

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ПЕРЕДАЮЩИХ ЛИНИЯХ ВЗРЫВНОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ «ЭМИР»

ELECTRIC STRENGTH OF VACUUM INSULATION IN TRANSMISSION LINES OF EXPLOSIVE COMPLEX “EMIR”

П. В. Королев, М. А. Виденькин, М. Ш. Ибрагимов, М. В. Климашов, Е. Ю. Климов, Е. Н. Киришанова, О. В. Коноплев, В. П. Отмахов, Э. А. Панфилов, А. С. Пикарь, С. А. Провоторов, Д. А. Толшмяков, А. В. Шанин

P. V. Korolev, M. A. Videnkin, M. Sh. Ibragimov, M. V. Klimashov, E. Yu. Klimov, E. N. Kirshanova, O. V. Konoplyov, V. P. Otmakhov, E. A. Panfilov, A. S. Pikar, S. A. Provotorov, D. A. Tolshmyakov, A. V. Shanin

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental

В докладе представлены описание и результаты экспериментов по испытанию электродного узла взрывной электроустановки «ЭМИР» на электропрочность. Испытания проводились на высоковольтном экспериментальном стенде ВС-450 импульсным напряжением различной амплитуды микросекундной длительности. В качестве источника энергии использовался емкостной накопитель ГИН-500. Получены данные о напряжении и месте пробоя в вакуумной линии с бафлами, где расстояние между электродами было равно ~5 мм. Так же, исследована зависимость времени развития пробоя от приложенного напряжения. Проведены анализ и сравнение результатов испытаний на электропрочность с результатами на других аналогичных установках.

The experimental results of the electric strength testing of the electrode unit of the explosive complex “EMIR” are provided in the report. The testing was carried out on the high voltage test bench by the pulsed voltage of different amplitude of microsecond duration. A capacitive energy storage Marx generator (GIN-500) was used as the energy source. The data on the voltage and the breakdown point in the vacuum line with baffles was obtained; the gap between the electrodes was ~5 mm. The dependence of the breakdown time development on the applied voltage was investigated. The test results of the electric strength were compared with the results on the similar complexes.

Разработка мощных электрофизических установок гигаджоульного диапазона с использованием технологии индуктивных накопителей накладывает более высокие требования на конструкцию отдельных узлов и деталей таких установок. Высокие плотности энергии в индуктивных накопителях требуют высокой электрической прочности узлов, в том числе линий с вакуумной изоляцией. Важной характеристикой вакуумной изоляции представляется зависимость пробойного напряжения, приложенного к электродам, от расстояния между ними.

Главным недостатком взрывных электрофизических установок является невозможность их по-

вторного использования. Поэтому испытания на электропрочность вакуумной линии электродного узла установки «ЭМИР» [1] проводились на высоковольтном импульсном стенде ВС-450, который представляет собой генератор импульсного напряжения ГИН-500 соединенный кабелем КВИ-500 с исследуемой сборкой. Эквивалентная электрическая схема высоковольтного стенда ВС-450 показана на рис. 1. На рисунке 2 показан фрагмент узла подвода энергии установки «ЭМИР» с вакуумной линией. Расстояние между электродами в районе бафлов составляло ~5 мм. Electrodes изготовлены из стали 30ХГСА ГОСТ 4543-71.

Для измерений производной тока использовались индуктивные датчики. Один стоял на выходе

