

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.9.07

ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА МК-200

© 2023 г. В. А. Костюшин^{a,*}, И. М. Позняк^{a,b}, Д. А. Топорков^{a,b}, Д. А. Бурмистров^{a,c},
К. В. Журавлев^a, С. Д. Лиджигорьяев^{a,b}, Р. Р. Усманов^{a,c}, В. Ю. Цыбенко^a, В. С. Немчинов^a

^aГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12

^bМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 141701, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

^cНациональный исследовательский университет «МЭИ»

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

*e-mail: vakostyushin@triniti.ru

Поступила в редакцию 08.12.2022 г.

После доработки 06.04.2023 г.

Принята к публикации 08.04.2023 г.

Плазменные потоки с высокой скоростью, плотностью и энергосодержанием находят широкое применение в исследованиях по взаимодействию плазмы с материалами, моделированию астрофизических процессов, разработке плазменных двигателей и плазменных источников излучения, инжекции плазмы в термоядерные установки. Для генерации таких потоков могут быть использованы электродинамические плазменные ускорители. В данной работе описаны конструктивные особенности мощного импульсного плазменного ускорителя и диагностические средства для измерения параметров генерируемого им плазменного потока.

DOI: 10.31857/S0032816223050117, EDN: ZJZVQP

ВВЕДЕНИЕ

Плазменные потоки с высокой скоростью, плотностью и энергосодержанием находят широкое применение при решении различных исследовательских и технологических задач. К таким задачам относятся: взаимодействие плазмы с материалами [1], моделирование астрофизических процессов [2], разработка плазменных двигателей [3, 4] и плазменных источников излучения [5], инжекция плазмы в термоядерные установки [6]. Генерация мощных потоков плазмы может осуществляться с помощью электродинамических плазменных ускорителей.

При использовании в качестве плазмообразующего газа дейтерия или трития возможна генерация термоядерных нейтронов при встречном столкновении плазменных потоков. Энергия относительного движения взаимодействующих частиц в четыре раза превышает их кинетическую энергию, поэтому интенсивность нейтронного излучения из зоны столкновения будет как минимум в 4 раза превосходить интенсивность нейтронного излучения из облака плазмы с максвелловским распределением ионов по энергиям при одинаковых значениях энергосодержания, массы и плотности плазмы [7]. Это позволяет создать

мощный источник термоядерных нейтронов на основе импульсных плазменных ускорителей.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки МК-200 с диагностической аппаратурой представлена на рис. 1. Установка состоит из электродинамического импульсного плазменного ускорителя, цилиндрической камеры для транспортировки плазменного потока и мишенной камеры. Камера транспортировки представляет собой цилиндрическую трубу из нержавеющей стали длиной 300 см, с внутренним диаметром 20 см и толщиной стенки 3 мм, в которой с помощью многовитковых соленоидов создается квазистационарное продольное магнитное поле. Внутренний диаметр плазмопровода на 4 см превышает выходной диаметр внешнего электрода ускорителя, что обеспечивает наличие магнитного зазора между плазмой и стенкой камеры. К камере транспортировки пристыковывается мишенная камера в виде цилиндрической трубы из нержавеющей стали диаметром 29 см и длиной 42 см, в которую можно устанавливать исследуемые образцы или диагностическую аппаратуру (калориметр для измерения полного энергосодержания плазменного потока, датчики давления и т.д.). Во время эксперимента в мишенной

