

УДК 621.316.06

МНОГОКУЛОННЫЕ ГАЗОВЫЕ РАЗРЯДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНИКЕ (обзор)

© 2021 г. А. В. Харлов*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

**e-mail: akharlov@lef.hcei.tsc.ru*

Поступила в редакцию 14.04.2020 г.

После доработки 22.04.2020 г.

Принята к публикации 25.04.2020 г.

Сильноточные высоковольтные замыкающие разрядники являются ключевыми компонентами импульсных источников питания на основе энергоемких конденсаторных батарей. Самыми распространенными на сегодняшний день являются искровые разрядники благодаря относительно простой конструкции, надежности, простоте обслуживания и ремонта. Основным недостатком искровых промежутков является ограниченный срок службы, что прямо или косвенно связано с эрозией электродов. Для предотвращения эрозии электродов были предложены многоканальные разрядники и разрядники с движением канала разряда. В этом обзоре рассмотрены оба типа разрядников, и в обоих случаях Отдел импульсной техники ИСЭ СО РАН занимает лидирующие позиции в мире по их разработке.

DOI: 10.31857/S0032816220060099

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность тематики определяется широкой областью применения многокулонных замыкающих разрядников: для систем питания на основе энергоемких конденсаторных батарей для мощных лазеров [1–3], электромагнитных ускорителей [4, 5], установок по получению высоких импульсных магнитных полей [6], дробления материалов [7, 8], испытаний на электромагнитную совместимость [9] и т.д. Разрядник характеризуется напряжением пробоя, током и переносимым зарядом.

Существует несколько вариантов замыкающих разрядников: игнитроны, вакуумные разрядники, твердотельные разрядники, газовые (искровые) разрядники. Самыми распространенными на сегодняшний день являются искровые разрядники благодаря относительно простой конструкции, надежности, простоте обслуживания и ремонта. Наносекундные разряды были очень хорошо исследованы как теоретически, так и экспериментально [10–13 и ссылки в них]. Однако для разрядников с комбинацией большого тока (несколько сотен килоампер) и большой длительности импульса (от нескольких сотен микросекунд до миллисекунд), т.е. разрядников с высоким переносом заряда (многокулонных), это явление остается в значительной степени неис-

следованным из-за сложности вовлеченных процессов.

Экспериментальные исследования таких разрядников также ограничены, поскольку требуются большие конденсаторные батареи. Разрядник должен иметь высокий ресурс — много десятков тысяч импульсов без ухудшения характеристик. Эрозия электродов является одним из определяющих факторов для ресурса работы [14–16]. В ряде разрядников электроды просто заменяются после определенного количества срабатываний (например, разрядник ST-300A компании Maxwell, применяемый в крупнейшей лазерной установке США — National Ignition Facility (NIF) [17]).

Принцип движения плазменного канала в магнитном поле используется как в замыкающих (искровые разрядники), так и в размыкающих (вакуумные прерыватели) устройствах сильноточной импульсной техники, а также в ускорителях плазмы. Во многих работах исследовалось движение плазменного канала в линейной рельсотронной геометрии применительно к генерации высокоскоростных плазменных потоков [18, 19]. Движение канала приводит к уменьшению плотности энергии, выделяющейся на электродах, и, как следствие, к снижению эрозии электродов. Известны газовые разрядники кольцевого типа с вращением канала разряда в собствен-

ном магнитном поле (аналогично вакуумным размыкателям [20, 21]). Во всех указанных выше работах применялся однополярный импульс, колебательный режим не исследовался.

В отделе импульсной техники ИСЭ СО РАН более 10 лет назад Б.М. Ковальчуком с сотрудниками были разработаны многокулонные газовые разрядники атмосферного давления с электродинамическим ускорением канала разряда [22] для конденсаторных модулей крупнейшей лазерной установки LMJ (Франция) [23]. В окончательной конфигурации LMJ 480 модулей конденсаторной батареи будут работать одновременно. Большое количество модулей в установке LMJ предъявляет жесткие требования к параметрам коммутационной системы.

К ним относятся надежность (30 лет расчетного срока службы LMJ), минимизация затрат, способность выдерживать режим отказов, стабильность от выстрела к выстрелу в контролируемых параметрах, ограничения по габаритам и массе, простота обслуживания и ряд других технических требований. Общее значение “ ± 5 мкс” задается как критерий одновременности при переключении 480 модулей. На уровне модуля этот критерий одновременности понимается как изменение времени переключения по пакету в 300 нс (предварительная ионизация и основной разряд) для каждого из двух модулей установки.

Эти разрядники обладали некоторыми недостатками, в частности имели ограниченный динамический диапазон рабочего напряжения. Несколько лет назад в Отделе импульсной техники ИСЭ СО РАН был разработан двухэлектродный коммутатор [24], являющийся развитием коммутаторов LMJ. Он состоит из включенных последовательно двухэлектродного разрядника с электродинамическим ускорением канала разряда и насыщающегося дросселя. Была продемонстрирована возможность включения коммутатора с высокой стабильностью в полном диапазоне напряжений 1–24 кВ при напряжении самопробоя 50 кВ.

Еще одним важным аспектом при анализе мощных импульсных систем накопления энергии является неизбежная генерация электромагнитных помех. Детальное исследование этих явлений было выполнено во время тестов на NIF [25]. Минимизация рассеянных магнитных полей в силовых индукторах исследовалась автором в работах [26, 27].

В некоторых технологических применениях (в частности, для интенсивно развивающегося метода магнитной формовки материалов [28, 29]) необходим колебательный режим разряда с малым декрементом затухания. Недавно Б.М. Ковальчуком с сотрудниками был разработан и исследован разрядник [30, 31] для колебательного

режима разряда с малым декрементом затухания в широком диапазоне амплитуды тока и длительности импульса.

В разделе 2 будет дано описание разрядников с электродинамическим ускорением канала разряда, разработанных в ИСЭ СО РАН, проведено их систематическое сравнение с мировыми аналогами, показаны преимущества разрядников ИСЭ СО РАН. Также будет рассмотрено моделирование движения плазмы и потери энергии в разрядниках.

Второй путь развития многокулонных разрядников — использование многоканального пробоя. Известны газовые разрядники линейной рельсотронной геометрии [32] компании Maxwell (модель 40 302), использовавшиеся во многих лазерных установках США. В этих разрядниках разряд распределяется по площади электродов с помощью многоканального инициирования разряда. Главной проблемой данного подхода является трудность равномерно распределить ток между каналами.

Этот вариант также разрабатывался Б.М. Ковальчуком с сотрудниками. Примерно 20 лет тому назад в ИСЭ СО РАН был создан импульсный трансформатор, получивший название “ступень LTD” (см. [33] и ссылки там). Ее первичный накопитель представляет собой батарею конденсаторов, включенных параллельно, которые после замыкания разрядников через выходные шины включаются на общую нагрузку. Особенностью ступени LTD является малая емкость накопительных конденсаторов (несколько десятков нанофарад).

Это позволяет получить на согласованной нагрузке ступени LTD импульс тока, нарастающий за время ~ 100 нс без использования промежуточных емкостных накопителей, что открывает возможность построения LTD-генераторов, более компактных, чем традиционные генераторы по схеме “Маркс/водяная линия”. В большинстве LTD-генераторов используется масло для изоляции первичных ступеней.

Около 10 лет назад в ИСЭ СО РАН был разработан ряд ступеней LTD с воздушной изоляцией при атмосферном давлении [34, 35]. Такой подход существенно упрощает конструкцию и эксплуатацию генераторов. Для этих LTD-ступеней разработана серия многоканальных многозачерных искровых разрядников, работающих в среде воздуха атмосферного давления при зарядном напряжении до 100 кВ [35–37]. В отечественной и зарубежной литературе нет обзорных статей по этой тематике, так в обзоре Герасимова [38] описаны только разработанные в ВНИИ экспериментальной физики многоканальные наносекундные разрядники (до 100 кВ, 400 кА). Много-

Таблица 1. Требования к разрядникам LMJ

Параметры	Основной разрядник	Разрядник предыонизации
Напряжение, кВ	21–24	21–24
Амплитуда тока, кА	250	25
Длительность, мкс	~360 (на 10% от пика мощности)	~200
Разброс, нс	±300	±300
Заряд, Кл	~75	~4
Ресурс, лет	30	30
Число импульсов	20000	60000
Частота, импульсов/30 мин	1	3
Вероятность отказа	≤0.0001	≤0.0001

канальным разрядникам посвящен раздел 4 обзора.

Основными группами замыкающих разрядников являются вакуумные разрядники, разрядники высокого давления и твердотельные разрядники. В работах [39, 40] представлен обзор длительных испытаний (~ 3 года) разрядников различных типов для NIF, которые проводились на испытательном стенде в Национальной лаборатории Сандиа (Sandia National Laboratories, USA). Основными критериями оценки были стабильная работа, низкие эксплуатационные расходы, длительный срок службы (в идеале полный срок службы лазера), экологическая безопасность.

Искровой разрядник ST-300A, разработанный компанией Maxwell Physics International, был окончательно выбран для системы питания NIF в качестве компромисса между стоимостью и техническими параметрами. Этот разрядник имеет ограниченный срок службы, но относительно легко ремонтируется. Ремонт ST-300A сводится к замене графитовых электродов и, возможно, стекловолоконного изолятора (после ~2000 выстрелов). В предварительных испытаниях вероятность отказа для ST-300A была ~ 0.1%.

2. РАЗРЯДНИКИ С ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМ УСКОРЕНИЕМ КАНАЛА РАЗРЯДА

2.1. Разрядники LMJ разработки ИСЭ СО РАН

Основные требования к разрядникам приведены в табл. 1.

Основные проблемы, которые должны быть решены при разработке сильноточного многокулонного разрядника, следующие:

- 1) ограничить эрозию электродов на минимальном достижимом уровне;
- 2) исключить распыление изоляторов продуктами разряда;
- 3) не допустить механических повреждений, которые возможны из-за циклических нагрузок.

Хотя общий ресурс работы разрядников ограничивают несколько факторов, срывы в работе обычно связаны прямо или косвенно с эрозией электродов. Исследованию эрозии электродов в искровых разрядниках посвящено большое количество работ (см. [14–16] и ссылки в них). В этих исследованиях было показано, что скорость эрозии электродов в искровых разрядниках зависит от многих факторов, а именно: материала электродов, напряжения, переносимого заряда, тока через разрядник, используемого газа и его давления, магнитного поля и т.д.

С помощью высокоскоростной оптико-электронной регистрации было установлено, что катодное пятно имеет сложную структуру, с многими микропятнами внутри [41, 42]. Эти микропятна могут сливаться и дробиться в зависимости от тока и температуры поверхности. При больших токах и высоких температурах микропятна образуют скопления с перекрывающимися тепловыми полями. Два режима эрозии были идентифицированы в работе [14]: микроэрозия при взаимодействии отдельных искровых нитей с поверхностью электродов и макроэрозия с гораздо большей скоростью, когда в интегрированном катодном пятне выделяется энергия, достаточная для начала плавления. Условие начала плавления может быть найдено при решении одномерного уравнения теплопроводности

$$\rho c(\partial T / \partial t) = \lambda(\partial^2 T / \partial x^2) \quad (1)$$

с начальными условиями

$$\lambda \partial T / \partial x = -q(t), \quad T(x, 0) = T(\infty, t) = T_0, \quad (2)$$

где ρ — плотность, c — теплоемкость, λ — коэффициент теплопроводности материала электрода, $q(t)$ — тепловой поток на поверхности электрода. Решение уравнения (1) для постоянного потока тепла с длительностью t_p было найдено Белкиным [43]. Начало плавления определяется условием

$$qt_p = 0.5\sqrt{\pi}(T_m - T_0)\rho c\delta, \quad (3)$$

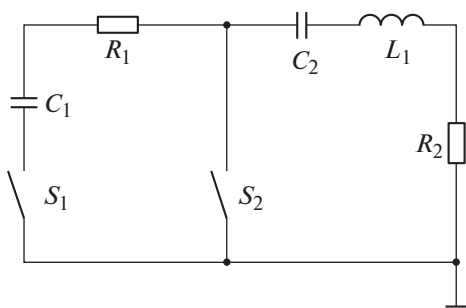


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема разрядного контура стенда. C_1 — емкость предыонизации, C_2 — основная емкость, R_1 — ограничительный резистор для цепи предыонизации, R_2 — сопротивление нагрузки, L_1 — индуктивность нагрузки, S_1 — разрядник предыонизации, S_2 — основной разрядник.

где T_m — температура плавления, T_0 — начальная температура поверхности электрода, $\delta = \sqrt{\lambda t_p / \rho c}$ — характерная глубина тепловой диффузии. Поток тепла может быть аппроксимирован как $q \approx U_c J(t)$, где $J(t)$ — плотность тока, U_c — приэлектродное падение напряжения. Можно также вычислить среднюю плотность тока в комбинированном катодном пятне, необходимую для начала плавления:

$$J^* = 0.5\sqrt{\pi(T_m - T_0)\rho c\delta/U_c t_p}. \quad (4)$$

Например, для медных электродов $U_c \sim 15$ – 20 В и при параметрах импульса основного разрядника, приведенных в табл. 1, из уравнения (4) следует $J^* \approx 10^4$ А/см². Это означает, что при неподвижном канале разряда неизбежны плавление и испарение материала электрода, поскольку плотность тока в разряде выше на порядок и более ($J \geq 10^5$ А/см²).

Принцип контроля вакуумной дуги магнитным полем, заставляющим двигаться контрагированную дугу, был реализован много лет назад в вакуумных размыкателях тока [44, 45]. Линейная геометрия вакуумного размыкателя была исследована в [46] при токе до 35 кА, и была получена скорость движения дуги до 3 км/с в собственном магнитном поле. В дуговых нагревателях для металлургических и химических процессов [47], работающих при атмосферном давлении, также применяется магнитное поле для перемещения дуги, хотя при существенно меньших токах (до 1 кА).

Кольцевые разрядники высокого давления с вращающимся каналом разряда были сконструированы по аналогии с вакуумными приборами. В работе [48] рассмотрена теоретическая модель таких разрядников, как с внешним, так и с собственным магнитным полем. Экспериментальное исследование разрядника с вращающимся каналом разряда проведено в [49] при токе до 200 кА в колебательном разряде с переносом заряда ~ 200 Кл за

импульс. В работе [50] представлено исследование коаксиального разрядника с вращающимся каналом разряда (26 кВ, 250 кА, 75 Кл), созданного в компании “Титан” (Titan Pulse Sciences Division, USA) специально для мегаджоульных конденсаторных батарей. Разрядник разработки этой компании не был принят на LMJ из-за высокой стоимости и сложности в обслуживании.

2.1.1. Стенд для испытания разрядников. Для испытаний была собрана конденсаторная батарея с параметрами, эквивалентными модулям LMJ. Эквивалентная электрическая схема разрядного контура приведена на рис. 1. Замыкание предыонизационного разрядника создает низкоэнергетический разряд, называемый предыонизационным. Замыкание основного разрядника через 200–250 мкс после предварительной ионизации генерирует высокоэнергетический разряд, передающий всю энергию нагрузке. Конденсаторная батарея C_2 для основной цепи собрана из десяти параллельно соединенных конденсаторов ТРС (310 мкФ, 24 кВ). Цепь предыонизации состоит из двух конденсаторов ТРС (40 мкФ, 24 кВ), соединенных параллельно. Разрядники установлены в середине батареи. Разрядники и предыонизации, и основной работают в сухом воздухе при атмосферном давлении с автоматической продувкой после каждого выстрела.