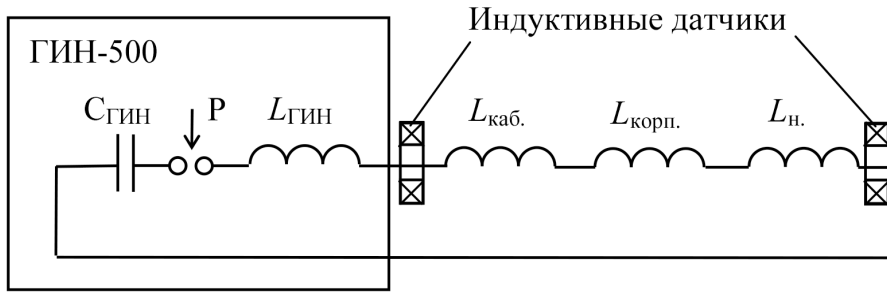


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема высоковольтного стенда ВС-450: $C_{ГИН} = 0,8$ мкФ – ударная ёмкость одного каскада одной ветви ГИН-500, P – управляемый разрядник, $L_{ГИН} = 1,4$ мкГн – индуктивность ГИН-500, $L_{каб} = 0,8$ мкГн – индуктивность кабеля, $L_{корп.} = 0,3$ мкГн – индуктивность корпуса сборки, $L_n = 4$ мкГн – индуктивность нагрузки

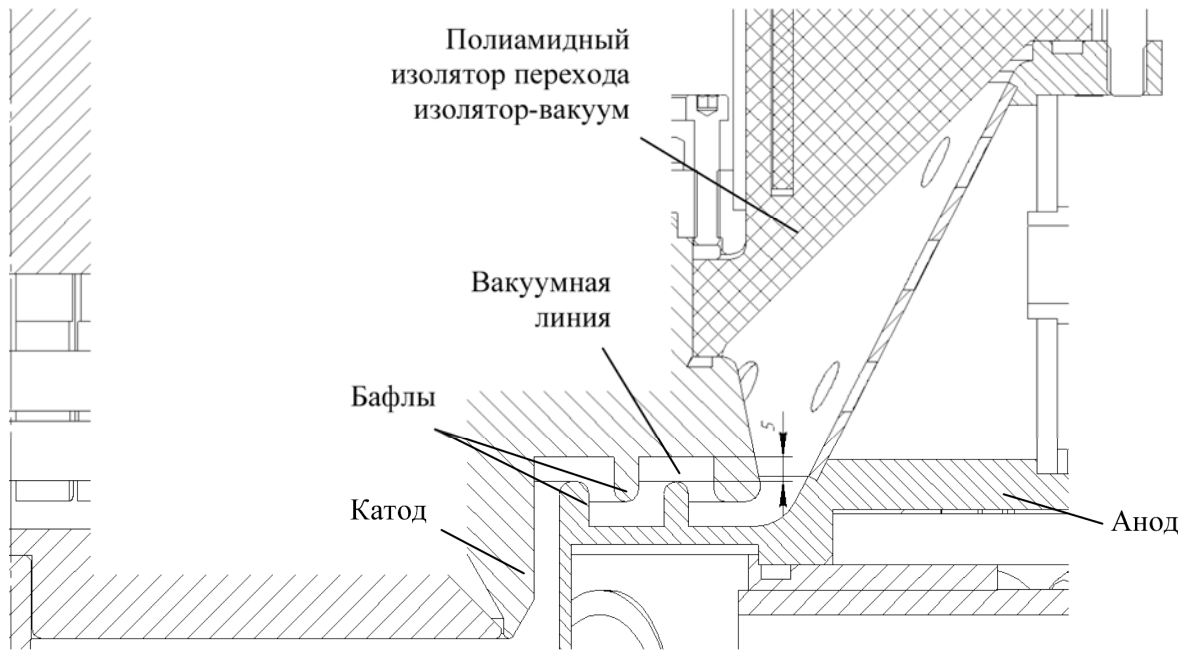


Рис. 2. Фрагмент узла подвода энергии установки

генератора ГИН-500 (рис. 1). Четыре других датчика были установлены в вакуумной камере, где располагалась индуктивная нагрузка величиной $L_n = 4$ мкГн. Значение индуктивности использовалось для оценки напряжения на нагрузке:

$$U = \frac{dl}{dt} L.$$

Изначально предполагалось исследовать поверхностную электропрочность полиамидного изолятора (рис. 2) в вакууме при ударном напряжении ГИН 300 кВ. Однако в первом же эксперименте был зафиксирован пробой в вакуумной линии в районе бафлов (рис. 5).