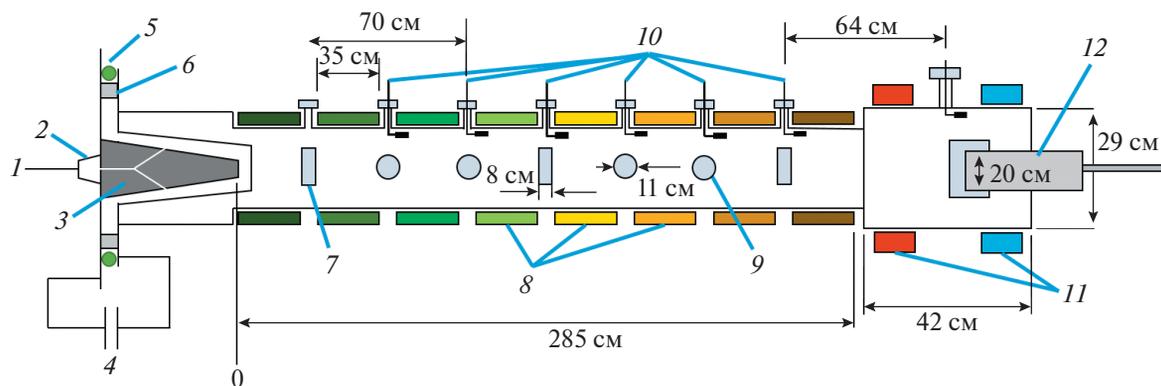


Рис. 1. Схема установки МК-200. 1 – газовая линия; 2 – газовый клапан; 3 – плазменный ускоритель; 4 – конденсаторная батарея; 5 – пояс Роговского; 6 – изолятор; 7 – прямоугольные диагностические окна; 8 – катушки магнитного поля; 9 – круглые диагностические окна; 10 – магнитные зонды; 11 – катушки Гельмгольца; 12 – калориметр.

камере с помощью катушек Гельмгольца создается продольное магнитное поле.

Электродная система плазменного ускорителя (ПУ) выполнена в форме двух усеченных коаксиальных конусов из меди. Внешний электрод (анод) не является сплошным, а набран из 18 отдельных стержней, что препятствует “шнурованию” тока разряда. Диаметр внешнего электрода у основания составляет 220 мм, на выходе из ускорителя – 170 мм. Диаметр внутреннего электрода (катода) изменяется по длине от 120 до 43 мм. Длина электродов, на которой происходит ускорение плазменной оболочки, составляет ~490 мм. У основания электроды разделены изолятором из полиацетали, расположенным таким образом, чтобы исключить прямое воздействие светового излучения разряда на изолятор для предотвращения развития вторичных пробоев по его поверхности.

Питание ПУ осуществляется от малоиндуктивной конденсаторной батареи, состоящей из 350 конденсаторов ИК-50-3 общей емкостью ~1.08 мФ. Напряжение заряда батареи варьируется в диапазоне 14–24 кВ, что соответствует изменению запасенной в батарее энергии от 98 до 288 кДж. Для коммутации батареи на электроды ускорителя используются 8 дисковых вакуумных разрядников. Разрядники соединены с фланцами электродов с помощью 216 коаксиальных кабелей РК 50-11-13 для уменьшения “паразитной” индуктивности разрядного контура и предотвращения “шнурования” тока между электродами ускорителя.

Напуск рабочего газа (водорода, дейтерия или азота) в межэлектродный зазор ускорителя осуществляется с помощью быстродействующего клапана. С механической точки зрения клапан относится к тарельчатому типу, т.е. зазор, через который проходит газ, открывается тарелкой. Тарелка представляет собой диск, периферия кото-

рого в закрытом состоянии плотно прилегает к уплотнению. Для открытия кольцевого зазора тарелка отжимается от уплотнения. Сдвиг тарелки осуществляется за счет прямолинейного движения штока, выполняющего одновременно функции направляющей и звена, связывающего тарелку с исполнительным механизмом.

Для клапанов плазменных ускорителей применяется индукционно-динамический тип исполнительного механизма. В его основе лежит плоская электромагнитная катушка, вплотную к которой примыкает плоский толкатель из электропроводящего материала. При пропускании импульса тока через катушку в материале толкателя возникают вихревые (индукционные) токи. Из-за короткой длительности импульса тока поле концентрируется в зазоре между катушкой и толкателем, поэтому на них действуют значительные ponderomotive силы, отбрасывающие толкатель от катушки. Через шток движение толкателя передается тарелке клапана. Питание на клапан подается через высоковольтный разделительный трансформатор, обеспечивающий электрическую развязку между конденсаторными батареями, от которых происходит питание клапана, и батарей плазменного ускорителя.