Блоки нагрузки размещены на обратной стороне конденсаторной батареи. Блоки нагрузки изготавливаются в виде катушек из фольги из нержавеющей стали (толщина 0.1 мм, удельное сопротивление 76 мкОм · см). Индуктивность катушки составляет 48 мкГн, а сопротивление — 0.63 Ом. Индуктивность и сопротивление катушки выбираются таким образом, чтобы форма тока в основном разряднике была близка к току ламп накаливания. Блоки нагрузки охлаждаются проточной водой, что позволяет производить выстрелы с частотой один раз в две минуты.

2.1.2. Конструкция и принцип работы разрядника предыонизации. Чертеж поперечного сечения предыонизационного разрядника представлен на рис. 2а. Втулка для установки свечи зажигания и трубные соединители для продувки воздуха приварены к корпусу цилиндра (нержавеющая сталь). Высоковольтный (в.в.) электрод крепится к корпусу разрядника узлом, состоящим из двух изоляторов и фланца. Одна сторона электрода обратного токопровода приварена к корпусу разрядника, другая сторона закреплена изолятором, установленным в отверстии на фланце. Пусковой электрод закреплен на корпусе разрядника через изолятор.

Автомобильная свеча зажигания, размещенная на корпусе напротив острия пускового электрода, служит для ультрафиолетовой (у.ф.) подсветки разрядника. Расстояние между в.в.- и пус-

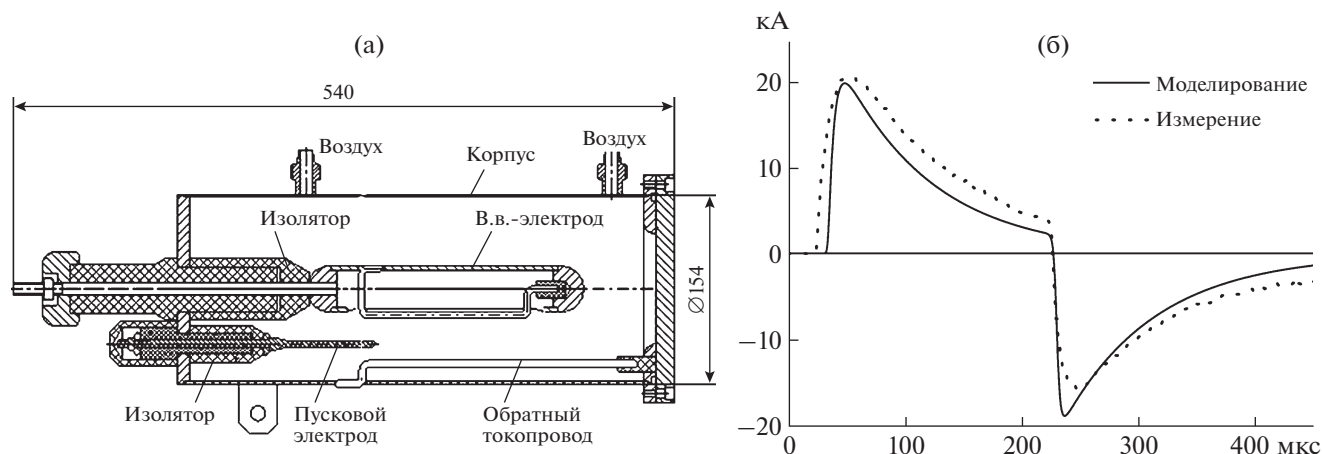


Рис. 2. Чертеж поперечного сечения предыонизационного разрядника (а) и типичные формы токовых сигналов для схемы предыонизации (б).

ковым электродом составляет 18 мм, между пусковым и заземленным электродом ~11 мм. Напряжение пробоя постоянного тока для разрядника составляет около 50 кВ.

Все электроды изготовлены из меди, поскольку эксперименты показали, что эрозия на медных электродах значительно ниже, чем на нержавеющей (вероятно, из-за высокого коэффициента теплопроводности меди). Общее количество выстрелов, выполненных с этим разрядником, составляет около 60000, с учетом 40000 выстрелов с переносом заряда 2 Кл. На этих 60000 выстрелах не было зарегистрировано ни одного самозапуска или несрабатывания (обратим внимание, что во время испытаний не проводилось никаких работ по очистке или техническому обслуживанию).

При окончательной разборке разрядника на поверхности изоляторов не было обнаружено никаких видимых следов металлических загрязнений. Эрозия электрода была небольшой, и никаких изменений в межэлектродном зазоре не наблюдалось. Дополнительным доказательством является то, что напряжение самопробоя после испытаний осталось таким же, как и в начале испытаний (48–50 кВ). Нижняя граница срабатывания осталась на уровне ~16 кВ. Среднеквадратичное отклонение разброса запусков составляло не более 60 нс при зарядном напряжении 21–24 кВ. Длина следа эрозии составила ~7 см в выстрелах с переносом заряда 2 Кл и ~13 см после выстрелов с переносом заряда 4 Кл.

На рис. 26 представлены типичные формы токовых сигналов для схемы предыонизации и результаты моделирования схемы. Перенос заряда, полученный в результате эксперимента и расчетов, равен 3.9 и 3.75 Кл соответственно.

2.1.3. Конструкция и принцип работы основного разрядника. Высоковольтные и низковольтные

электроды изготовлены из медного стержня Ø50 мм. Для основного разрядника скорость нарастания тока примерно на порядок выше, чем в предыонизационном, а для принятых диаметров электродов скорость нарастания магнитного поля в области электродов примерно такая же, как и в предыонизационном разряднике. На рис. 3а показана окончательная конструкция разрядника, которая была испытана на 22000 выстрелов с переносом заряда ~70 Кл без какого-либо обслуживания.

Высоковольтный электрод крепится к корпусу разрядника через изолятор и отжимной фланец. Труба обратного токопровода установлена на основании и закреплена болтами. Пусковой электрод с изолятором закреплен во втулке отжимным фланцем. Положение пускового электрода можно регулировать в вертикальном направлении. Свеча у.ф.-подсветки расположена на корпусе напротив острия пускового электрода.

Напряжение пробоя постоянного тока для основного разрядника также составляет около 50 кВ. Собранный разрядник с блоком запуска, распределительным в.в.-блоком и делителем напряжения установлен на консоли таким же образом, как и предыонизационный. На рис. 3б представлены типичные формы сигналов тока для основного разрядника и результаты моделирования. Перенос заряда, полученный в результате эксперимента и расчетов, равен 74 и 74.5 Кл соответственно. Между экспериментальными результатами и расчетами наблюдается довольно хорошее соответствие.

После основных испытаний на ресурс работы при атмосферном давлении были проведены дополнительные эксперименты при более низких давлениях, чтобы проверить возможность работы при более низких напряжениях. В табл. 2 приве-

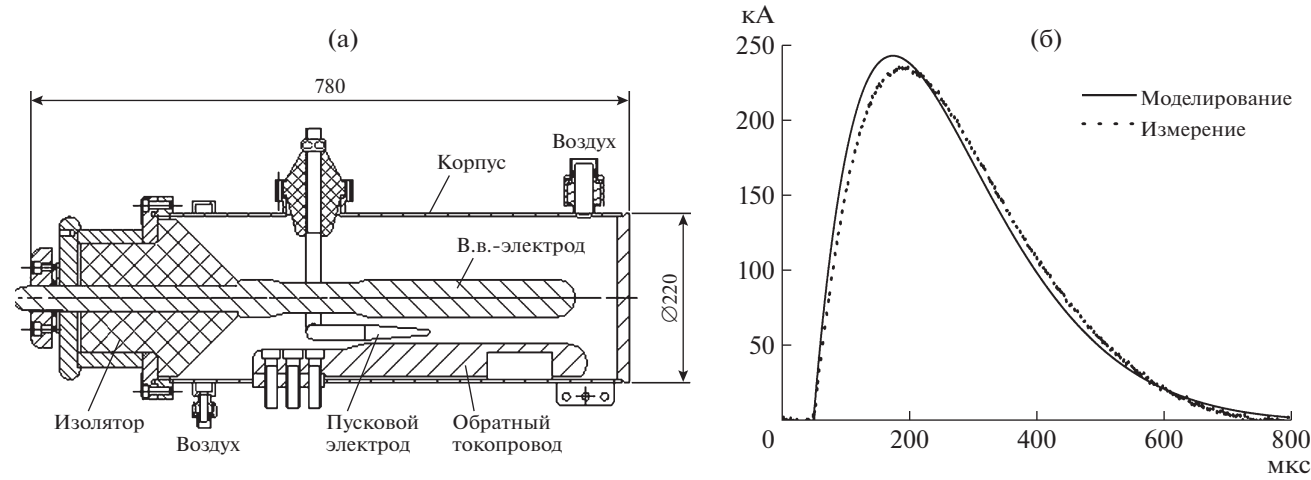


Рис. 3. Чертеж поперечного сечения основного разрядника (а) и типичные формы токовых сигналов для основного разряда (б).

дены временные задержки t и их среднеквадратичное отклонение σ при срабатывании основного разрядника и предыонизационного разрядника, полученные по 50 выстрелов при каждом давлении. В этих экспериментах была продемонстрирована возможность надежной работы до 10 кВ.

Для определения зависимости перемещения искрового канала от тока были проведены специальные исследования. Поочередно 1, 2,..., и, наконец, 10 конденсаторов подключались к коммутатору.

Исследовалась зависимость скорости перемещения искрового канала от тока:

N , шт	2	4	6	8	10
I , кА	50	100	150	200	240
V , км/с	0.5	0.9	1.2	1.5	1.9

Из этих данных видно, что как ток, так и скорость дуги имеют линейную зависимость от количества конденсаторов в батарее, поэтому перемещение пропорционально току при фиксированной длительности импульса.

Простая эмпирическая формула для скоростей дуги была приведена в [51] и воспроизведена ниже:

$$V_0 = k B^{0.6} I^{0.4} d^{-0.4} \rho_a^{-0.5},$$

где k – постоянная (4.6 для воздуха); B , Тл – поперечное магнитное поле; I , А – ток дуги; d , м – межэлектродное пространство; ρ_a – относительная плотность среды (равна единице для атмосферного воздуха). Из этой формулы сразу следует, что в нашем случае скорость дуги пропорциональна току дуги, поскольку магнитное поле линейно пропорционально току. Оценка по этой формуле дает значение $V_0 \sim 2.2$ км/с для средней скорости дуги при амплитуде тока дуги 240 кА.

В работе [5] экспериментально и теоретически исследовано влияние плотности газа на ускорение плазменного канала в рельсотроне, заполненного различными газами (ксеноном, воздухом или гелием) при атмосферном давлении. В частности, там показано, что после достижения разрядным током устойчивого значения скорость плазменного фронта остается постоянной до тех пор, пока сохраняется ток.

Максимальная скорость дуги, зарегистрированная в атмосферном воздухе при 400 кА в [5], составляла ~ 9 км/с. В нашем случае максимальная скорость в момент максимума тока примерно

Таблица 2. Значения времени задержки срабатывания t и среднеквадратичного отклонения σ в зависимости от давления

P , атм	U , кВ	Основной разрядник		Разрядник предыонизации	
		t , нс	σ , нс	t , нс	σ , нс
1.0	24	437	34.6	802	99
0.9	22	473	30.3	690	26.5
0.8	20	458	37	663	32
0.4	10	740	142	1923	444

в два раза больше средней скорости ~ 4 км/с, что соответствует значению работы [5], учитывая также разницу в токе примерно в два раза.

2.2. Двухэлектродный разрядник

2.2.1. Конструкция разрядника. На рис. 4а показано поперечное сечение двухэлектродного искрового промежутка с электродинамическим ускорением искрового канала. Легко заметить, что конструкция почти такая же, как и для основного разрядника LMJ (рис. 3а). Это обеспечивает возможность быстрого изменения конфигурации рис. 3а к рис. 4а.

Однако имеются две характерные особенности: 1) нет пускового электрода и запуск осуществляется через последовательно включенный в цепь насыщающийся индуктор; 2) на в.в.-электрод приварена коническая втулка 1 с острой кромкой, чтобы локально уменьшить межэлектродный зазор и зафиксировать там место иницирования пробоя.

При выбранном основном зазоре ~ 25 мм статическое пробивное напряжение искрового промежутка составляет ~ 56 кВ. Для трехэлектродного разрядника на рис. 3а рабочий диапазон определяется статическим пробивным напряжением ~ 55 кВ и пробивным напряжением между пусковым и низковольтным электродами ~ 18 кВ. Для двухэлектродного разрядника на рис. 4а рабочий диапазон может быть эффективно расширен до нулевого напряжения: основной зазор может быть пробит только запускающим импульсом. Для варианта рис. 3а два зазора в разряднике не могут быть пробиты одновременно при любой амплитуде пускового импульса.

2.2.2. Испытательный стенд. Схема испытательного стенда для главного разрядника приведена на рис. 4б. Здесь использована конденсаторная батарея, описанная выше ($C_2 - C_{11}$ соответствует C_2 на рис. 1). Основная специфическая особенность схемы рис. 4б заключается в том, что корпус главного разрядника соединен с землей через насыщающийся индуктор L_1 . Пусковой импульс изолирован от окружающего контура через этот индуктор. Его индуктивность очень велика во время пускового импульса, а затем резко падает в начале основного импульса.

2.2.3. Результаты тестов. Напряжение на нагрузке U_L и осциллограммы тока цепи приведены на рис. 5 при зарядном напряжении 20 кВ. По этим осциллограммам мы рассчитывали: напряжение на конденсаторах основной батареи U_C ; напряжение на основном разряднике (SW) U_{SW} ; активное сопротивление основного разрядника; энергию, рассеянную в нагрузке; энергию, рассеянную в основном разряднике. Основной целью экспериментов являлось точное определение потерь энергии в сильноточном искровом проме-

жутке при коммутации в субмиллисекундном временном диапазоне. В табл. 3 обобщены полученные результаты. Главные результаты заключаются в следующем: показано, что потери энергии в коммутаторе очень высоки при низких зарядных напряжениях ($\sim 20-25\%$ от энергии, запасенной в конденсаторной батарее при напряжении ниже 2 кВ), но не превышают 4% при напряжении выше 15 кВ. В ходе испытаний был получен очень широкий рабочий диапазон: от 1 до 20 кВ (при напряжении самопробоя 50 кВ) со стабильностью 30 нс. Разрядник может использоваться в качестве кроубарного разрядника, пробивающегося при практически нулевом напряжении. Параметры этого разрядника являются одними из лучших в мире и стимулируют его использование в различных приложениях. Основное сопротивление искрового промежутка R_{SW} падает с увеличением тока цепи. Это можно объяснить повышением температуры в плазменном канале и увеличением проводимости.

2.3. Разрядники для колебательного режима разряда батареи

Технические требования на газовый разрядник:

— диапазон рабочих напряжений	20–50 кВ
— напряжение самопробоя	90 кВ
— максимальный ток	135 кА
— максимальный перенос заряда	15 Кл
— частота срабатывания	≤ 1 импульс/15 с
— газ	осушенный воздух
— амплитуда пускового импульса	70 кВ
— фронт пускового импульса	< 100 нс

2.3.1. Обоснование выбора параметров разрядника. Движение канала разряда. Движение канала разряда по электродам разрядника позволяет уменьшить эрозию электродов и снизить запыление изоляторов в разряднике продуктами эрозии. Снижение эрозии позволяет сохранить форму электродов и обеспечить за счет этого стабильное напряжение самопробоя промежутка в разряднике и стабильность времени запаздывания срабатывания разрядника.

Скорость движения канала разряда определяется балансом магнитной силы и силы сопротивления среды, действующих на канал разряда. Магнитная сила, действующая на канал разряда, равна произведению величины тока и среднего по каналу разряда магнитного поля в данный момент времени на длину канала разряда: $F_m(t) = I(t)B_{cp}(t)d$.