По результатам проведенных экспериментов для уменьшения ударного напряжения и запасе-

мой энергии было уменьшено количество каскадов ГИНа сначала до трех, а потом до одного. Только при ударном напряжении 70 кВ и менее удалось избежать пробоя вакуумной линии. Всего проведено 15 экспериментов с использованием ГИНа с одним каскадом с различным зарядным, а при одном каскаде являющимся также ударным напряжением, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90 кВ. Остаточное давление в вакуумной камере составляло $6,4 \cdot 10^{-5}$ торр. Пробой зафиксирован при напряжениях 75, 80, 85 и 90 кВ. При 30, 40, 50, 60, 70 кВ пробоя не было. На рис. 3 показаны кривые производной тока в вакуумной линии, умноженной на индуктивность нагрузки $L_n = 4$ мкГн, при различном зарядном (ударном) напряжении.

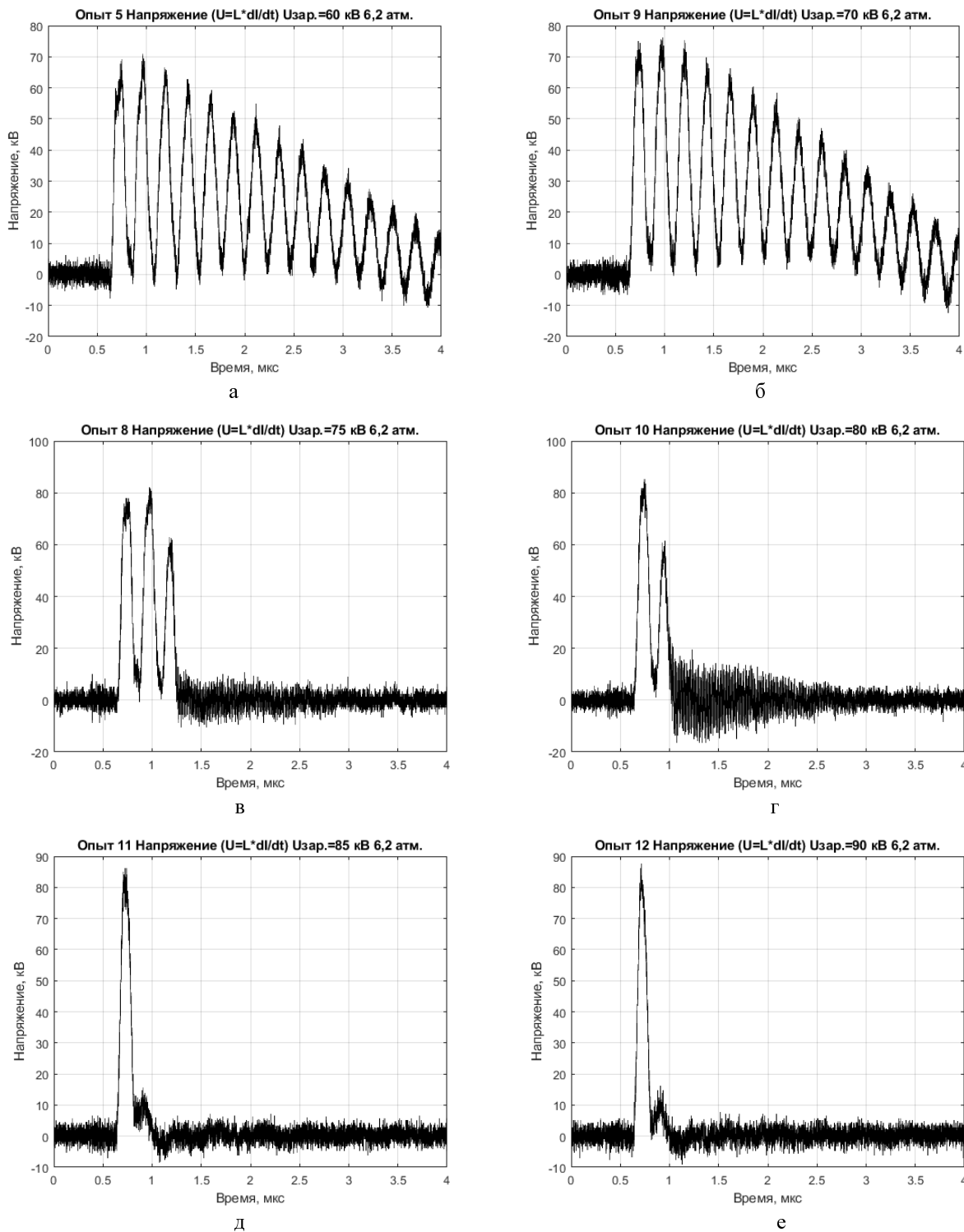


Рис. 3. Кривые производной тока в вакуумной линии, умноженной на индуктивность нагрузки $L_H = 4$ мкГн, в экспериментах с питанием от ГИНа с одним каскадом при различном зарядном (ударном) напряжении: а) 60 кВ, б) 70 кВ, в) 75 кВ, г) 80 кВ, в) 85 кВ, г) 90 кВ

На рис. 4 приведены кривые токов на выходе ГИНа и в нагрузке в экспериментах с питанием от ГИНа с одним каскадом при различном зарядном (ударном) напряжении от 60 кВ до 90 кВ.

Видно, что при напряжениях 60 кВ, 70 кВ кривые токов на выходе ГИНа и в нагрузке практически совпадают, что свидетельствует об отсутствии пробоя в сборке. Напротив, при напряжении 75 кВ кривые тока на выходе ГИНа и в нагрузке через