Движение плазмы от ускорителя до мишенной камеры происходит по плазмопроводу, заполненному продольным магнитным полем. Магнитное поле в плазмопроводу создается с помощью восьми многовитковых соленоидов, а в мишенной камере – катушками Гельмгольца. Питание соленоидов и катушек осуществляется от независимых конденсаторных батарей, что позволяет варьировать величину поля по длине плазмопровода и в мишенной камере. Каждая батарея состоит из 215 конденсаторов марки К-41И-7 (100 мкФ, 5 кВ) общей емкостью 21.5 мФ. Коммутация батарей на катушки осуществляется с помощью дисковых вакуумных разрядников. Период разрядного тока

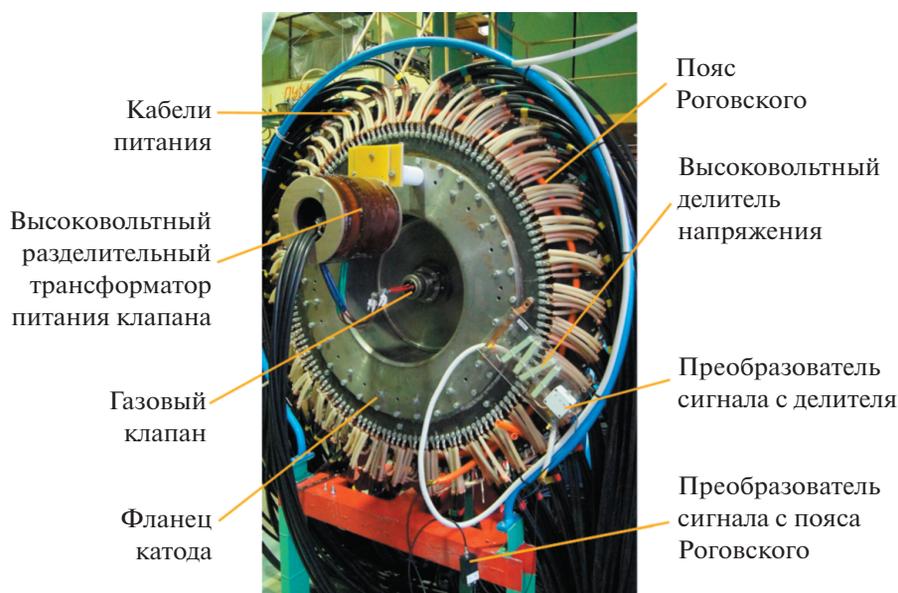


Рис. 2. Внешний вид высоковольтного делителя напряжения, пояса Роговского и преобразователей сигнала.

в соленоидах лежит в диапазоне $T = 8\text{--}18$ мс. Величина создаваемого магнитного поля может варьироваться в диапазоне от 0 до 2 Тл.

Распределение магнитного поля $B(z)$ вдоль плазмопровода измеряется с помощью линейки из восьми магнитных зондов. Зонды представляют собой цилиндрические катушки на диэлектрическом стержне диаметром 20 мм, содержащие по 25 витков провода ПЭЛШО, намотанных вплотную друг к другу. Расстояние между соседними зондами в линейке равно 10 см. Калибровка зондов осуществляется по сигналу зонда известного сечения. Согласно результатам калибровки, площадь зондов лежит в диапазоне от 80 до 90 см².

На батарею каждой катушки подается напряжение $U_i = 1$ кВ за несколько пусков, перемещая линейку зондов вдоль плазмопровода, измеряется распределение $B(z)$. Поскольку поле соленоида B пропорционально протекающему через него току I , максимум которого пропорционален начальному напряжению U разряжаемой на него конденсаторной батареи, то по результатам измерений были рассчитаны коэффициенты связи k_i из следующего выражения:

$$B(z) = \sum_{i=1}^{10} k_i U_i$$

Зная коэффициенты k_i , можно рассчитать напряжения U_i , до которых необходимо заряжать каждую батарею, чтобы получить во время эксперимента требуемое распределение $B(z)$.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

Для контроля за режимами работы плазменного ускорителя и измерения параметров плазменного потока был создан ряд диагностических средств: пояс Роговского, высоковольтный делитель напряжения, магнитные зонды и интегральный термопарный калориметр.

Чтобы уменьшить влияние электромагнитных наводок, возникающих в процессе работы установки, на результаты измерений тока и напряжения, использовались оптические развязки. Напряжение U на электродах ускорителя регистрировалось с помощью высоковольтного электрооптического преобразователя, общий вид которого представлен на рис. 2. Преобразователь состоит из низкоиндуктивных сопротивлений типа ТВЛ в верхнем плече и высокоскоростного светодиода SFH757V – в нижнем (рис. 3а). Сопротивление верхнего плеча составляет ≈ 60 кОм и при напряжении $U = 20$ кВ ограничивает ток через светодиод до $1/3$ А, что обеспечивает его работу в линейном режиме. Защита от переполюсовки напряжения осуществляется за счет шунтирования SFH757V полупроводниковым диодом HER103, включенным в противоположном направлении.