Сила сопротивления среды, действующая на канал разряда: $F_p(t) = P_2(t)S$, где $S = bd$ — площадь канала разряда по нормали к направлению дви-

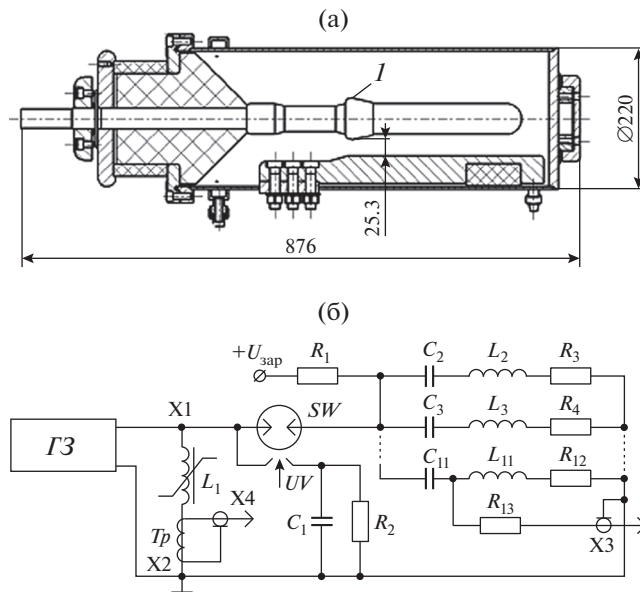


Рис. 4. Конструкция двухэлектродного разрядника (а: 1 – коническая втулка с острой кромкой на в.в.-электроре); б – схема испытательного стенда (+ $U_{зар}$ – напряжение питания, ГЗ – генератор запускающих импульсов, UV – блок у.ф.-подсветки).

жения, $P_2(t)$ – давление за фронтом ударной волны.

Для увеличения среднего магнитного поля по каналу разряда желательно уменьшать диаметр электродов и величину межэлектродного зазора. Уменьшение диаметра электродов при данном уровне напряжения повышает напряженность электрического поля в межэлектродном зазоре и ограничивает максимальное рабочее напряжение разрядника. Повышая давление в разряднике, можно увеличить рабочее напряжение, но при этом растет сила сопротивления среды, действующая на канал разряда, уменьшается скорость перемещения канала вдоль электродов, что приводит к росту эрозии.

Предварительные эксперименты по выбору диаметра электродов разрядника и межэлектродного промежутка были выполнены с электродами

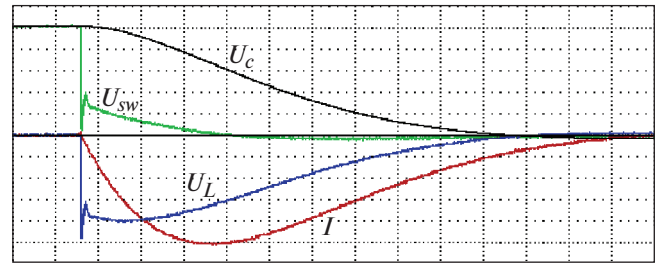


Рис. 5. Осциллограммы: U_c – напряжение на конденсаторной батарее, I – ток цепи, U_L – напряжение нагрузки, U_{sw} – напряжение на разряднике. Масштаб по вертикали: напряжения – 4 кВ/деление, тока – 40 кА/деление; по горизонтали – 50 мкс/деление.

диаметром 12, 16, 20 мм с межэлектродным зазором 40 мм. На основании результатов, полученных в этих опытах, для использования в разрабатываемом разряднике были приняты электроды $\varnothing 20$ мм.

Напряжение самопробоя разрядника. Для измерения напряжения самопробоя испытательное напряжение от высоковольтного источника подавалось кабелем на в.в.-электрод разрядника. Скорость подъема напряжения перед пробоем составляла ~ 1 кВ/с. В момент пробоя фиксировалось напряжение по прибору источника. В каждом измерении осуществлялось по 10 подъемов напряжения и определялось среднее значение. Исследовалась зависимость напряжения самопробоя $U_{сп}$ от диаметра электродов $\varnothing$ (давление атмосферное, межэлектродный зазор 40 мм):

$\varnothing$, мм	12	16	20
$U_{сп}$, кВ	63	71	77.2
E_c , кВ/см	41.5	40	39,

а также зависимость напряжения самопробоя разрядника $U_{сп}$ с диаметром электродов 20 мм от величины межэлектродного зазора d :

d , мм	20	25	30	35	40
$U_{сп}$, кВ	56	63.6	71.2	76.4	77.2
E_c , кВ/см	39.8	39.7	40.3	40.5	39,

Таблица 3. Полученные результаты ($U_{зар}$ – зарядное напряжение на конденсаторной батарее, U_{Lmax} и I_{Lmax} – напряжение нагрузки и ток в момент максимума тока, W_c – начальная энергия батареи, W_L – энергия нагрузки, W_{sw} – потери энергии в главном разряднике)

$U_{зар}$, кВ	I_{max} , кА	U_{Lmax} , кВ	R_{load} , Ом	R_{sw} , Ом	W_c , Дж	W_L , кДж	$W_c - W_L$, кДж	W_{sw} , кДж	δW , %
1.2	11.6	0.68	0.058	0.0175	2.3	1.66	0.662	0.586	25.4
2.64	26.1	1.5	0.058	0.01	10.7	8.91	1.77	1.76	16.4
5.2	52.6	3.1	0.059	0.006	42.03	38.5	3.53	3.5	9.7
10.35	103	6.26	0.06	0.0043	166.6	155.62	10.98	10.88	6.58
15.34	153.2	9.5	0.062	0.0026	365.86	350.5	15.36	14.92	4.08
20.34	202	12.95	0.064	0.0023	643.3	619.04	24.24	22.146	3.44

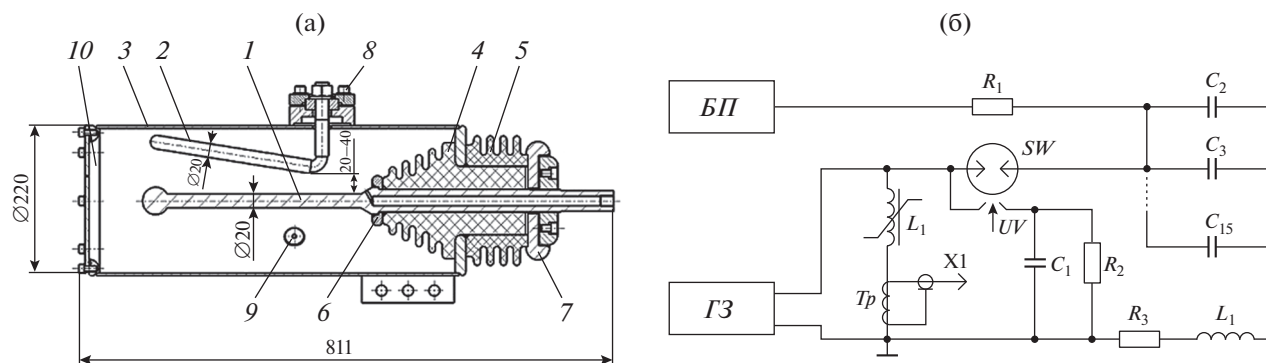


Рис. 6. Конструкция разрядника (а: 1 — в.в.-электрод; 2 — заземленный электрод; 3 — корпус разрядника; 4, 5 — элементы проходного изолятора; 6, 7 — экраны в.в.-электрода; 8 — узел крепления заземленного электрода; 9 — разрядник подсветки; 10 — крышка корпуса); б — электрическая схема испытательного стенда (БП — в.в.-блок питания, ГЗ — генератор запускающих импульсов, UV — блок у.ф.-подсветки).

где E_c — расчетная напряженность электрического поля на центральном электроде.

Как видно из приведенных данных, при диаметре электродов 20 мм и зазоре 40 мм напряжение самопробоя равно 77.2 кВ. При работе при напряжении 40 кВ напряжение самопробоя выше рабочего в 1.93 раза, а при 50 кВ — в 1.54 раза. При уменьшении межэлектродного зазора до 30 мм при зарядном напряжении 50 кВ превышение составит 1.42 раза, а при 40 кВ — 1.78 раза. Напряжение самопробоя можно повысить до 90 кВ при межэлектродном зазоре 30 и 20 мм, подняв давление до 1.4 и 1.9 ата соответственно.

Необходимое превышение напряжения самопробоя разрядника над уровнем рабочего напряжения будет зависеть от стабильности напряжения самопробоя при эксплуатации разрядника. На стабильность напряжения самопробоя влияют изменение межэлектродного зазора, состояние поверхности электродов, наличие продуктов эрозии на электродах и изоляторах разрядника, влажность и наличие примесей в воздухе, который используется для продувки разрядника.

2.3.2. Конструкция разрядника. Конструкция разрядника приведена на рис. 6а. Высоковольтный электрод разрядника 1, изготовленный из меди, установлен по центру корпуса разрядника 3 и закреплен в изоляторах 4 и 5 между экранами 6 и 7 с помощью уплотняющей шайбы. По центру электрода 1 имеется канал, по которому в разрядник подводится воздух. Конец электрода 1 сделан в виде шара для снижения напряженности электрического поля в промежутке между шаром и крышкой корпуса 10.

Заземленный электрод 2 так же изготовлен из меди и крепится к корпусу разрядника с помощью узла крепления 8. Имеется возможность изменения минимального зазора между электродами 1 и 2 от 20 до 40 мм.

Разрядник герметизирован с помощью прокладок из силиконовой резины. Через пластину, приваренную к корпусу, разрядник крепится к одному из фланцев насыщающегося дросселя. В корпус 3 основного разрядника встроен разрядник 9 для у.ф.-облучения зазора между электродами 1 и 2 в момент подачи напряжения от генератора запускающих импульсов для уменьшения статистического времени запаздывания пробоя.

2.3.3. Электрическая схема стенда. Описание конструкции. Электрическая схема испытательного стенда приведена на рис. 6б. В состав стенда входят в.в.-блок питания БП, зарядный резистор R_1 , генератор запускающих импульсов ГЗ с насыщающимся дросселем L , батарея конденсаторов C_2-C_{15} , исследуемый разрядник SW , цепь подсветки разрядника C_1-R_2 , трансформатор для измерения разрядного тока Tr (PEARSON model 1423), дополнительные резистор R_3 и индуктивность L_1 .

Батарея C_2-C_{15} заряжается от высоковольтного источника БП напряжением отрицательной полярности через зарядный резистор R_1 . Время зарядки батареи составляет ~70 с. После достижения на батарее установленного уровня напряжения срабатывает запускающий генератор ГЗ, и импульс положительной полярности прикладывается к корпусу разрядника SW и к соединенному с ним низковольтному электроду.

Корпус разрядника соединен с заземленной плитой стенда через насыщающийся дроссель L . В исходном состоянии дроссель имеет большое индуктивное сопротивление, которое поддерживает напряжение на корпусе разрядника до пробоя зазора. После пробоя происходит насыщение сердечников, индуктивное сопротивление дросселя снижается и корпус разрядника соединяется с земляной шиной через очень малое сопротивление. Батарея C_2-C_{15} разряжается, формируя в

контуре импульс тока. Для получения необходимых амплитуды и формы тока использовались дополнительные резистор R_3 и индуктивность L_1 . До пробоя основного зазора на фронте запускающего импульса пробивается разрядник подсветки и происходит облучение основного зазора у.ф.-излучением, что уменьшает разброс времени срабатывания основного разрядника. Разрядный ток регистрируется трансформатором тока Tr .

Накопитель собран из 14 конденсаторов ИК-50-3 (50 кВ, 3 мкФ). Конденсаторы расположены на изоляционной плите двумя линейками по 7 конденсаторов. Конденсаторы соединены параллельно шинами высоковольтных выводов и перемычками между корпусами. Измеренная емкость батареи составляет 39.9 мкФ.

Дополнительные резисторы для быстрого и для медленного режима изготовлены из набора спиралей, намотанных нержавеющей проволокой $\varnothing 3$ мм. Дополнительная индуктивность L_1 для быстрого режима выполнена в виде петли из стальной шины 25×4 мм. Расчетная индуктивность 0.54 мкГн.

Дополнительная индуктивность L_1 для медленного режима состоит из четырех катушек, включенных параллельно и установленных на заземленной плите стенда. Катушки выполнены из медной шины сечением 6×4 мм². Шина намотана на стеклоэпоксидную трубу внешним диаметром 130 мм и длиной 1 м. Катушки содержат по 135 витков. Индуктивность четырех катушек, включенных параллельно, 83 мкГн, сопротивление 11.1 мОм. С высоковольтным электродом разрядника батарея соединяется высоковольтным подводом.

2.3.4. Режимы для испытания разрядника. Разрядник должен работать в двух режимах разряда — быстром и медленном. Переход от одного режима к другому требует изменения схемы разрядного контура.

Методика испытаний. Накопитель стенда заряжался до напряжения 40 кВ за ~ 70 с. Все испытания в быстром и медленном режимах проводились при зарядном напряжении 40 кВ.

В каждом срабатывании регистрировались сигналы с делителя напряжения генератора запускающих импульсов и трансформатора тока Tr цифровым осциллографом. Испытания разрядника проводились сериями по 200 включений в день. Перед началом серии измерялись емкость и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) батареи стенда. После окончания серии измерялось напряжение самопробоя разрядника и осматривались элементы стенда.

Периодически разрядник разбирался, и проводились осмотр и фотографирование электродов и внутреннего изолятора разрядника, а также

измерение диаметров электродов в месте максимальной эрозии.

Разрядный контур для быстрого режима. Для реализации быстрого режима в разрядный контур стенда последовательно включаются дополнительная индуктивность $L_1 = 0.54$ мкГн и дополнительное сопротивление $R_3 = 0.0125$ Ом. На рис. 7а приведены осциллограмма тока в режиме быстрого разряда и расчетный переносимый заряд. Амплитуда тока равна 162 кА, переносимый заряд 12.3 Кл. Период колебаний 60 мкс. Полная индуктивность и полное сопротивление контура, рассчитанные по периоду и затуханию колебаний, составляют 2.0–2.2 мкГн и 0.03–0.034 Ом.

Разрядный контур для медленного режима. Для реализации медленного режима в разрядный контур стенда последовательно включаются дополнительная индуктивность $L_1 = 82$ мкГн и дополнительное сопротивление $R_3 = 0.1$ Ом. На рис. 7б приведены осциллограмма тока медленного разряда и расчетный переносимый заряд. Амплитуда тока равна 27 кА, переносимый заряд 18.5 Кл. Период колебаний 360 мкс. Полная индуктивность и полное сопротивление контура, рассчитанные по периоду и затуханию колебаний, составляют 80.5–83 мкГн и 0.132–0.142 Ом.

2.3.5. Полученные результаты. Задержка срабатывания разрядника и ее стабильность. Был определен диапазон управления разрядника. Разрядник начинает запускаться с зарядного напряжения 10 кВ. В диапазоне от 10 до 16 кВ запуск разрядника не стабилен, с пропусками. Поэтому нижняя граница диапазона управления определена как 16 кВ. Измерение задержки срабатывания разрядника проводилось при зарядном напряжении 16, 20, 30, 40 и 50 кВ для зазора между электродами в разряднике 30 и 40 мм. На каждом напряжении делалось 20 включений и вычислялось среднее значение задержки t_d и среднеквадратичный разброс σ . Результаты измерений приведены в табл. 4.

Напряжение самопробоя. Общее количество выстрелов при испытаниях составило ≈ 10000 поровну в быстром и медленном режимах. Колебания напряжения самопробоя не превышали 2%. Во время испытаний не проводилось никаких работ по очистке или техническому обслуживанию.

