

ТЕМНАЯ ФАЗА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЛАБОРАТОРНОГО АТМОСФЕРНОГО РАЗРЯДА: ОТ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ДО НЕЙТРОНОВ

*А. В. Агафонов, В. А. Богаченков, О. Д. Далькаров, М. А. Негодаев, А. В. Огинов,
А. С. Русецкий, В. А. Рябов, А. П. Чубенко, К. В. Шпаков*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской Академии наук

Обсуждаются результаты регистрации излучений, возникающих в начальной (темной) стадии высоковольтного лабораторного атмосферного разряда до завершения стримерно-лидерной стадии. Регистрация электромагнитных излучений с временным разрешением велась с использованием импульсных ФЭУ различных типов, состыкованных с соответствующими конструкциями детекторов на входном окне. Регистрация нейтронов в режиме реального времени осуществлялась с помощью детекторов на основе сцинтиллятора (полистирол с РОРОР) с ФЭУ, размещаемых внутри короба из Pb. Для начальной идентификации и оценки интегральных характеристик нейтронных потоков применялись трековые детекторы CR-39. В качестве контрольной методики регистрации нейтронов задействован многоканальный детектор на основе ^3He -счетчиков СНМ-18, работающих в пропорциональном режиме.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе ЭРГ, реконструированном для исследований высоковольтного разряда в воздухе [1]. Узел нагрузки ГИНа с проходным масловоздушным изолятором и выравнивающими сопротивлениями защищен от пробоев по поверхности вплоть до 3 МВ. Электродная система аксиально-симметрична, диаметр внешнего заземленного токопровода 2 м (см. рис.1). Высоковольтный вывод разрядного промежутка выполнен из дюраля и имеет плоскую приосевую зону диаметром 320 мм и закругление периферийной части с $R = 200$ мм. Во фланце, закрывающем приосевую зону, крепится выносной шток со сменными электродами (катодами) различных радиусов закруглений. Анодный электрод устанавливался во фланце на оси системы, имеющем цапговый зажим для плавного изменения зазора за счет перемещения трубчатого штока. Набор сменных электродов тот же, что и для катода. Длина разрядного промежутка может меняться в диапазоне от 0 до 0,7 м, и ограничена сверху развитием разряда на внешний токопровод. Напряжение амплитудой до 1,2 МВ, формируемое ГИНом с полной запасаемой энергией до 60 кДж, обеспечивало ток атмосферного разряда на уровне 10–15 кА. Полная длительность импульса напряжения составляла около 1 мкс при фронте импульса 150–200 нс.

Схема установки позволяет получать разряды разных полярностей при прочих равных условиях, а также осуществлять внешнюю инициацию разряда рентгеновским или лазерным излучением, или внешним пучком электронов.

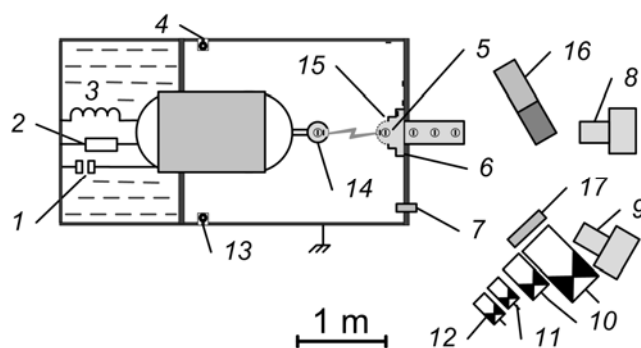


Рис. 1. Расположение диагностических средств. 1 – емкостный делитель, 2 – активный делитель, 3 – ввод от ГИНа, 4, 13 – магнитные зонды, 5 – трековые детекторы, 6 – анодный шунт, 7 – пояс Роговского, 8, 9 – интегральные фотокамеры, 10 – сцинтилляционные детекторы, 11 – детектор УФ излучения, 12 – ФЭУ на видимый свет, 14 – катод, 15 – анод, 16 – ^3He -счетчики, 17 – 10-см слой Pb

Диагностики

Стандартные электрофизические диагностики включали в себя измерение тока разряда (анодный шунт, пояса Роговского), напряжения (активный и

емкостной делители), азимутального магнитного поля (магнитные зонды).

Формирование каналов разряда контролировалось с помощью интегральной съемки в оптическом диапазоне с двух ракурсов.