Сигнал светодиода передается по оптическому волокну и попадает на фотоэлектрический преобразователь, схема которого изображена на рис. 3б. Буферная емкость 2.2 мкФ заряжается до напряжения источника питания 12 В через сопротивление 20 кОм. Фотодиод SFH250V открывается световым сигналом из оптической линии, что приводит к протеканию тока через резистор 1 кОм, напряжение на котором регистрируется цифровым осциллографом TiePie HS4-50. При длитель-

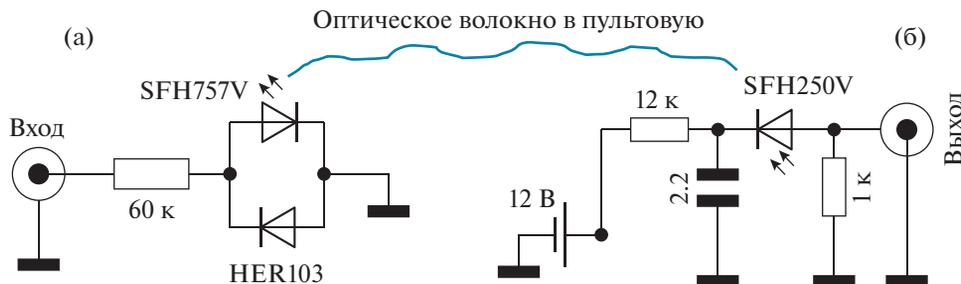


Рис. 3. Схема измерения напряжения на электродах ускорителя: а – высоковольтный электрооптический преобразователь; б – фотоэлектрический преобразователь.

ности плазменного разряда не более 30 мкс и полном открытии фотодиода емкость буферного конденсатора обеспечивает просадку напряжения обратного смещения не более чем на 0.16 В (при полной амплитуде сигнала 12 В).

Калибровка делителя напряжения осуществляется при подаче известного постоянного напряжения U на электроды ускорителя. Во время калибровки плазмообразующий газ в ускоритель не подается. При коммутации конденсаторной батареи на электроды ускорителя в коаксиальной линии (токоподводящие кабели) возникают колебания, скорость затухания которых зависит от активного сопротивления цепи. Такие колебания сохраняются и при рабочих пусках установки, однако они не мешают измерениям напряжения на ускорителе.

Сигнал, полученный при $U = 5.26$ кВ, показан на рис. 4. Видно, что колебания затухают за ≈ 5 мкс, а отклик измерительного канала составляет 1.84 В, т.е. коэффициент чувствительности делителя равен 2.86 кВ/В.

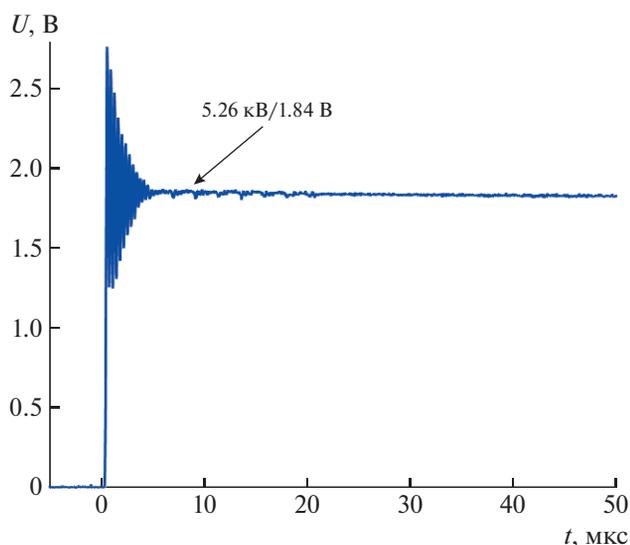


Рис. 4. Сигнал с делителя напряжения во время калибровки.