Состояние основных узлов разрядника. Осмотр показал состояние электродов, корпуса и изолятора.

Состояние электродов. В месте минимального межэлектродного зазора за счет эрозии диаметр электродов уменьшился на 0.3 мм. Межэлектродный зазор при этом увеличился на 0.6 мм. В зоне максимальной эрозии (минимальный межэлектродный зазор) высота выступов над поверхностью электрода ≤ 100 мкм. Поверхность выступов

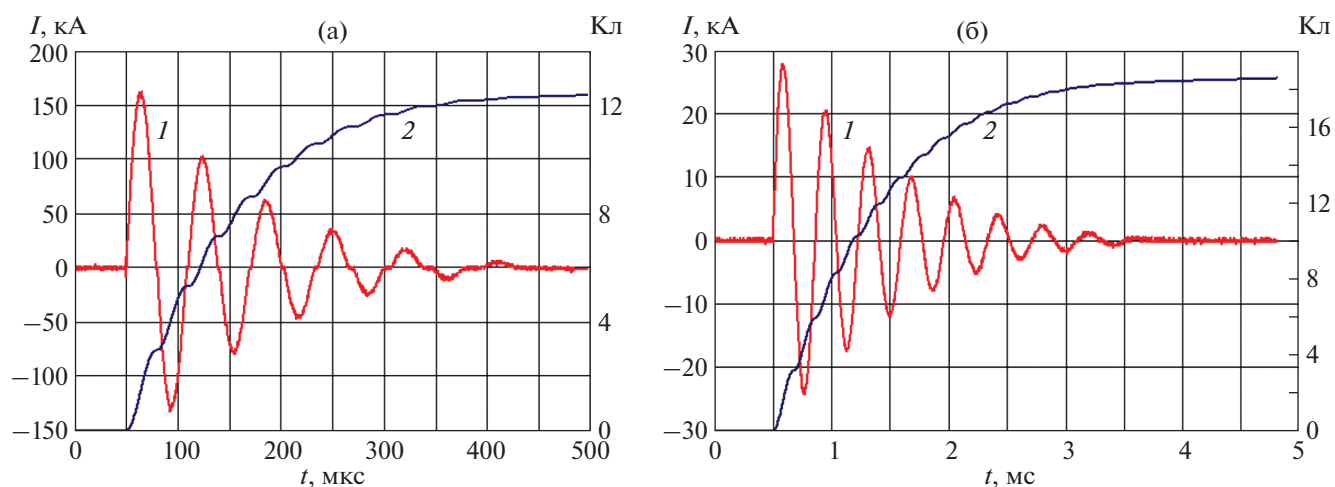


Рис. 7. Осциллограммы тока разряда (1) и расчетный переносимый заряд (2) для быстрого (а) и медленного (б) режимов.

сглажена. Эрозия электродов убывает от места минимального зазора и на расстоянии 100 мм эрозионные пятна на электродах практически отсутствуют, и след от разряда равномерно распределен по поверхности электрода, обращенной в сторону межэлектродного зазора.

Корпус разрядника. На внутренней поверхности корпуса в конце заземленного электрода после работы в медленном режиме разряда возникают эрозионные пятна. Очевидно, в этой зоне канал разряда с низковольтного электрода может переходить на корпус. Зона, на которой расположены эрозионные пятна на корпусе, $\sim 30 \text{ см}^2$. Эрозия незначительна. Напряженность электрического поля около поверхности корпуса минимальная. Можно не ожидать влияния появления этих пятен на напряжение самопробоя разрядника и пусковые характеристики.

Состояние изолятора. Ребра изолятора, обращенные в сторону канала разряда, покрыты порошком окиси меди. Максимально запылены первое и второе ребра в секторе напротив канала. На поверхности ребер, обращенных в сторону, противоположную от канала разряда, запыления практически не видно. Никаких проблем, связанных с перекрытием изолятора при эксплуатации в медленном и быстром режимах и при определении напряжения самопробоя, не возникало.

2.2.6. Выводы по полученным результатам. На основании результатов испытаний можно сделать следующие выводы.

- Разрядник с рабочим напряжением 50 кВ может быть создан с межэлектродным зазором 30–40 мм (минимальный зазор между электродами). При этом давление воздуха в разряднике может быть равно атмосферному либо увеличено до 1.1–1.2 ата.

- Результаты эксплуатации разрядника в медленном и быстром режимах при рабочем напряжении 40 кВ и запасаемой энергии 32 кДж позволяют надеяться на возможность достижения срока службы ~ 50000 срабатываний.

- Подача воздуха в объем разрядника через центральный электрод сразу после выстрела с расходом $\sim 8 \text{ л/с}$ позволяет охлаждать электроды разрядника, удалять продукты эрозии электродов, уменьшать скорость запыления поверхности изолятора, находящегося внутри разрядника.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В настоящее время имеется большое количество работ по моделированию движения плазмы с применением одномерной [52] или двумерной [53] магнитной гидродинамики как в вакууме, так и в газах различной плотности. Также имеется ряд работ, в которых рассматривается задача передачи тепла на электроды при взаимодействии с дугой.

В работе [54] проведено двумерное моделирование нагрева медных электродов в геометрии вакуумного прерывателя. Недостаток работы [54]

Таблица 4. Значения задержки t_d и среднеквадратичного разброса σ

U, кВ	Зазор 30 мм		Зазор 40 мм	
	t_d , нс	σ , нс	t_d , нс	σ , нс
16	104.4	9.2	167.9	25.0
20	83.6	4.8	145.7	14.5
30	40.1	1.3	97.0	5.3
40	34.9	0.9	42.4	1.8
50	32.1	0.7	38.6	1.8

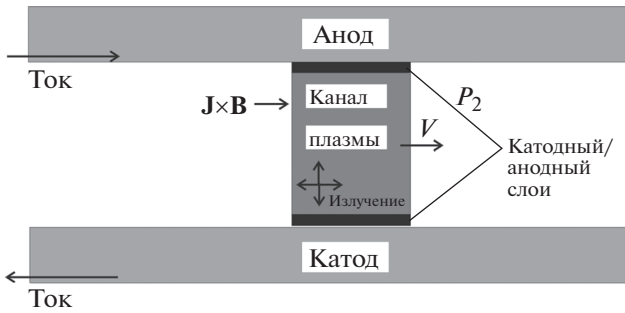


Рис. 8. Схема движения дуги. J — плотность тока.

состоит в искусственном задании потока энергии без связи с внешней цепью.

В работе [55] проведено двумерное моделирование распределения температуры на контактной поверхности вакуумного прерывателя и сравнение с экспериментальными результатами для той же геометрии. При расчете эрозии электродов в реальных устройствах также используются полуэмпирические модели типа [56] с набором коэффициентов для согласования с экспериментом.

В большинстве работ при моделировании пренебрегается зависимостью теплофизических параметров от температуры. Кроме того, следует констатировать, что в настоящее время при расчете сильнотоковых устройств с плазменными токовыми каналами раздельно решаются задачи движения плазмы и передачи тепла на электроды. В действительности должна решаться комбинированная задача, поскольку тепловые процессы на электродах могут влиять на движение плазмы (например, из-за присоединения испаряемого материала электродов к плазме). До сих пор не проводилось решения таких задач.

В работах автора [16, 57] разработана комбинированная модель движения плазмы в разрядниках с электродинамическим ускорением канала разряда, позволяющая рассчитывать движение плазмы и нагрев электродов самосогласованно. Проведены расчеты для униполярного и колебательного режимов в широком диапазоне параметров, подтверждено хорошее согласие с экспериментом.

3.1. Движение дуги

Расчетная модель и уравнения подробно описаны в [16, 57]. Движение дуги в канале рельсотрона (рис. 8) может быть описано как движение подвижного токового контура под действием ускоряющей силы со стороны магнитного поля и силы сопротивления среды, которая действует на поверхность плазменной перемычки. Движение дуги приводит к появлению ударной волны с давлением P_2 впереди ускоряющегося плазменного канала (P_1 — давление невозмущенного газа).

Уравнения движения при этих условиях записываются как:

$$\frac{d(mv)}{dt} = I(t)B(t)l - P_2S, \quad (5)$$

$$\frac{d(m)}{dt} = \alpha I^2, \quad (6)$$

где I — ток в цепи; B — магнитное поле в области дуги; l — длина дуги (высота рельсового канала); P_2 — давление в области между ударной волной, движущейся впереди плазменной перемычки в стационарном газе со скоростью V_1 , как выводится в теории ударных волн в газах, и плазменным каналом; S — эффективная площадь плазменной перемычки. Параметр абляции α учитывает только массу, включающуюся в движение вместе с ускоряющейся плазмой. Начальные условия для уравнений (5), (6) очевидны: $v(0) = 0$, $m(0) = m_0$. За m_0 берется масса столба воздуха атмосферного давления. Давление P_2 много больше атмосферного давления при интересующих нас параметрах разряда и может быть записано в приближении сильной ударной волны, т.е.

$$P_2 = \frac{\gamma + 1}{2} \rho_1 v^2, \quad (7)$$

где γ — показатель адиабаты, ρ_1 — плотность воздуха при атмосферном давлении, т.е. 1.29 кг/м^3 .

Подставив (7) в уравнение (5), получим нелинейное дифференциальное уравнение для скорости v . Это уравнение может быть решено численно при произвольных параметрах, но для малых масс хорошая аппроксимация достигается в приближении нулевой массы, приравняв нулю левую часть уравнения (1), что приводит к выражению:

$$v(t) = \sqrt{2IBl/(\gamma + 1)\rho_1 S}. \quad (8)$$

В самом деле, время формирования и характерное расстояние формирования ударной волны при равноускоренном движении могут быть записаны следующим образом:

$$t_0 = \frac{2c_0}{(\gamma + 1)a_0}, \quad x_0 = a_0 t_0^2/2, \quad (9)$$

где a_0 и c_0 представляют начальное ускорение и невозмущенную скорость звука в воздухе.

Принимая во внимание начальную массу плазменного столба и скорость эрозии, измеренную в [14] как 100 мкг/Кл , масса плазмы может быть оценена как $m \leq 0.02 \text{ г}$ при токе 250 кА , и из формул (9) получается $t_0 \sim 0.2 \text{ мкс}$, $x_0 \sim 0.003 \text{ см}$. Временные и пространственные масштабы формирования ударной волны много меньше характерных значений задачи, поэтому формирование ударной волны может рассматриваться как мгновенное.

венное в момент образования плазменного канала.

На рис. 9 показано сравнение скорости дуги, рассчитанной по формуле (8), с численным решением уравнений (5), (6) с ненулевым коэффициентом абляции. В расчете использовался типичный ток разряда (рис. 3б) из работы [22]. Из этого графика можно видеть, что при $m \leq 0.12$ г приближение нулевой массы является вполне приемлемым, а оценка остается справедливой и при больших массах.

Средняя скорость находится в диапазоне 1.7–1.9 км/с для кривых, представленных на рис. 9. Отметим, что средняя скорость движения искрового канала, измеренная в [22], составила ~ 1.8 км/с, что свидетельствует о хорошем согласии теоретических и экспериментальных данных. Сравнение с результатами работы [5], где рассматривалось движение плазменного канала в линейном рельсостроне, также дает хорошее согласие.

3.2. Нагрев электродов

При движении плазменного канала вдоль электродов (координата z) поток тепла на позиции $z(t)$ может быть записан как:

$$\delta Q_e(z(t)) = (U_e I(t) + \Psi_r S_e) \delta z / v(t) \quad (10)$$

или

$$\delta Q(z) / \delta z = (U_e I(t) + \Psi_r S_e) / v(t), \quad (11)$$

где U_e — падение напряжения на катодном (анодном) слое, Ψ_r — полная плотность мощности излучения, S_e — площадь пятна дуги катода (анода). Моделирование излучения плазменного канала весьма сложно. Частичный захват материала абляции плазменным каналом приводит к плазменному состоянию, включающему смесь газа и металлического пара. Добавление паров металла не только увеличивает излучаемую мощность, но и увеличивает электропроводность в зонах, окружающих дугу. Оба эти эффекта имеют тенденцию уменьшать температуру на оси дуги. Подробный обзор различных аспектов моделирования термической плазмы (включая силовоточные электрические дуги) дан в работе [58].

Излучение состоит из линейчатого излучения атомов и ионов и непрерывного излучения. Хотя обработка линейчатого излучения является наиболее сложной задачей, его необходимо учитывать, поскольку оно часто является основным компонентом передачи радиационной энергии [59, 60].

Типичные диаметры дуги при микросекундных импульсах с током более 100 кА можно оценить в 15–20 мм. В наших расчетах был принят диаметр дуги 15 мм, соответствующий ширине следа дуги, наблюдаемой в [22]. Плотность тока превышает 20 кА/см² во всех режимах, рассмот-

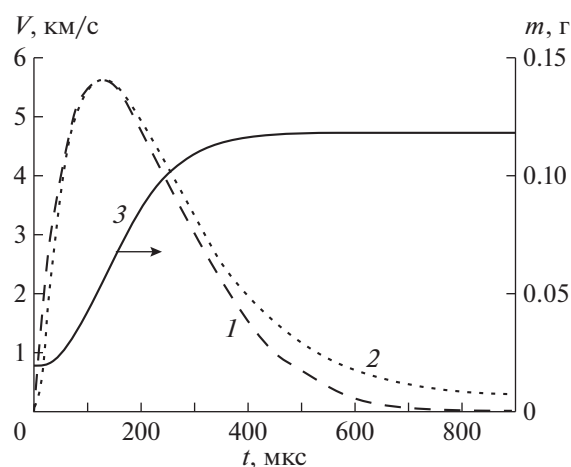


Рис. 9. Скорость движения плазменного канала: 1 — при нулевом коэффициенте абляции ($\alpha = 0$), 2 — при ненулевом α ; 3 — расчетная масса плазмы канала.

ренных в настоящей работе, и поэтому локально термодинамически равновесная плазма (кроме излучения) при характерных временах > 100 мкс является допустимым приближением. Площадь катодного пятна значительно меньше общей площади поверхности плазменного канала, а это означает, что потери излучательной энергии значительно больше энергии, подаваемой на электроды.

Сталь, медь, вольфрам и молибден рассмотрены здесь в качестве материала электродов, поскольку они используются наиболее часто в реальных конструкциях.

На рис. 10а приведена временная зависимость температуры поверхности электрода для этих материалов ($T_0 = 293$ К — начальная температура). На рис. 10б показано распределение температуры по глубине в момент времени $t = 600$ мкс. Из рис. 10 можно было видеть, что температурное распределение в этот момент времени самое плавное у меди и самое резкое у стали. Из этих соображений медь является предпочтительным материалом для электродов по сравнению с другими материалами, рассмотренными в расчетах, благодаря высокой теплопроводности меди, несмотря на более высокие температуры плавления остальных материалов.

В табл. 5 сравнивается максимальная температура на поверхности электрода $T_{\max}$ для стали, меди, молибдена и вольфрама с температурой плавления $T_{\text{пл}}$ для этих материалов (как с учетом, так и без учета излучения). Здесь также показана длина диффузии δ . Из табл. 5 видно, что для стального электрода максимальная температура на поверхности значительно превышает температуру плавления, в то время как для всех других материалов $T_{\max} \leq T_{\text{пл}}$.