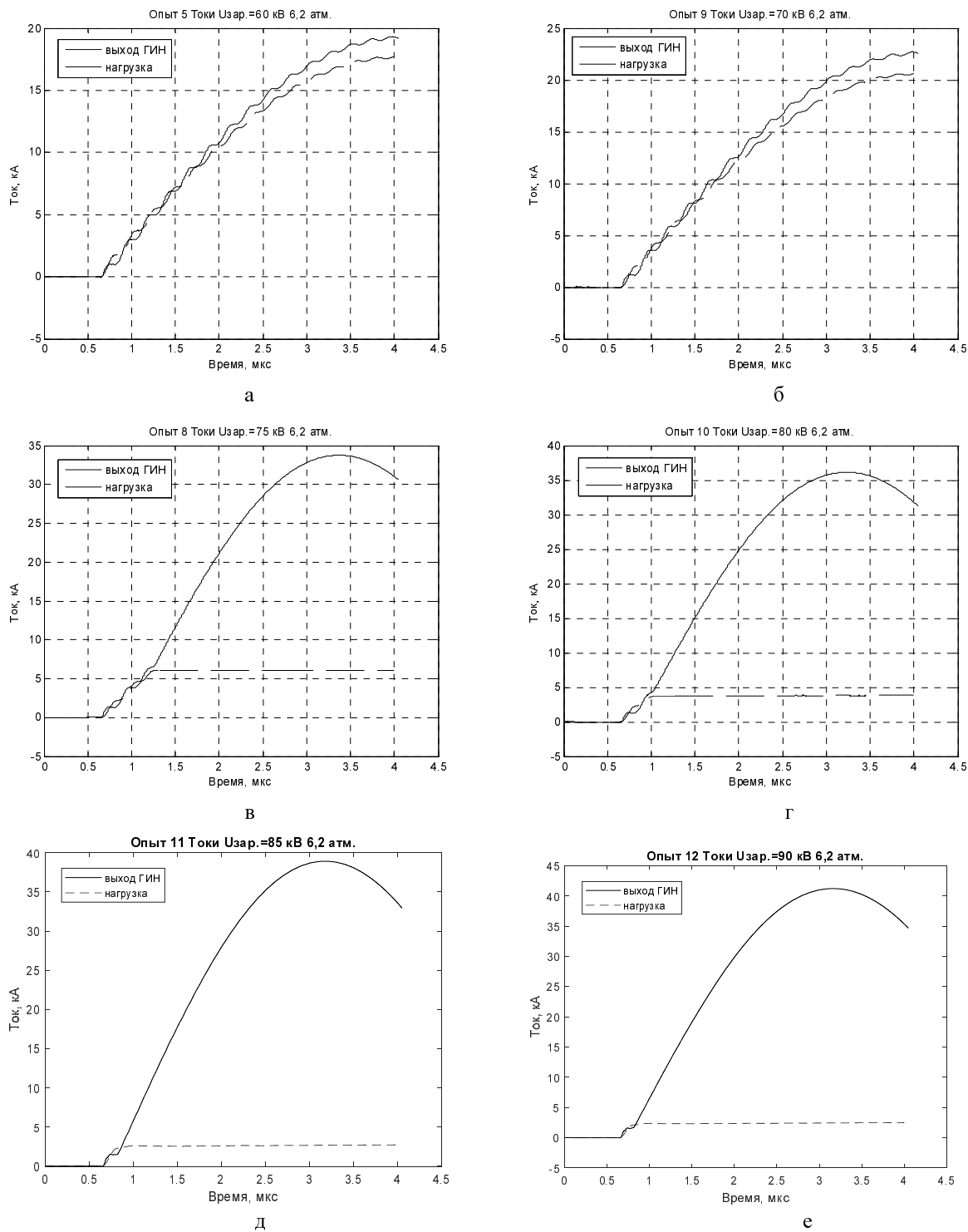


Рис. 4. Кривые токов на выходе ГИНа и в нагрузке в экспериментах с питанием от ГИНа с одной секцией при различном зарядном (ударном) напряжении: а) 60 кВ, б) 70 кВ, в) 75 кВ, г) 80 кВ, д) 85 кВ, е) 90 кВ

630 нс после начала роста тока расходятся, что свидетельствует о пробое. При напряжении 80 кВ кривые тока на выходе ГИНа и в нагрузке расходятся быстрее, приблизительно через 420 нс, что

также свидетельствует о пробое, но за более короткий промежуток времени.

При визуальном осмотре камеры после разборки стенда видно, что на внутренней поверхности

сти электродов вакуумной линии в районе бафлов виднеются следы эрозии от пробоя (рис. 5).

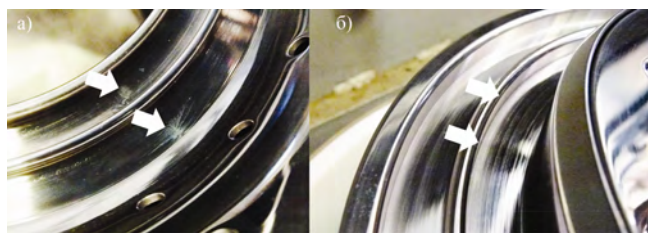


Рис. 5. Следы эрозии от пробоев на а) аноде и б) катоде

По литературным данным [2] при малых зазорах даже в условиях вакуумной изоляции между электродами возникают существенные токи утечки. На макете «Модуля А5-1» зазор варьировался от 3мм до 10 мм. При зазоре 5 мм и давлении 10^{-4} Торр, плотность тока утечки составляла

40 А/см². Максимальный ток утечки 20 кА достигается через 35 нс.

В книге [3] на стр. 206 приведена зависимость пробивного напряжения от зазора. При зазоре 5 мм пробивное напряжение составляет 250 кВ. Скорость разлета плазмы порядка 20 км/с. Напряженность электрического поля 90 кВ/мм.

Стационарная импульсная установка гигаджоульного диапазона Z [4] имеет магнитоизолированную вакуумную линию (МВЛ), наименьший зазор между катодом и анодом которой составляет 6 мм. На рис. 7 показаны кривые напряжения в переходе изолятор-вакуум и тока в МВЛ.

Видно, что по вакуумной линии с минимальным зазором 6 мм, при наличии магнитной изоляции, электродов из нержавеющей стали и высоком вакууме можно передать мегавольтовый импульс напряжения длительностью около 100 нс.