Для измерения тока разряда I был изготовлен пояс Роговского. Пояс представляет собой жилу коаксиального кабеля марки RG-58 диаметром 0.8 мм, на полиэтиленовую изоляцию которой с шагом 5 мм намотан тонкий медный провод $\varnothing 0.2$ мм в лаковой изоляции. Для защиты от механических повреждений и электрических пробоев пояс помещен в термоусадочную трубку и полиэтиленовый гофр. Гофр уложен между сборными шинами ускорителя так, чтобы пояс Роговского измерял весь ток разряда (рис. 2). Преобразование, передача и регистрация сигнала с пояса осуществлялись по схеме с оптической развязкой. Основное отличие от схемы, используемой с делителем напряжения, заключается в наличии двух каналов – как для положительной, так и для отрицательной составляющей сигнала. Сигнал с пояса Роговского пропорционален производной тока, а реальное значение тока восстанавливается численным методом.

Типичный сигнал с пояса Роговского во время пуска установки МК-200 показан на рис. 5. Кривые соответствуют положительной ($+dI/dt$) и отрицательной ($-dI/dt$) составляющим производной тока.

На рис. 6 показаны типичные осциллограммы с реальными значениями тока и напряжения. В приведенном пуске напряжение на конденсаторной батарее составляет 18 кВ, время напуска газа до подачи напряжения на электроды – 270 мкс, рабочий газ – дейтерий.

Одним из самых распространенных методов измерения импульсных магнитных полей является метод, основанный на использовании магнитных зондов. Для данной установки изготовлены зонды в виде цилиндрических катушек длиной 25 мм и диаметром 3 мм. Катушки содержат по 250 намотанных вплотную друг к другу витков медного провода толщиной 100 мкм. Чтобы обеспечить изоляцию катушек от плазмы, они помещены в керамический корпус и герметизированы эпоксидной смолой. Зонды установлены вдоль плазмпровода на расстоянии 35 см друг от друга через специальное вакуумное уплотнение, которое позволяет изолировать корпус зонда от стен-

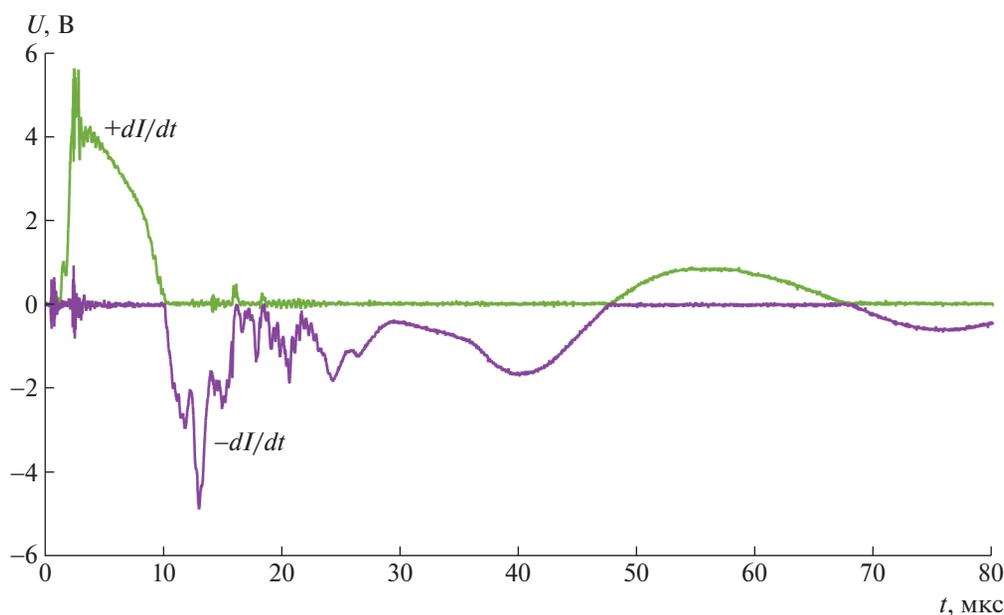


Рис. 5. Сигнал с пояса Роговского.