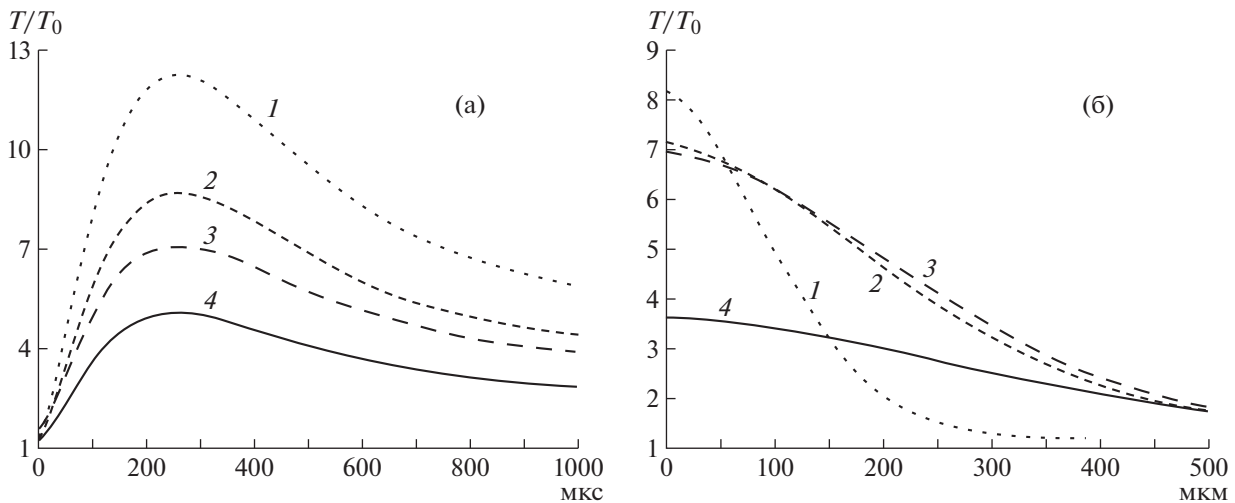


Рис. 10. Зависимость температуры на поверхности катода от времени (а); б — распределение температуры по глубине электрода в момент времени $t = 600$ мкс. 1 — сталь, 2 — молибден, 3 — вольфрам, 4 — медь.

3.3. Моделирование газовых разрядников с электродинамическим ускорением канала разряда для колебательного режима разряда конденсаторной батареи

3.3.1. Расчеты электрического и магнитного поля. Расчетная геометрия разрядника приведена на рис. 11а. В расчетной геометрии два параллельных цилиндрических электрода заключены в общий корпус. Несколько противоречивые требования возникают при сравнении движения дуги под действием магнитного поля и требуемой электрической прочности. На рис. 11б показано изменение напряженности электрического поля в промежутке между электродами. Видно, что электрическое поле резко неоднородно с максимумом на высоковольтном электроде и минимумом в середине зазора с различием примерно в 3 раза. Требование получения высокого магнитного поля обуславливает малый радиус электродов, что, очевидно, приводит к повышению электрического поля на электродах. Заземленный корпус также оказывает существенное влияние на распределение электрического поля, “отталкивая” поле от низковольтного (заземленного) электрода.

Таблица 5. Максимальная температура на поверхности катода (без излучения/с излучением)

Материал электрода	$T_{\max}$, К	$T_{\text{пл}}$, К	$T_{\max}/T_{\text{пл}}$	$\delta = \sqrt{\lambda t_p / \rho c}$
Сталь	2988/3585	1808	1.65/1.98	40
Медь	1230/1476	1358	0.9/1.08	120
Вольфрам	1945/2334	3695	0.53/0.64	70
Молибден	2139/2566	2623	0.81/0.97	80

Ниже приведены результаты расчетов магнитного поля (максимального $B_{\max}$ и среднего B_{av}) на линии между электродами для двух значений радиуса r электродов (10 мм и 15 мм) и расстояния d между электродами (для тока 150 кА):

d , мм	40	50	60
$B_{\max}$, Тл (r_{10}/r_{15})	3.86/3.07	3.6/2.7	3.36/2.47
B_{av} , Тл (r_{10}/r_{15})	2.9/2.21	2.35/2.24	2.01/1.82

Отсюда видно, что магнитное поле в основном определяется радиусом электродов, а расстояние между электродами влияет слабо, несколько понижая среднее значение.

3.3.2. Моделирование движения канала разряда. Расчеты проводились для условий эксперимента, описанных в [30]. Осциллограммы тока были приведены выше на рис. 7. На рис. 12 приведены расчетные скорости движения искрового канала в быстром (рис. 12а) и медленном (рис. 12б) режимах. В табл. 6 даны результаты расчетов для максимальной скорости искрового канала и его перемещения под действием силы магнитного поля. Полученные значения для полного перемещения несколько выше, чем экспериментальные. Это объясняется вкладом расчетного хвоста скорости в смещение, хотя в эксперименте искра к этому времени исчезает. Соотношения перемещения для быстрого и медленного режимов соответствуют экспериментальным (примерно как отношение общего переносимого заряда, как следует из модели). Для эффективного движения канала необходимо, чтобы смещение за первый полупериод было сравнимо или превышало межэлектродный зазор. Нагрев электродов для этих режимов не превосходит 600 К.

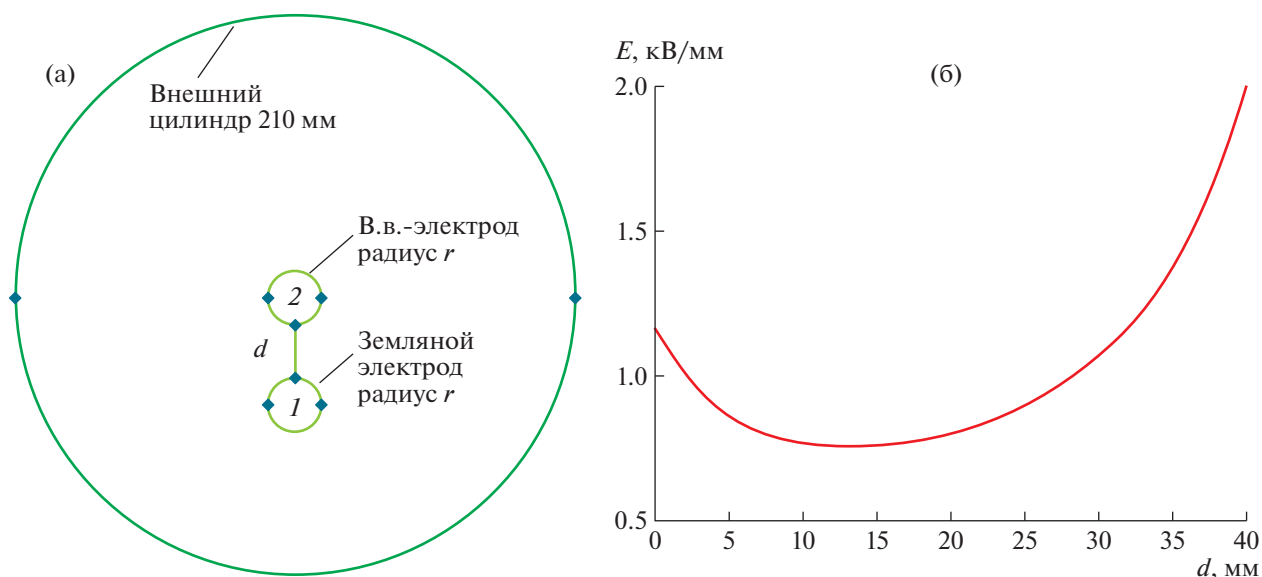


Рис. 11. Расчетная геометрия разрядника (а: d – расстояние между электродами, r – радиус электродов); б – напряженность электрического поля на линии между электродами от точки 1 (земляной электрод) до точки 2 (в.в.-электрод).

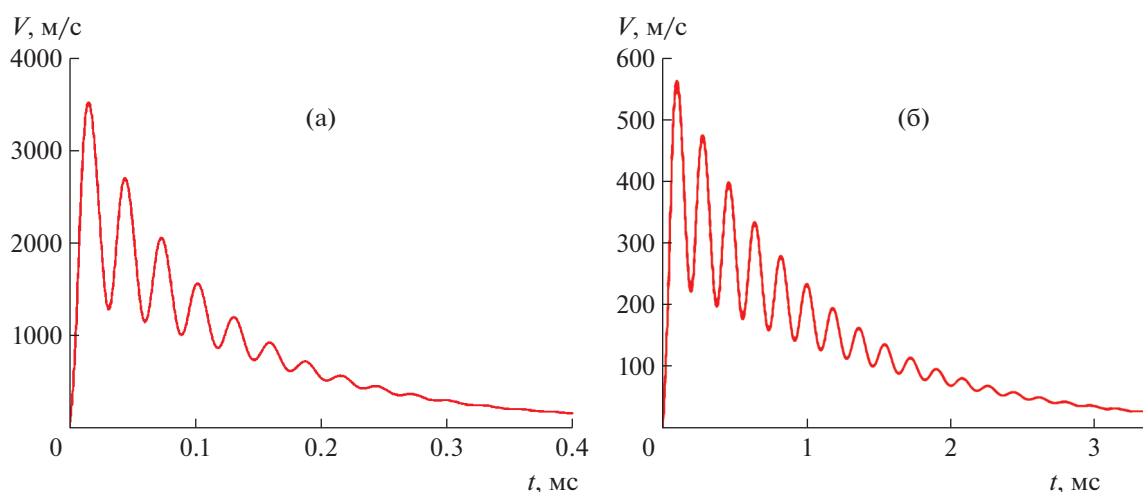


Рис. 12. Расчетные скорости движения искрового канала в быстром (а) и медленном (б) режимах.

3.3.3. Моделирование кольцевых газовых разрядников с электродинамическим ускорением канала разряда для оптимизации геометрии. Расчетная геометрия разрядника приведена на рис. 13а. В расчетной геометрии два параллельных кольцевых электрода заключены в общий корпус. На рис. 13б показана двумерная картина электрического поля. Видно, что электрическое поле симметрично между электродами, в отличие от плоской геометрии, что позволяет расширить диапазон управления разрядником на $\approx 50\%$. Еще один существенный критерий выбора геометрии разрядника – напряженность электрического поля на изоляторе. Были проведены расчеты при неизменной геометрии электродов с изменением диаметра изолятора (рис. 13а). Результаты расчетов напряженности

электрического поля на поверхности изолятора следующие:

$D_{\text{из}}, \text{ мм}$	210	230	250	270	290	330	370
$E_{\text{max}}, \text{ кВ/см}$	6.6	5.4	4.5	4.0	3.7	3.45	3.37

Таблица 6. Результаты расчетов для максимальной скорости искрового канала и его перемещения под действием силы магнитного поля (S – полное перемещение, $S1$ – за первый полупериод)

Режим	$V_{\text{max}}, \text{ м/с}$	$S, \text{ м}$ (расчет/эксперимент)	$S1, \text{ м}$ (расчет)
Быстрый	3500	0.27/0.18	0.053
Медленный	600	0.35/0.25	0.056

Видно, что при диаметре ≈ 280 мм поле по поверхности менее 4 кВ/см, т.е. вполне рабочее значение для любого материала изолятора.

4. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ РАЗРЯДНИКИ

Известны газовые разрядники линейной рельефотронной геометрии [32] компании Maxwell (модель 40 302 и ее модификации), использовавшиеся в большинстве крупных лазерных установок США, таких как Shiva [61], Nova [62]. Модификация таких разрядников также была применена на установке Atlas [63]. Конденсаторная батарея Atlas состоит из 96 модулей Маркса (36 МДж, 240 кВ). Система рассчитана на пиковый ток 45–50 МА с временем нарастания 4–5 мкс. В батарее использовано 300 замыкающих разрядников.

В этих разрядниках разряд распределяется по площади электродов с помощью многоканального инициирования разряда по принципу искажения поля на среднем электроде [64]. Работа многоканальных газовых разрядников зависит от множества статистически изменяющихся факторов. Количество каналов, образующихся в зазоре, зависит от индуктивности замыкающей дуги, импеданса токоподвода разрядника, среднего разделения между каналами, дисперсии в напряжении, необходимом для пробоя зазора, скорости нарастания пускового импульса, электрического поля вдоль поперечного сечения разрядника, плотности заполняющего газа и т.д.

В работе [65] было исследовано влияние многих параметров на работу многоканального многогазорного искрового разрядника с тороидальными электродами.

В статье Герасимова [38] дан обзор разработанных в РФЯЦ–ВНИИЭФ многоканальных (несколько десятков) низкоиндуктивных (~ 1 нГн) газонаполненных разрядников с ламельными управляющими

электродами на рабочее напряжение ≤ 100 кВ и коммутируемый ток до 400 кА. Управляющие электроды в виде узких тонких пластин находятся под промежуточным потенциалом в зазоре между двумя общими основными электродами — высоковольтным и низковольтным (заземленным) — равномерно по их длине.

При одновременном изменении потенциала ламелей за время < 15 нс подачей сигнала по цепям запуска в объеме газа возмущается распределение электрического поля. Напряженность поля на поверхностях электродов и особенно на краях ламелей резко возрастает, и с них синхронно развиваются пробои на один, затем на второй или сразу на оба основных электрода. Идейно эти разрядники близки к разрядникам Maxwell 40302 с искажением поля.

В работе [66] исследован многоканальный газовый разрядник с поджигом плазменными стужками. Стужки генерировались шестиканальной кольцевой микроплазменной пушкой, встроенной в пусковой электрод. Происходил пробой газа в нескольких местах вокруг струйных отверстий. В этой работе было установлено, что среднее число разрядных каналов увеличивалось по мере увеличения энергии поджига. Максимальное число каналов достигало 4. Ниже будут описаны разрядники разработки ИСЭ СО РАН.

4.1. 20-канальный 7-ззорный разрядник коаксиального типа

20-канальный 7-ззорный разрядник коаксиального типа был применен в генераторе тока с регулируемой формой импульса [67]. Конструкция разрядника приведена на рис. 14а. Высоковольтный электрод 2 закреплен с изолятором 4 на высоковольтном выводе конденсатора 1. Промежуточные электроды 3 закреплены на изоляционном корпусе 4 с помощью болтов. Низковольтный

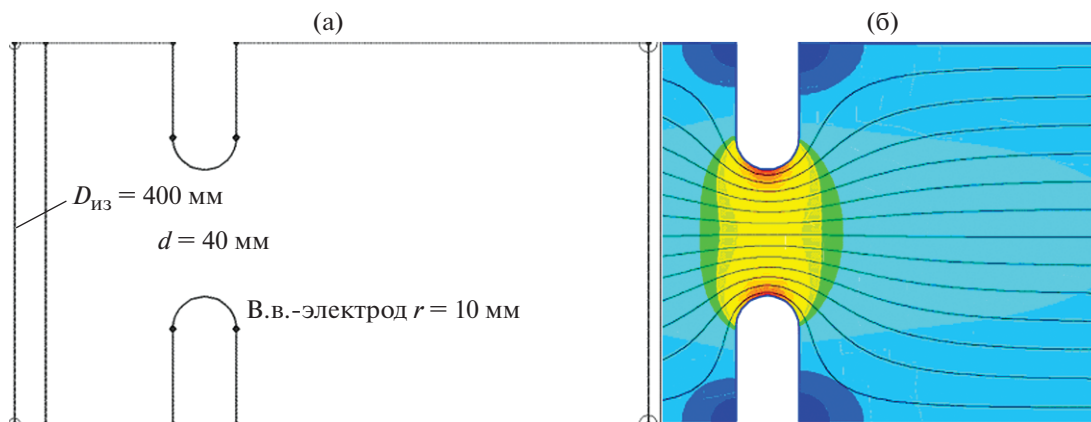


Рис. 13. Расчетная геометрия разрядника (а: d — расстояние между электродами; r — радиус электродов); б — двумерная картина электрического поля.

