glinsky. *IEEE Transactions Plasma Sci.*, **50** (8), 2348 (2022). DOI: 10.1109/TPS.2022.3183629
- [5] D.A. Samtsov, A.V. Arzhannikov, S.L. Sinitsky, M.A. Makarov, S.A. Kuznetsov, K.N. Kuklin, S.S. Popov, E.S. Sandalov, A.F. Rovenskikh, A.A. Kasatov, V.D. Stepanov, I.A. Ivanov, I.V. Timofeev, V.V. Annenkov, V.V. Glinsky. *IEEE Transactions Plasma Sci.*, **4**, 9 (11), 3371 (2021). DOI: 10.1109/TPS.2021.3108880
- [6] А.В. Аржанников, А.В. Бурдаков, П.П. Дейчули, В.С. Койдан, В.В. Конюхов, К.И. Меклер. *Физика плазмы*, **4** (5), 1133 (1978).
- [7] A.V. Burdakov, V.S. Koidan, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev. *Plasma Phys. Rep.*, **40**, 161 (2014). DOI: 10.1134/S1063780X14030039
- [8] A.V. Arzhannikov, A.V. Burdakov, V.S. Burmasov, I.A. Ivanov, S.A. Kuznetsov, K.N. Kuklin, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky, V.F. Sklyarov. *Plasma Phys. Rep.*, **41** 863 (2015). DOI: 10.1134/S1063780X1511001X
- [9] A.V. Arzhannikov, I.A. Ivanov, P.V. Kalinin, A.A. Kasatov, M.A. Makarov, K.I. Mekler, A.F. Rovenskikh, D.A. Samtsov, E.S. Sandalov, S.L. Sinitsky. *J. Phys.: Conf. Ser. IOP Publishing*, **1647** (1), 012011 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1647/1/012011
- [10] A.V. Arzhannikov, I.V. Timofeev. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **54** (10), 105004 (2012). DOI: 10.1088/0741-3335/54/10/105004
- [11] I.V. Timofeev, V.V. Annenkov, A.V. Arzhannikov. *Phys. Plasmas*, **22** (11), 113109 (2015). DOI: 10.1063/1.4935890
- [12] А.В. Аржанников, И.В. Тимофеев. *Вестник Новосибирского гос. ун-та. Серия: Физика*, **11** (4), 78 (2016). DOI: 10.54362/1818-7919-2016-11-4-78-104
- [13] А.В. Аржанников, С.Л. Синецкий, Д.А. Старостенко, П.В. Логачев, П.А. Бак, Д.А. Никифоров, С.С. Попов, П.В. Калинин, Д.А. Самцов, Е.С. Сандалов, М.Г. Атлуханов, А.Н. Григорьев, С.О. Воробьев, Д.В. Петров, Р.В. Протас. *Сибирский физ. журн.*, **18** (1), 28 (2023). DOI: 10.25205/2541-9447-2023-18-1-28-42
- [14] E.S. Sandalov, S.L. Sinitsky, A.V. Burdakov, P.A. Bak, K.I. Zhivankov, E.K. Kenzhebulatov, P.V. Logachev, D.I. Skovorodin, A.R. Akhmetov, O.A. Nikitin. *IEEE Transactions Plasma Sci.*, **49** (2), 718 (2021). DOI: 10.1109/TPS.2020.3045345
- [15] D.A. Nikiforov, A.V. Petrenko, S.L. Sinitsky, P.A. Bak, D.I. Skovorodin, P.V. Logachev, K.I. Zhivankov, E.S. Sandalov, O.I. Meshkov, A.V. Ivanov, V.V. Fuodorov, A.A. Starostenko, O.A. Pavlov, G.I. Kuznetsov, A.A. Krylov, D.A. Starostenko, O.A. Nikitin, A.R. Akhmetov. *J. Instrumentation*, **16** (11), P11024 (2021). DOI: 10.1088/1748-0221/16/11/P11024
- [16] А.В. Сидоров, А.П. Веселов, А.В. Водопьянов, А.А. Мурзанев, А.Н. Степанов. *ЖТФ*, **94** (7), 1015 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58335.135-24
- [17] T. Tisovsky, T. Vit. *Europ. Phys. J. Conf.*, **2017-143**, 02131 (2017). DOI: 10.1051/epjconf/201714302131
- [18] В.В. Никонов. *Известия Самарского НЦ РАН*, **19** (1), 183 (2017).
- [19] W. Sutherland. *Philosoph. Magazine*, **36** (223), 507 (1893). DOI: 10.1080/14786449308620508
- [20] B.J. McBride, S. Gordon, M.A. Reno. *Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species. NASA Technical Memorandum 4513* (NASA, 1993)
- [21] D.A. Samtsov, A.V. Arzhannikov, S.L. Sinitsky, E.S. Sandalov, M.A. Makarov, P.V. Kalinin, K.N. Kuklin. 8-th Intern. Conf. *Frontiers of Nonlinear Phys.*, **151**, 2024. <https://fnp2024.physconf.org/api/files/viii%20international%20conference-2024.pdf>