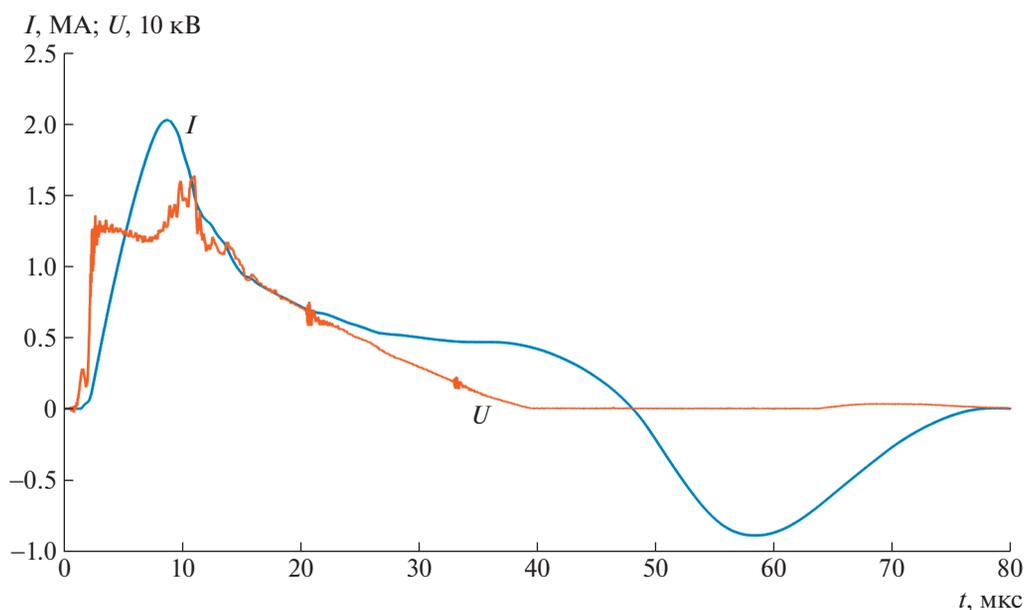


Рис. 6. Осциллограммы тока и напряжения.

ки вакуумной камеры и менять его положение (вдоль радиуса камеры) без нарушения герметичности установки.

Когда зонд с суммарной площадью витков S оказывается в переменном магнитном поле \mathbf{H} , наведенная на концах катушки ЭДС $U(t)$ равна:

$$U(t) = S\mu_0 \frac{dH}{dt}.$$

Величина индукции магнитного поля $B \sim \int U(t) dt$. В эксперименте интегрирование сиг-

нала осуществляется с помощью пассивных RC -цепочек. Постоянная времени цепочек равна 200 мкс, что удовлетворяет требованию $RC \gg t_{pl}$, где t_{pl} – длительность плазменного потока ($t \approx 30$ мкс). Калибровка зондов (определение площади S) осуществлялась по известному значению магнитного поля, создаваемого с помощью длинного соленоида, на обмотку которого разряжается конденсаторная батарея.

По результатам зондовых измерений можно определить скорость плазменного потока V_{pl} , его

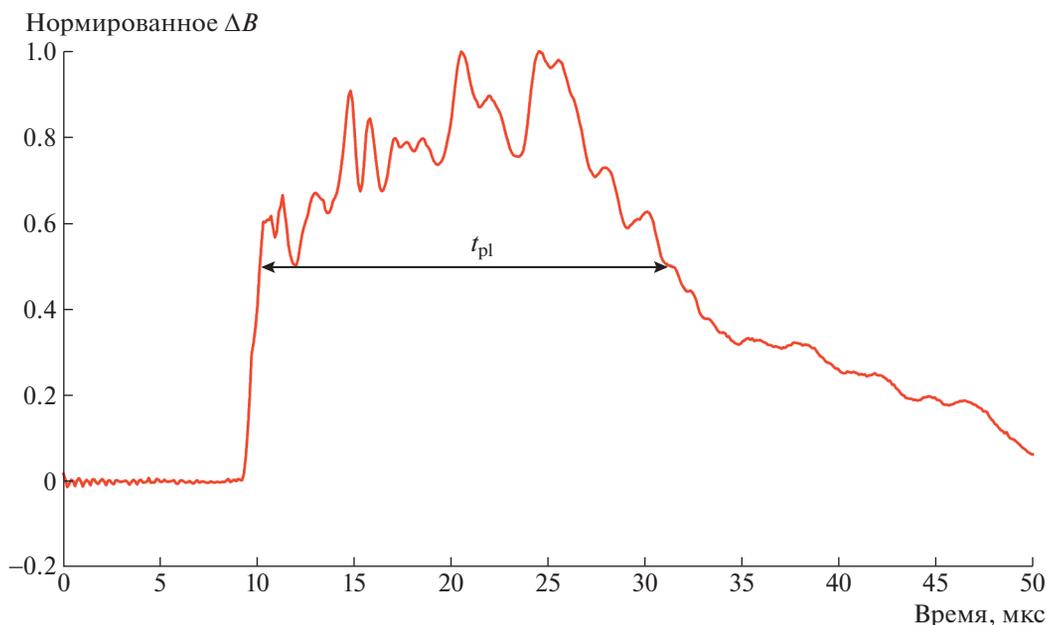


Рис. 7. Определение длительности плазменного потока по сигналу пристеночного магнитного зонда № 2.