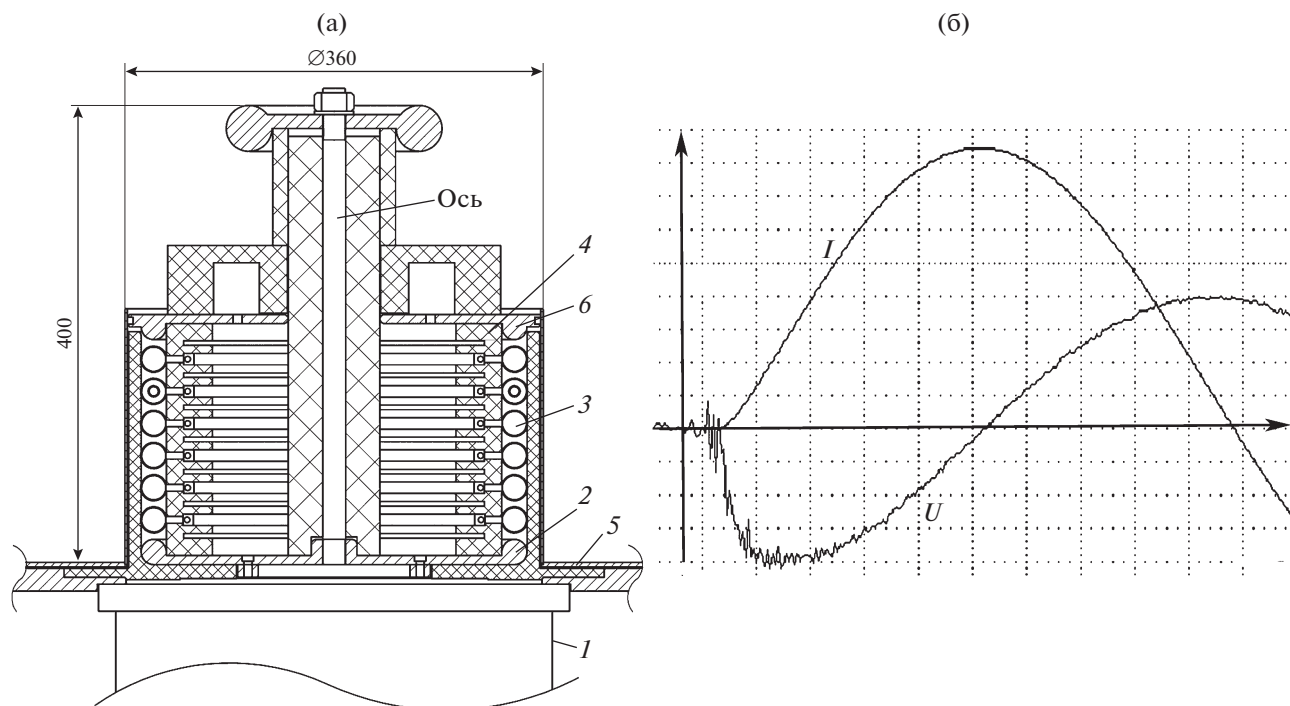


Рис. 14. Конструкция коаксиального 20-канального 7-зазорного разрядника (а: 1 — корпус основного конденсатора; 2 — потенциальный электрод; 3 — промежуточные сферические электроды; 4 — корпус изолятора; 5 — верхний электрод полосковой передающей линии; 6 — низковольтный электрод); б — осциллограммы напряжения на индуктивной канавке и пересчитанного из него тока в короткозамкнутой нагрузке (масштаб по вертикали: напряжения — 100 В/деление, тока — 100 кА/деление; по горизонтали — 100 нс/деление).

электрод 6 разрядника установлен на корпус, и вся конструкция стянута с помощью шпильки. Контакт между низковольтным электродом и корпусом осуществляется пружиной, расположенной в канавке электрода (на рисунке не показана).

Высокое напряжение распределяется по зазорам резистивным делителем. Резисторы делителя расположены в канавках изолятора 4 (на рисунке не показаны). Выравнивание напряжения по каналам осуществляется с помощью проводящего резинового шнура с высоким удельным сопротивлением. Шнуры вставлены в отверстия болтов каждого ряда промежуточных электродов.

Пусковая цепь разрядника представляет собой отрезок кабеля РК-75-9 без оплетки, вставленный в отверстия электродов второго ряда. Концы кабеля выведены из разрядника через отверстие в низковольтном электроде. При запуске разрядника на пусковой кабель подается импульс отрицательной полярности амплитудой ~ 120 кВ.

Испытания проводились на зарядных напряжениях 50, 60, 70, 80 кВ и замыкании тока по одной и по двум сторонам. Результаты приведены в табл. 7.

Проведенные испытания показали успешную работу коаксиального многозазорного разрядника в модельном эксперименте с одним конденсато-

ром и возможность его использования в качестве коммутирующего элемента первичного контура генератора тока. На короткозамкнутой нагрузке получен ток ~ 800 кА с временем нарастания ~ 500 нс.

4.2. Разрядники ступеней линейного трансформатора (LTD)

Применение ступеней линейного трансформатора с воздушной изоляцией при атмосферном давлении (вместо масляной или элегазовой) в первичной обмотке существенно упрощает конструкцию генераторов. Разработанный в ИСЭ СО РАН подход по модульной конструкции ступеней [34–36] позволил разработать новый подход к конструкции генераторов тераваттного диапазона с линейным скейлингом стоимости и размера установок с увеличением энергозапаса.

Основным элементом конструкции ступеней, разработанных в ИСЭ, является конденсаторный блок. Он состоит из двух конденсаторов и газового разрядника. Для этих целей был разработан специальный многоканальный многозазорный разрядник. Крупномасштабные установки [68] могут состоять из сотен ступеней с несколькими десятками конденсаторных блоков в каждой ступени. При наличии огромного количества параллельно включенных элементов определяющим

Таблица 7. Амплитуда тока и время до максимума в зависимости от зарядного напряжения

Зарядное напряжение, кВ	Время до максимума, нс	Амплитуда тока, кА
50	565	470
60	550	570
70	545	665
80	528	790

вопросом становится стабильность работы газовых разрядников и достижение очень низкой вероятности самопробоя. Кроме того, ресурс работы разрядников должен приближаться к ресурсу конденсаторов.

4.2.1. Открытые разрядники. Разрядники двух типов применялись в малогабаритном генераторе тока [69]: линейный разрядник (рис. 15а) и дисковый разрядник (рис. 15б). Шаровые электроды разрядников (сталь, 22 мм диаметр) закреплены на изоляторах из оргстекла. В оргстекле также находятся 7 резисторов Р1-35-4 (68 МОм) для распределения напряжения между рядами шаровых электродов. Выравнивание напряжения между шаровыми электродами одного ряда достигается с помощью проводящей резины, пропущенной через головки болтов одного ряда. Разрядники работают в режиме самопробоя при нарушении равномерного распределения напряжения по электродам при подаче пускового импульса через емкостную связь на один из рядов шаровых электродов. Плоский разрядник близкой конструкции использовался также в генераторе ГИТ-32 [70].

4.2.2. Однополярные конденсаторные блоки. Создана серия блоков [71, 72] из емкостного накопителя и многоканального многозазорного искрового разрядника в едином корпусе из эпоксидного компаунда. Разрядник и весь блок работает в среде воздуха атмосферного давления при зарядном напряжении до 100 кВ. Волновое со-

противление разрядного контура блока имеет порядок 1 Ом. Пиковая мощность вывода энергии в согласованную нагрузку составляет 1–2 ГВт при характерном времени вывода энергии 60–150 нс в зависимости от емкости накопителя блока.

С использованием этих блоков создана серия ступеней линейного импульсного трансформатора без масляной изоляции [34–36], работающих при зарядном напряжении до 100 кВ в воздухе атмосферного давления. Ступени имеют модульный принцип построения и позволяют прогнозируемо варьировать параметры первичного емкостного накопителя.

Конструкция блока приведена на рис. 16а. Корпус блока 1 выполнен из компаунда из эпоксидной смолы и кварцевой пыли. Конденсаторы 2 (GA 35426, 0.04 мкФ, 100 кВ) залиты в корпус блока. Шаровые электроды разрядника 3 размещены на специальных болтах, головки которых залиты в эпоксидный компаунд. В эпоксидном компаунде также находятся 7 резисторов Р1-35-4 (68 МОм) для распределения напряжения между шестью рядами шаровых электродов. Заливка эпоксидным компаундом усиливает внешнюю электрическую изоляцию конденсаторов и обеспечивает возможность работы при зарядном напряжении 100 кВ в атмосферном воздухе.

Выравнивание напряжения между шаровыми электродами одного ряда достигается с помощью проводящей резины, пропущенной через головки болтов одного ряда. Напряжение от высоковольтного пускового генератора подводится жилой высоковольтного кабеля, пропущенной через один из рядов шаровых электродов. Было проведено исследование параметров импульса в зависимости от числа каналов и зазоров в разряднике. Результаты даны на рис. 16в и в табл. 8.

Моделирование разрядного контура. Для моделирования переходного сопротивления $R_{ch}(t)$ и индуктивности $L_{ch}(t)$ канала разряда нами выбрана модель Брагинского [73]. Ранее авторами Ан-

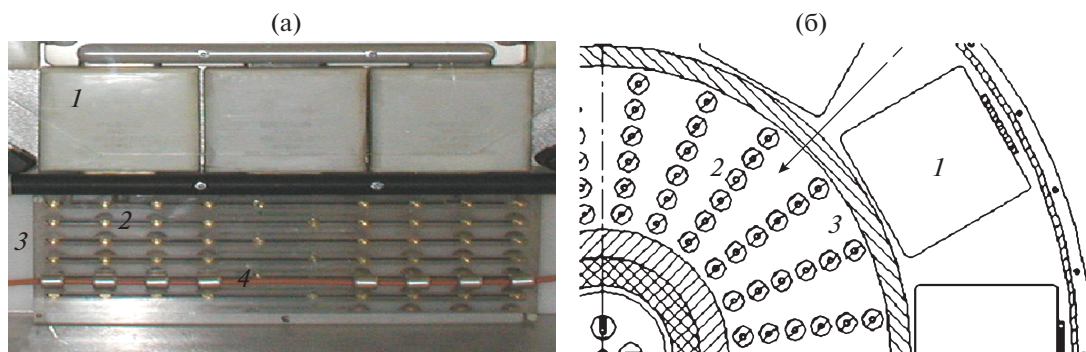


Рис. 15. Конструкции разрядников: а — плоского 8-канального 7-зазорного; б — дискового. 1 — конденсаторы; 2 — шаровые электроды; 3 — плита изолятора; 4 — пусковой кабель.

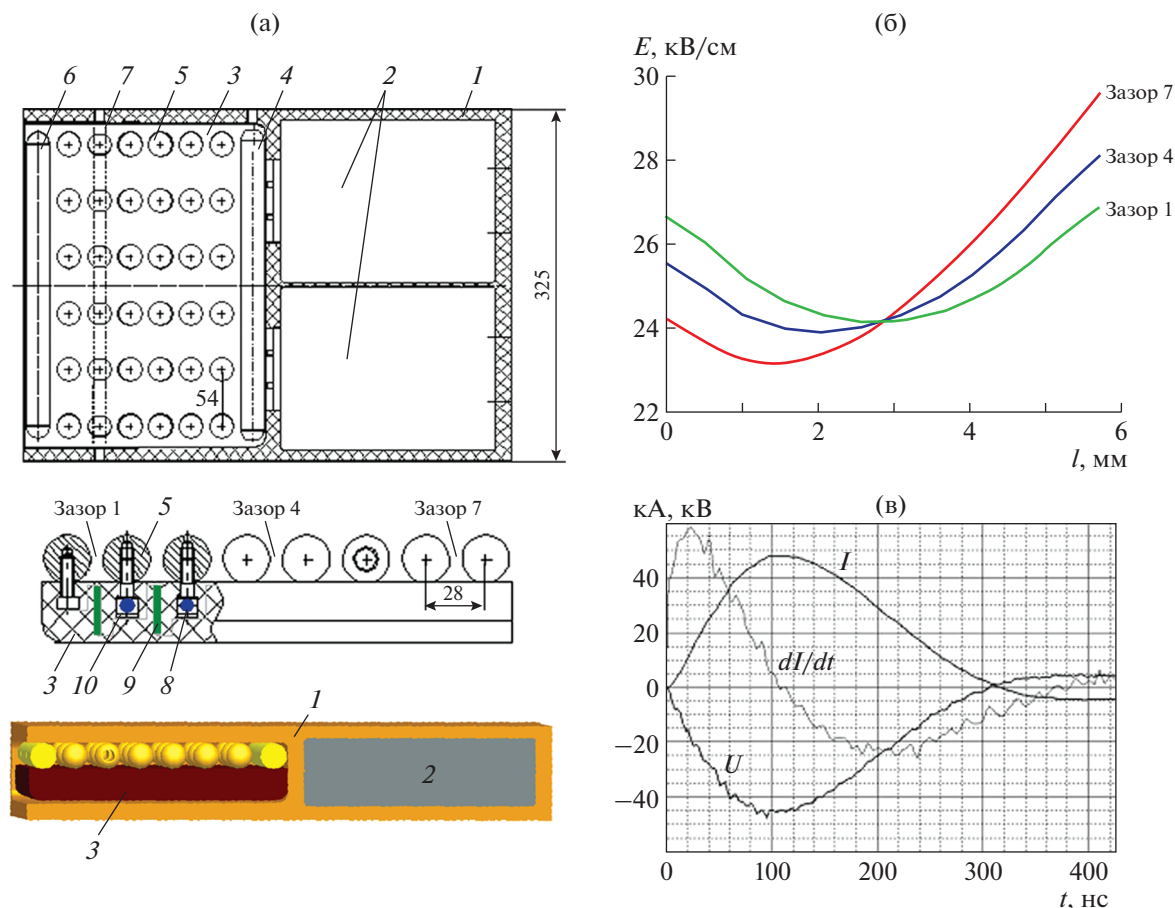


Рис. 16. Конструкция конденсаторного блока (а: 1 – корпус блока; 2 – конденсаторы; 3 – плита изолятора; 4 – потенциальный электрод; 5 – промежуточные сферические электроды; 6 – низковольтный электрод; 7 – пусковой кабель; 8 – болты крепления промежуточных электродов; 9 – резисторы активного делителя; 10 – корд проводящей резины); б – распределение электрического поля в межэлектродных зазорах 1, 4, 7; в – осциллограммы тока, производной тока и напряжения.

древым и Орловым [74] получено хорошее согласование экспериментальных характеристик искрового канала при близких условиях разряда с результатами расчета по этой модели. Модель описывает гидродинамическое расширение канала в искровой стадии разряда в приближении постоянной проводимости. Согласно ей сопротивление искрового разрядника дается выражением

$$R_{\text{ch}}(t) = \frac{d[\text{см}]}{k \left(\int I^{0.67} dt \right)},$$

где d – суммарный межэлектродный зазор в разряднике, k – константа, зависящая от рабочего газа, давления и проводимости канала. Для воздуха при атмосферном давлении и проводимости $\Sigma \sim 3 \cdot 10^4$ (Ом м) $^{-1}$ константа $k \approx 1.2 \cdot 10^5$ [74].

Индуктивность канала разрядника $L(t)$ можно оценить из его геометрии, используя зависимость изменяющегося во времени радиуса канала $r(t)$,

рассчитанную в соответствии с используемой моделью:

$$r(t) = r(t_0) + \left(\frac{k}{\pi \Sigma} \right)^{1/2} \left(\int_{t_0}^t |i(t)|^{0.67} dt \right)^{1/2},$$

где $r(t_0) \sim 0.01$ см (слабо влияет на расчеты) – начальный радиус канала, сформировавшийся к началу искровой стадии.