Материал электродов так же имеет большое значение. По данным из источника [3] электро-

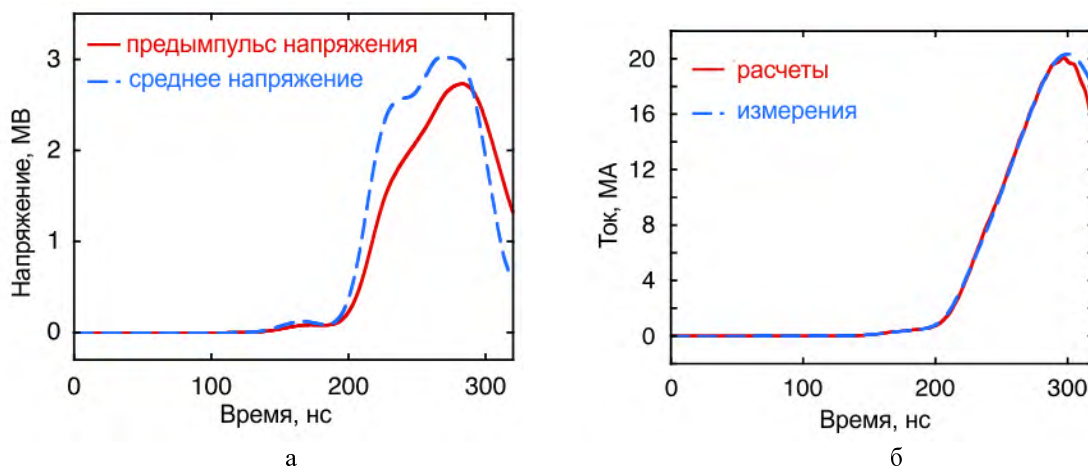


Рис. 6. Напряжение на изоляторе МВЛ (а) и ток в МВЛ установки Z (б)

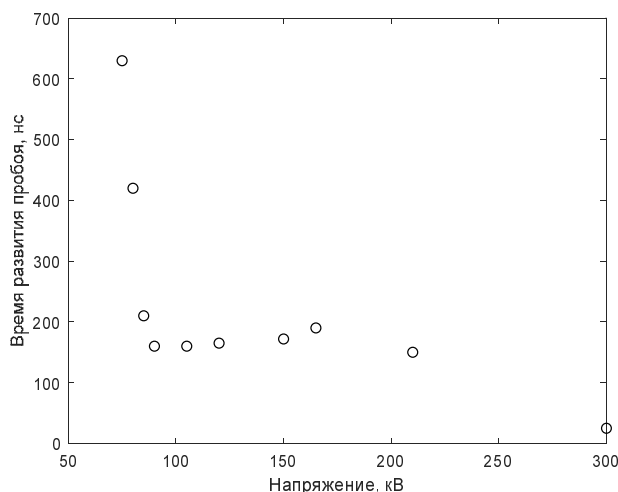


Рис. 7. Зависимость времени развития пробоя от приложенного напряжения

прочность вакуумной изоляции при использовании электродов из железоникелевой нержавеющей стали примерно в два раза больше чем при использовании других сталей.

Приведенные выше данные хорошо согласуются с данными полученными в наших экспериментах. Так, в наших экспериментах было установлено, что слабым местом сборки является вакуумный изоляционный промежуток в районе бафлов, а не изолятор перехода к вакууму, как считалось ранее. Зафиксировано, что при остаточном давлении в вакуумной камере $6,4 \cdot 10^{-5}$ торр сборка выдерживает импульс напряжения до 70 кВ длительностью 3,5 мкс. Увеличение напряжения приводит к уменьшению времени развития пробоя, так при напряжении 300 кВ длительность сокращается до 25 нс. На рис. 7 показана экспериментальная зависимость времени развития пробоя от приложенного напряжения.

Список литературы

1. Селемир В. Д. Магнитная кумуляция в физике высоких плотностей энергии // XII International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Novosibirsk, July 13-18, 2008.
2. Буланов В. В., Грабовский Е. В., Коба Ю. В., Королев В. Д. и др. Вакуумный импульсный трансформатор с магнитной изоляцией. ПТЭ № 4, 1988 г. стр. 102–104.
3. Сливков И. Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоатомиздат, – 1986. – 256 с.
4. Stygar W. A. 55-TW magnetically insulated transmission-line system: Design, simulations, and performance PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 12, 120401 (2009)