длительность t_{pl} и площадь поперечного сечения S_{pl} . Длительность плазменного потока t_{pl} определяется при каждом пуске установки. Для этого измеряется продолжительность показаний зондов на уровне 50% от максимального значения сигнала зонда (рис. 7). Скорость плазменного сгустка V_{pl} можно оценить с помощью времяпролетной методики, зная расстояние между магнитными зондами L и измеряя запаздывание их сигналов Δt .

При перемещении по плазмопроводу плазменный сгусток вытесняет магнитное поле к стенкам вакуумной камеры, однако за характерное время движения плазмы магнитное поле не успевает продиффундировать через стенку. Таким образом, по приращению магнитного поля ΔB , измеряемого пристеночными магнитными зондами, и исходя из закона сохранения магнитного потока в сечении плазмопровода можно определить площадь плазменного потока: $S_{pl} = \Delta BS / (B_0 - B_{pl} + \Delta B)$, где S – площадь поперечного сечения плазмопровода, B_0 – величина начального магнитного поля в плазмопроводе, B_{pl} – величина магнитного поля в области, занимаемой плазмой, которая измеряется с помощью магнитного зонда, опускаемого в центр плазмопровода.

Для измерения энергосодержания плазменного потока был изготовлен интегральный калориметр. Конструкция калориметра обеспечивает равномерное распределение энергии плазменного потока по его внутренней поверхности, что повышает точность измерений и увеличивает время

службы калориметра. Температура стенок измеряется с помощью 16 хромель-алюмелевых термопар, закрепленных на внешней поверхности прибора. Калибровка термопар выполнена с использованием термостата.

Сигналы с термопар подаются на промышленные модули AIN8-U60 [8]. Каждый модуль имеет 8 гальванически изолированных (на 2.5 кВ) входов, сигнал с которых усиливается, после чего мультиплексируется на 8-канальный АЦП. Данные с АЦП в автоматическом режиме передаются в персональный компьютер и сохраняются в базе данных. Для обработки результатов измерений была написана специальная программа, с помощью которой осуществлялась интерполяция данных о росте температуры стенок калориметра после плазменного воздействия с последующим расчетом полного энергосодержания плазменного потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе описаны конструктивные особенности мощного импульсного плазменного ускорителя, представлены диагностические средства для измерения параметров генерируемого им плазменного потока, предложены методики для обработки экспериментальных данных. В дальнейшем планируется дополнить диагностический комплекс установки интерферометром Маха–Цендера для измерения плотности плазменного потока и провести исследование режимов работы плазменного ускорителя.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного контракта от 28.04.2022 № Н.4к.241.09.22.1074.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Позняк И.М., Архипов Н.И., Карелов С.В., Сафронов В.М., Топорков Д.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2014. Т. 37. Вып. 1. С. 70. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2014-37-1-70-79>
2. Ананьев С.С., Крауз В.И., Мятон В.В., Харрасов А.М. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. Вып. 1. С. 21. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2017-40-1-21-35>
3. Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И., Кулыгин В.М. // Природа. 2017. № 12. С. 33.
4. Жильцов В.А., Кулыгин В.М. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. Вып. 3. С. 5. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2018-41-3-5-20>
5. Toporkov D.A., Gavrilov V.V., Zhilukhin A.M., Kochnev D.M., Kostyushin V.A., Poznyak I.M., Pikuз S.A., Ryazantsev S.N., Skobelev I.Yu. // 47th EPS Conference on Plasma Physics. EPS 2021. С. 545.
6. Raman R. // Fusion Engineering and Design. 2008. V. 83. Iss. 10–12. P. 1368. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.06.043>
7. Старостин А.Н., Житлухин А.М., Петрушевич Ю.В., Таран М.Д., Филиппов А.В., Фортков В.Е., Черковец В.Е. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110. № 5–6 (9). С. 387. <https://doi.org/10.1134/S0370274X19180061>
8. Модуль аналогового ввода АIN8-U60 [Электронный ресурс]. URL: <http://dep.ru/catalog/68/ain8-u60/>