Расчет показывает, что индуктивность единичного канала разрядника $L(t)$ в течение импульса тока уменьшается с ~ 140 нГн до $\sim (115-125)$ нГн. Эта величина включает в себя постоянную индуктивность электродов разрядника и динамическую индуктивность искрового канала. Падение напряжения на разряднике обусловлено, в основном, составляющей $L(t)dI/dt$, пропорциональной скорости изменения тока. Вклад составляющей $I(t)dL/dt$, пропорциональной скорости изменения индуктивности, пренебрежимо мал.

Таблица 8. Усредненные по нескольким выстрелам параметры импульса в зависимости от числа каналов и зазоров в разряднике. Зарядное напряжение 100 кВ

Нагрузка	Число каналов	Амплитуда тока I , кА	Время до максимума, нс	Амплитуда напряжения на нагрузке, кВ	Реверс напряжения на нагрузке, %	Мощность в активной нагрузке, ГВт	Энергия в нагрузке, Дж	Энергия в разряднике, Дж	Потери в разряднике ΔW_r , %
0.95 Ом	6	48	115	46	10	2.2	307	93	23
	4	46	120	43	12	2.0	301	99	25
	2	44	131	41	16	1.8	300	100	25
	1	39	167	37	25	1.4	295	105	26
1.7 Ом	6	36	95	61	0	2.1	343	57	14
	4	34	104	58	0	2.0	338	62	15
	2	33	118	56	0	1.8	333	67	17
	1	31	155	53	6	1.6	331	69	17

Для расчета индуктивного падения напряжения на разряднике с достаточной точностью вместо динамической индуктивности $L(t)$ можно использовать некоторое среднее значение L_{ch} . Индуктивность разрядника определяется как $L_{SW} = L_{ch}/N$, где N – число каналов в разряднике. В табл. 9 приведены расчетные значения радиуса канала $r(T_{end})$ и индуктивности канала $L(T_{end})$ к концу импульса тока, а также индуктивности канала L_{ch} , используемой в качестве эквивалента при моделировании и полученной из условия $L(t)dI/dt \approx L_{ch}dI(t)/dt$. Результаты исследований показывают, что неидеальная коммутационная характеристика разрядника и вносимая им дополнительная индуктивность приводят к существенному снижению выходной мощности и затягиванию фронта импульса.

4.2.3. Двухполярные конденсаторные блоки. Первая модель. Конструкция первого варианта блока с двухполярной зарядкой приведена на рис. 17а, а внешний вид этого блока показан на рис. 17б. В этой конструкции разрядника использовались сферические электроды Ø22.3 мм с шагом 28 мм между центрами, что приводит к искровому зазору в канале 5.7 мм. Расстояние между первым шаром и пластиной заземления также равно 5.7 мм.

Таблица 9. Параметры канала разрядника

Число каналов	Амплитуда тока, кА	$r(T_{end})$, мм	$L(T_{end})$, нГн	L_{ch} , нГн
6	47.7	1.28	123	125
4	45.8	1.48	121	125
2	43.6	1.91	119	120
1	39.1	2.67	116	115

В разряднике используется 6 параллельных каналов. Зарядное напряжение поступает на электроды, которые залиты внутри корпуса блока (эпоксидной смолой), через отверстия в корпусе блока. Запускающий импульс к каждому из двух разрядников поступает через высоковольтный провод, который проходит через отверстия в среднем ряду (из трех рядов) сферических электродов. Основные размеры блока такие же, как и у 7-зазорных блоков с однополярной зарядкой (80 × 325 × 450 мм).

Блок был установлен на испытательный стенд с нагрузкой 2 Ом. Тесты были проведены при зарядном напряжении ±50 кВ. Этот испытательный стенд позволяет делать ~150 выстрелов/ч, что приводит к ~1000 выстрелов/день. Ниже дана информация о самозапусках за 14000 выстрелов:

№ 1000	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14000
выстрелов															
Кол-во самозапусков	14	0	3	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	Σ = 20

Средние параметры за 14000 выстрелов: напряжение нагрузки 65.9 кВ, пусковое напряжение 99.6 кВ, задержка времени запуска 60.3 нс.

Визуальный контроль разрядников блока после 14000 выстрелов показал, что эрозия электродов примерно одинакова во всех каналах и не заметно следов пробоя на поверхности корпуса разрядника или на корпусе конденсаторного блока.

Вторая модель. Во втором варианте блока с двухполярной зарядкой электроды, подсоединенные к зажимам конденсатора, выполнены в виде пластин. Это позволило сделать в корпусе блока каналы Ø10–12 мм для размещения развязывающих резисторов при тех же базовых размерах блока. При сборке емкостного модуля, состоящего из пяти блоков, развязывающие резисторы

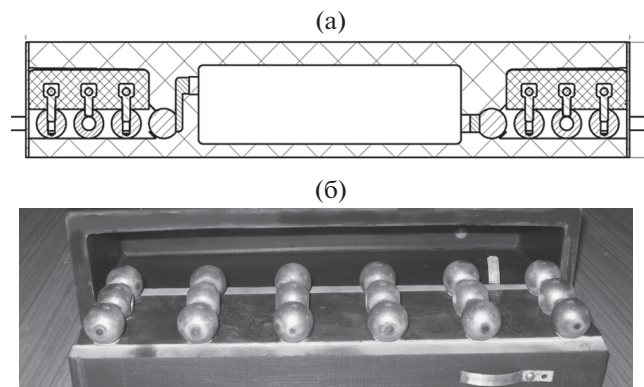


Рис. 17. Конструкция модели № 1 двухполярного конденсаторного блока (а) и его внешний вид (б).

вставляются между блоками. Блок уплотняется также возле конечных электродов и высоковольтных пусковых кабелей.

Его конструкция приведена на рис. 18а, а рассчитанное распределение электрического поля в межэлектродных зазорах — на рис. 18б. Максимальное электрическое поле на электродах ~ 2.4 кВ/мм.

Испытания проводились при зарядном напряжении ± 50 кВ и нагрузке 2 Ом. Было проведено 15000 выстрелов с вакуумированием полости разрядника после каждого выстрела и последующим заполнением новой частью сухого воздуха. Средние параметры за 15000 выстрелов: напряжение нагрузки 65.6 кВ, пусковое напряжение 114 кВ, задержка времени запуска 54 нс. Ниже показано количество самозапусков за 15000 выстрелов:

№ 1000 выстрелов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15000
Кол-во само- запусков	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	$\Sigma = 8$

Третья модель блока с двухполярной зарядкой. В этом варианте блока использовались сферические электроды $\varnothing 19.5$ мм с 6-миллиметровыми зазорами. Концевые электроды являются также плоскими, как во второй конструкции. Благодаря уменьшенному диаметру электродов и уменьшению ширины корпуса разрядника становится возможным уменьшить ширину блока до 387 мм (450 мм в прежних). Также возможно сделать каналы для соединения межблочного развязывающего резистора в верхней части блока, а не в центре, как и в предыдущей конструкции. Такое размещение резисторов подходит при использовании блока в емкостном модуле. Чертеж показан на рис. 19а, рассчитанное распределение электрического поля в межэлектродных зазорах приведено на рис. 19б. Максимальное электрическое поле на электродах ~ 2.45 кВ/мм.

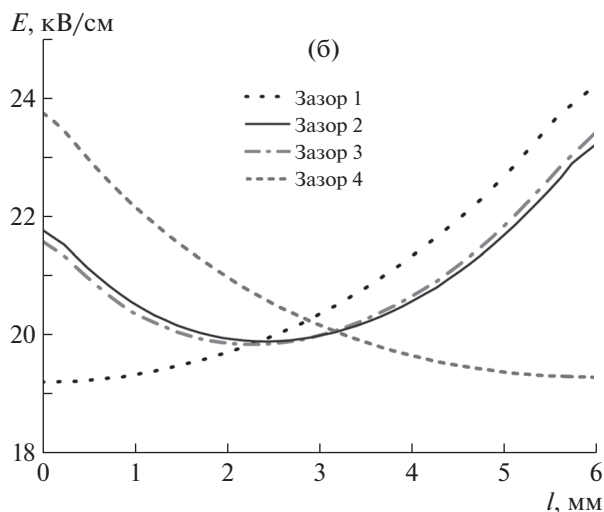
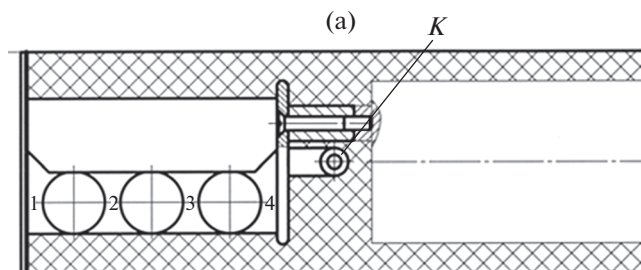


Рис. 18. Конструкция модели № 2 блока с двухполярной зарядкой электродов (а: К — каналы для развязывающих резисторов, 1–4 — номера зазоров); б — распределение электрического поля в межэлектродных зазорах 1–4.

Испытания проводились при зарядном напряжении ± 50 кВ и нагрузке 2 Ом. Было проведено 15000 выстрелов с вакуумированием полости разрядника после каждого выстрела и последующего заполнения новой порцией сухого воздуха. Средние параметры за 15000 выстрелов: напряжение нагрузки — 65.8 кВ, пусковое напряжение 92 кВ, задержку времени запуска — 56 нс. Ниже показано количество самозапусков за 15000 выстрелов:

№ 1000 выстрелов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15000
Кол-во само- запусков	6	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	$\Sigma = 10$

После 15000 выстрелов конденсаторный блок зарядили до ± 50 кВ и оставили в таком состоянии (под полным постоянным напряжением) в течение 10 ч. Во время этого теста не зафиксировано ни одного самопрооба. Можно сделать вывод, что при всех испытаниях количество самозапусков в первой тысяче выстрелов намного больше, чем в последующих.

Был проведен эксперимент с использованием конденсаторного блока версии 3 по возможности

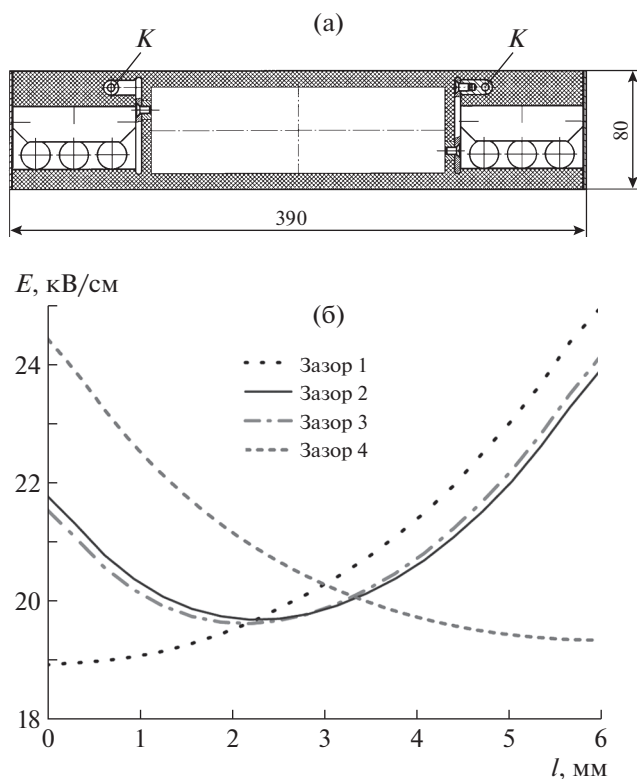


Рис. 19. Конструкция модели № 3 блока с двухполярной зарядкой электродов (а: *K* — каналы для развязывающих резисторов); б — распределение электрического поля в межэлектродных зазорах (зазоры 1–4 аналогичны зазорам на рис. 18а).

запуска одного разрядника. Для запуска использовался генератор Маркса с выводом положительной полярности (амплитуда ~ 115 кВ). При подаче пускового напряжения к обоим разрядникам было сделано по 50 выстрелов при зарядных напряжениях ± 50 , 45, 40 кВ, а после — 50 выстрелов при ± 50 кВ с подачей пускового импульса только к одному из разрядников.

Эксперименты доказали, что пусковой импульс должен подаваться обязательно на оба разрядника при использовании этих конденсаторных блоков в емкостных модулях. Задержка увеличивается на порядок при запуске одного разрядника. Кроме того, было установлено, что при запуске разрядников блока с двухполярной зарядкой полярность пускового импульса не оказывает влияния на задержки запуска.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во введении была обоснована актуальность тематики и дан анализ современного состояния исследований в данной области (с подробным обзором исследований по этой тематике и ссылками на публикации в научной литературе).

В следующем разделе приведены результаты разработки и экспериментальных исследований многокулонных разрядников с электродинамическим ускорением искрового канала. Правильная конструкция разрядников позволяет получить повышенный срок службы при небольшой эрозии электродов. Разработанные разрядники не требуют каких-либо ремонтных работ и просты в использовании. Во всех тестах не наблюдалось никаких самосрабатываний и несрабатываний. Разброс запуска составил 50 нс для разрядника 70 Кл и ~ 80 нс для разрядника 4 Кл. Эти разрядники хорошо подходят для требований LMJ, которые удовлетворяются со значительным запасом и могут быть использованы также для других применений.

Разработан и исследован широкодиапазонный разрядник для колебательного режима разряда. В быстром режиме разряда амплитуда тока до 180 кА, переносимый заряд 12 Кл, период колебаний 60 мкс. В медленном режиме разряда амплитуда тока до 30 кА, переносимый заряд 18 Кл, период колебаний 360 мкс.

Для разрядника с рабочим напряжением 50 кВ применяется межэлектродный зазор 30–40 мм (минимальный зазор между электродами). При этом давление воздуха в разряднике равно атмосферному. Получена зависимость пробоя статического напряжения от давления и зазора. Временная задержка срабатывания разрядника и его разброс уменьшаются при подъеме напряжения зарядки от 16 до 50 кВ. При напряжении > 40 кВ достигнут очень низкий уровень разброса ~ 1 нс.

Подача воздуха в объем разрядника через центральный электрод сразу после выстрела с расходом ~ 8 л/с позволяет охлаждать электроды разрядника, удалять продукты эрозии электродов, уменьшать скорость запыления поверхности изолятора, находящегося внутри разрядника.

Смещение канала дуги максимально (~ 25 см) в медленном режиме с максимальным переносом заряда. Результаты эксплуатации разрядника в медленном и быстром режимах при рабочем напряжении 40 кВ и запасаемой энергии 32 кДж позволяют надеяться на возможность достижения срока службы ~ 50000 срабатываний.

Далее (в разделе 3) приведены результаты численного моделирования рельсотронных разрядников с электродинамическим ускорением искрового канала.

Описана разработанная автором комбинированная модель движения плазмы в разрядниках с электродинамическим ускорением канала разряда, позволяющая рассчитывать движение плазмы и нагрев электродов самосогласованно. Проведены расчеты для униполярного и колебательного режима в широком диапазоне параметров, подтверждено хорошее согласие с экспериментом.

Проведены расчеты нагрева температуры электродов для разрядника 70 Кл (для стали, меди, молибдена и вольфрама). Получено, что распределение температуры по глубине в момент времени $t = 600$ мкс (окончание импульса) самое плавное у меди и самое резкое у стали. Кроме того показано, что для стального электрода максимальная температура на поверхности значительно превышает температуру плавления, в то время как для всех других материалов $T_{\max} \leq T_{\text{пл}}$. Из этих соображений медь является предпочтительным материалом для электродов по сравнению с другими материалами, рассмотренными в расчетах, благодаря высокой теплопроводности меди, несмотря на более высокие температуры плавления остальных материалов. Показано, что при расчете скорости плазменного канала приближение нулевой массы является вполне приемлемым.

В расчетах разрядника для колебательного режима разряда соотношения перемещения для быстрого и медленного режимов соответствуют экспериментальным (примерно как отношение общего переносимого заряда, как следует из модели). Для эффективного движения канала необходимо, чтобы смещение за первый полупериод было сравнимо или более межэлектродного зазора. Нагрев электродов для этих режимов не превосходит 600 К.

Четвертый раздел был посвящен многоканальным разрядникам. Разработана серия многоканальных многозазорных искровых разрядников, работающих в среде воздуха атмосферного давления при зарядном напряжении до 100 кВ.

Для ступеней LTD с воздушной изоляцией созданы несколько типов конденсаторных блоков. Блок состоит из двух конденсаторов и многоканального многозазорного искрового разрядника в едином корпусе из компаунда на основе эпоксидной смолы. Испытания показали надежную и стабильную работу блоков при зарядном напряжении 70–100 кВ в воздухе при атмосферном давлении.

Выполнены исследования влияния количества искровых каналов в многоканальном разряднике, емкости накопителя и сопротивления нагрузки на эффективность и мощность вывода энергии из конденсаторов. Исследования проводились экспериментально и численно, используя модель искрового разряда Брагинского. С увеличением числа каналов уменьшается время нарастания выходного импульса и растет мощность вывода энергии из накопителя в нагрузку. При времени нарастания импульса тока в контуре ~ 100 нс с амплитудой 30–50 кА потери энергии в шестиканальном искровом разряднике конденсаторного блока 80 нФ составляют $\sim 23\%$ от уровня запасаемой энергии в “согласованном” и $\sim 14\%$ в “критическом” режимах разряда.

Конденсаторные блоки можно использовать в качестве элементной базы при построении мощных импульсных генераторов с током $\sim 10^6$ А, напряжением $\sim 10^6$ В без использования трансформаторного масла и разрядников с избыточным давлением газа. По экспериментальным параметрам выходного импульса конденсаторных блоков можно проводить оценку выходных параметров проектируемого генератора при условии сохранения нагрузки, приходящейся на один конденсаторный блок. Создан ряд установок на основе разработанных конденсаторных блоков: ступень линейного трансформатора с воздушной изоляцией (~ 850 кА, ~ 42 кВ, ~ 35 ГВт в резистивной нагрузке 0.05 Ом), генератор тока (~ 645 кА, 390 нс в индуктивной нагрузке 17.5 нГн) и ускоритель электронов на основе линейного трансформатора с шестью последовательными ступенями (~ 112 кА, ~ 370 кВ, ~ 41 ГВт в электронном диоде). В конденсаторных блоках с двухполярной зарядкой получена вероятность самозапуска 0.1%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-18-50334\19.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith D.L., Jud Hammon J., Wilson J.M., Harjes H.C., Moore W.B.S.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28 (5). P. 1316.
<https://doi.org/10.1109/38.811442-0>
2. *Cavailler C.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. P. B389.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/47/12B/S28>
3. *Garanin S., Kirillov G.A., Kochemasov G.G., Mkhitarjan L.S., Murugov V.M., Sukharev S.A., Zhidkov N.V.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. V. 45. P. A471.
Online at stacks.iop.org/PPCF/45/A471
4. *McNab I.R., Fish S., Stefani F.* // IEEE Trans. Magnetics. 2001. V. 37. P. 223.
<https://doi.org/10.1109/20.911826>
5. *Жуков Б.Г., Резников Б.И., Куракин Р.О., Розов С.И.* // Журн. техн. физ. 2007. Вып. 7. С. 43.
6. *Zherlitsyn S., Wustmann B., Herrmannsdörfer T., Wosnitza J.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2012. V. 22. P. 4300603.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2182975>
7. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Vizir V.A., Kumpyak V.V., Zorin V.B., Kiselev V.N.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. P. 103506.
<https://doi.org/10.1063/1.3497307>
8. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Kumpyak E.V., Sinebryukhov V.A.* // J. Instrumentation. 2013. V. 8. P. P09012.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/09/P09012>
9. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Zherlitsyn A.A., Kumpyak E.V., Tsoy N.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87.

- P. 063505.
<https://doi.org/10.1063/1.4954504>
10. *Bluhm H.* Pulsed Power Systems: Principles and Applications. Springer-Verlag, 2006. P. 97–115.
 11. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. С. 196–228.
 12. *Winands G.J.J., Liu Z., Pemen A.J.M., Van Heesch E.J.M., Yan K.* // Rev. Sci. Instrum. 2005. V. 76. P. 085107.
<https://doi.org/10.1063/1.2008047>
 13. *Liu Z., Yan K., Winands G.J.J., Pemen A.J.M., Van Heesch E.J.M., Pawelek D.B.* // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. P. 073501.
<https://doi.org/10.1063/1.2216792>
 14. *Donaldson A.L., Dickenc J.C., Engel T.G., Kristiansen M.* // IEEE Trans. Magnetics. 1995. V. 31. P. 709.
<https://doi.org/10.1109/20.364606>
 15. *Han Zeng, Fuchang Lin, Li Cai, Lee Li, Zhengyang Zhou, Xiangdong Qi* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 013504.
<https://doi.org/10.1063/1.3677325>
 16. *Kharlov A.V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. № 9. P. 2474.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2052929>
 17. *Savage M.E.* // Proc. 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf. 1999. P. 1238.
 18. *Бобашиев С.В., Жуков Б.Г., Куракин Р.А., Поняев С.А., Резников Б.И., Розов С.И.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 2. С. 58.
 19. *Hsu S.C., Merritt E.C., Moser A.L., Awe T.J., Brockington S.J.E., Davis J.S., Adams C.S., Case A., Cassibry J.T., Dunn J.P., Gilmore M.A., Lynn A.G., Messer S.J., Witherspoon F.D.* // Physics of Plasmas. 2012. V. 19. P. 123514.
<https://doi.org/10.1063/1.4795732>
 20. *Geun-Hie Rim, Chu-Hyun Cho* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28. P. 1491.
<https://doi.org/10.1109/20.364606>
 21. *Jaitly N.C., White R., Cassany B., Eyl P., de Cervens D.R., Mexmain J.-M.* // Proc. 15th IEEE Int. Pulsed Power Conf. 2005. P. 643.
 22. *Kovalchuk B.M., Kim A.A., Kharlov A.V., Kumpyak E.V., Tsoy N.V., Vizir V.V., Zorin V.B.* // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 053504.
<https://doi.org/10.1063/1.2929670>
 23. *Kovalchuk B.M., Kim A.A., Kharlov A.V., Kumpyak E.V., Tsoy N.V., Visir V.A., Smorudov G.V., Kiselev V.N., Chupin V.V., Bayol F., Frescaline L., Cubaynes F., Drouilly C., Eyl P., Cassany B., Courtois L., Patelli P., Mexmain J.M., de Cervens D.R.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. № 5. P. 2651.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2004242>
 24. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Kumpyak E.V., Tsoy N.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 123504.
<https://doi.org/10.1063/1.4937359>
 25. *Anderson R.A., Clancy T.J., Fulkerson S., Petersen D., Pendelton D., Hulsey S., Ullery G., Tuck J., Polk M., Kamm R., Newton M., Moore W.B., Arnold P., Ollis C., Hinz A., Robb C., Fornes J., Watson J.* // Proc. 4th IEEE Pulsed Power Conf. Dallas, Texas. 2003. P. 793.
 26. *Kharlov A.V., Kovalchuk B.M., Kumpyak E.V., Smorudov G.V., Tsoy N.V.* // Laser and Particle Beams. 2014. V. 32. P. 471.
<https://doi.org/10.1017/S0263034614000408>
 27. *Харлов А.В.* // ПТЭ. 2017. № 6. С. 51.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217060040>
 28. *Kore S.D., Date P.P., Kulkarni S.V.* // International J. Impact Engineering. 2007. V. 34. P. 1327.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.08.006>
 29. *Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M.* // J. Materials Processing Technology. 2011. V. 211. P. 787.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
 30. *Kharlov A.V., Kovalchuk B.M., Kumpyak E.V., Tsoy N.V.* // J. Instrumentation. 2017. JINST. V. 12. P. T10009.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/10/T10009>
 31. *Kharlov A., Kumpyak E., Smorudov G., Tsoy N.* // Report # S5-O-020702. Proc. 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). 2018. P. 142. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ISHCE.2018.8521214>
 32. *Grabowski C., Degnan J.H., Cavazos T., Gale D.G., Gilman C., Sommars W., Intrator T.P., Taccetti J.M., Waganaar B., Siemon R.E., Wurden G.A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. P. 1905.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2002.805405>
 33. *Bastrikov A.N., Vizir V.A., Volkov S.N., Durakov V.G., Efremov A.M., Zorin V.B., Kim A.A., Kovalchuk B.M., Kumpyak E.V., Sinebrykhov V.A., Tsoy N.V., Cerviakov V.V., Yakovlev V.P., Mesyats G.A.* // Laser Part. Beams. 2003. V. 21. P. 295.
<https://doi.org/10.1017/S0263034603212209>
 34. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Kumpyak E.V., Zherlitsyn A.A.* // Phys. Rev. STAccel. Beams. 2013. V. 16. P. 050401.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.16.050401>
 35. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Zherlitsyn A.A., Kumpiak E.V., Tsoy N.V., Vizir V.A., Smorudov G.V.* // Laser and Particle Beams. 2009. V. 27. P. 371.
<https://doi.org/10.1017/S0263034609000482>
 36. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Volkov S.N., Zherlitsyn A.A., Zorin V.B., Smorudov G.V., Kiselev V.N.* // Laser and Particle Beams. 2012. V. 30. P. 23.
<https://doi.org/10.1017/S0263034611000632>
 37. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Zorin V.B., Zherlitsyn A.A.* // Rev. Sci. Instrum. 2009. V. 80. P. 083504.
<https://doi.org/10.1063/1.3193714>
 38. *Герасимов А.И.* // ПТЭ. 2004. № 1. С. 5.
 39. *Savage M.E., Simpson W.W., Sharp R.A., Reynolds F.D.* // Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf. 1997. P. 948.
 40. *Savage M.E.* // Proc. 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf. 1999. P. 1238.
 41. *Rakhovsky V.I.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1987. V. 15. P. 481.
<https://doi.org/10.1109/TPS.1987.4316741>
 42. *Parfyonov A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. V. 13. P. 277.
<https://doi.org/10.1109/TPS.1985.4316419>
 43. *Belkin G.S.* // Sov. Phys. Tech. Phys. 1971. V. 15. P. 1167.
 44. *Dullni E.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1989. V. 17. P. 875.
<https://doi.org/10.1109/27.41226>
 45. *Dullni E., Shade E., Shang W.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2003. V. 31. P. 902.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2003.818445>
 46. *Boxman R.L.* // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. P. 1885.

47. *Essiptchouk A.M., Sharakhovsky L.I., Marotta A.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V. 12. P. 501. Online at stacks.iop.org/PSST/12/501
48. *Prem Kumar C., Pramanik A.* // IEEE Trans. Magnet- ics. 1995. V. 31. P. 837. <https://doi.org/10.1109/20.364588>
49. *Chu-Hyun Cho, Geun-Hie Rim, Hong-Sik Lee, Kwang-Hoon Kim, Youn-Sik Jin* // IEEE Trans. Magnet- ics. 2001. V. 37. № 1. doi S 0018-9464(01)00161-3
50. *Jaitly N.C., White R., Cassany B., Eyl P., Mexmain J.M., de Cervens D.R.* // Proc. 15th IEEE Int. Pulsed Power Conf. 2005. P. 643.
51. *Guile A.E., Adams V.W., Lord W.T., Naylor K.A.* // Proc. IEE. 1969. V. 116. P. 645.
52. *Thoma C., Welch D.R., Hughesa T.P.* // Physics of Plas- mas. 2009. V. 16. P. 032103. <https://doi.org/10.1063/1.3081550>
53. *Kondrat'ev A.A., Matveenko Yu.I.* // Plasma Physics Reports. 2002. V. 28. № 1. P. 40.
54. *Wang L.J., Jia S.L., Yang D.G., Liu K., Su G.L., Shi Z.Q.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 145203. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/14/145203>
55. *Tsukima M.A., Abe J.A., Koga H.* // IEEE Trans. Power and Energy. 2014. V. 34. P. 930.
56. *Borkovski P., Makoto* // IEICE Trans. Electron. 2007. V. E90—C. № 7. P. 1369. <https://doi.org/10.1093/ietele/e90—c.7.1369>
57. *Kharlov A.V.* // Laser and Particle Beams. 2019. V. 37. P. 223. <https://doi.org/10.1017/S0263034619000429>
58. *Gleizes A., Gonzalez J.J., Freton P.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. R153. Online at stacks.iop.org/JPhysD/38/R153
59. *Gleizes A., Gonzalez J.J., Liani B., Raynal C.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1993. V. 26. P. 1921. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/26/11/013>
60. *Cressault Y., Hannachi R., Teulet P., Gleizes A., Gonnet J.P., Battandier J.Y.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2008. V. 17. P. 035016. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/17/3/035016>
61. *Speck D.R., Bliss E.S., Glaze J.A., Heris J.W., Holloway F.W., Hunt J.T., Johnson B.C., Kuizensa D.J., Ozarski R.G., Patton H.G., Rupert P.R., Suski G.J., Swift C.D., Thom- son C.E.* // IEEE J. Quantum Electronics. 1981. V. QE- 17. P. 1599.
62. *Coleman L.W.* // J. Fusion Energy. 1987. V. 6. P. 319.
63. *Parsons W.M., Lopez E.A., Bennett G.A., Bartsch R.R., Cochran J.C., Griego J.R., Hicks R.D., Hinckley W.B., Hosack K.W., Kasik R.J., Marquez A., Reass W.A., Thompson M.C., Casper D.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. P. 205. <https://doi.org/10.1109/27.602492>
64. <http://www2.l3t.com/ati/pdfs/40302.pdf>
65. *LeChien K.R., Gahl J.M.* // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 174. <https://doi.org/10.1063/1.1630834>
66. *Weihaio Tie, Xuandong Liu, Qiaogen Zhang, Shanhong Liu* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 076105. <https://doi.org/10.1063/1.4891190>
67. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Zherlitsyn A.A., Kumpy- ak E.V.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2019. V. 923. P. 97. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.083>
68. *Stygar W.A., Cuneo M.E., Headley D.I., Ives H.C., Leeper R.J., Mazarakis M.G., Olson C.L., Porter J.L., Wagoner T.C., Woodworth J.R.* // Phys. Rev. STAccel. Beams. 2007. V. 10. P. 030401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.030401>
69. *Kharlov A.V., Kovalchuk B.M., Zorin V.B.* // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. P. 123501. <https://doi.org/10.1063/1.2400667>
70. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Kiselev V.N., Kumpyak E.V., Zorin V.B., Chupin V.V., Morozov A.V.* // Rev. Sci. In- strum. 2007. V. 78. P. 033501. <https://doi.org/10.1063/1.2712800>
71. *Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Kumpyak E.V., Smorudov G.V., Zherlitsyn A.A.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 013501. <https://doi.org/10.1063/1.4857475>
72. *Жерлицын А.А., Ковальчук Б.М., Смородов Г.В.* // ПТЭ. 2009. № 6. С. 45.
73. *Braginsky S.I.* // Rus. J. Exp. Tech. Physics. 1958. V. 3. P. 1548.
74. *Andreev S.I., Orlov B.I.* // Rus. J. Tech. Physics. 1965. V. 10. P. 1411.