Регистрация видимого, УФ- и рентгеновского излучений с временным разрешением велась с использованием импульсных ФЭУ различных типов, состыкованных с конструкциями детекторов на входном окне. Видимое излучение с разрешением ~ 5 нс регистрировалось ФЭУ-85 с оптоволоконным вводом излучения и набором фильтров. УФ-излучение регистрировалось ФЭУ типа Hamamatsu R1463 с фиолетовым окном. Для выделения поддиапазонов УФ-спектра применялись фильтры из фиолетового стекла (240...400 нм, 270...380 нм, 320...390 нм, 340...390 нм). Для диапазона 280...400 нм также применялись ФЭУ-85.

Для измерения рентгеновского излучения использовались пластиковые сцинтилляторы, закрытые алюминием различной толщины для обрезания квантов с энергией менее 5 кэВ, 10 кэВ или 30 кэВ по уровню 0,1. Торцы сцинтилляторов стыковались с входными окнами ФЭУ-30.

Регистрация нейтронов в режиме реального времени осуществлялась с помощью детекторов на основе сцинтиллятора (полистирол с РОРОР) в виде параллелепипеда $150 \times 150 \times 55$ мм³ с ФЭУ-30, размещаемых внутри короба из Pb с толщиной стенок 10 см. Детектор квадратной стороной обращен к разряду и отстоит от оси разрядного промежутка на расстоянии 150 см.

Для начальной идентификации присутствия нейтронов применялись трековые детекторы CR-39, калиброванные в соответствующих диапазонах энергии на ускорителях. С их помощью регистрировались усредненные по сериям выстрелов плотности треков протонов отдачи (быстрые нейтроны), треков альфа-частиц от захвата нейтронов бором (тепловые нейтроны) и треков от распада ядра ¹²C на три альфа-частицы [2].

Для подтверждения формирования нейтронов в атмосферном разряде и оценки потоков использован многоканальный детектор на основе ³He-счетчиков СНМ-18, работающих в пропорциональном режиме [3]. Сигналы со счетчиков регистрировались в реальном времени после компараторов и в аналоговом режиме до компараторов.

Эффективность регистрации детекторами Сцинтилляционный детектор.

Для оценки эффективности регистрации нейтронов сцинтилляционным детектором использовался источник ²⁵²Cf с полным выходом 3×10^4 нейтронов/с в 4π стер. Спектр нейтронов деления изотопа ²⁵²Cf лежит в диапазоне от 0 до 13 МэВ, со средним значением 2,3 МэВ и наиболее вероятным значением 1,2 МэВ.

При расположении источника вплотную к широкой грани сцинтиллятора собственная эффективность детектора при $U_{pm} = 2,4$ кВ и пороге регистрации импульсов 500 мВ с учетом фона составляет $\eta_{int} = 0,17$. На расстоянии в 1 м детектор регистрирует фон. При установке защиты толщиной 10 см из Pb детектор регистрирует фон уже на расстоянии 0,5 м. Т.е., тем более «не видит» нейтронов, если источник расположен в области разряда на расстоянии 1,5 м.

В предположении о точечном нейтронном источнике на аноде или катоде геометрически на сцинтиллятор попадает только малая часть от излученного в 4π числа нейтронов: $S_{сцинт}/S_{R=150см} = 8 \cdot 10^{-4}$. Кроме того, за счет неупругого рассеяния в свинце происходит примерно 3-кратное ослабление потока быстрых нейтронов.

Если предположить, что генерируется поток в 10^6 быстрых нейтронов в импульсе в 4π , то с учетом геометрического фактора и поглощения в свинце до сцинтиллятора дойдет примерно 250 нейтронов, а с учетом собственной эффективности, импульс ФЭУ будет суперпозицией примерно 42 одинарных (~ 500 мВ) импульсов, т.е. должен иметь амплитуду примерно 20 В (при точном наложении), или меньшую амплитуду, но с пропорционально увеличенным интегралом импульса (площадью под кривой). Снижение питания ФЭУ на 200 В (до $U_{pm} = 2,2$ кВ) приводит примерно к трехкратному уменьшению ожидаемого импульса нейтронов.

³He-детектор

Конструктивно счетчики с электроникой сгруппированы по 12 штук в дюралевом корпусе, закрытом с одной стороны замедлителем из парафина толщиной 5 см. В экспериментах использовались различные варианты компоновки детектора на ³He-счетчиках:

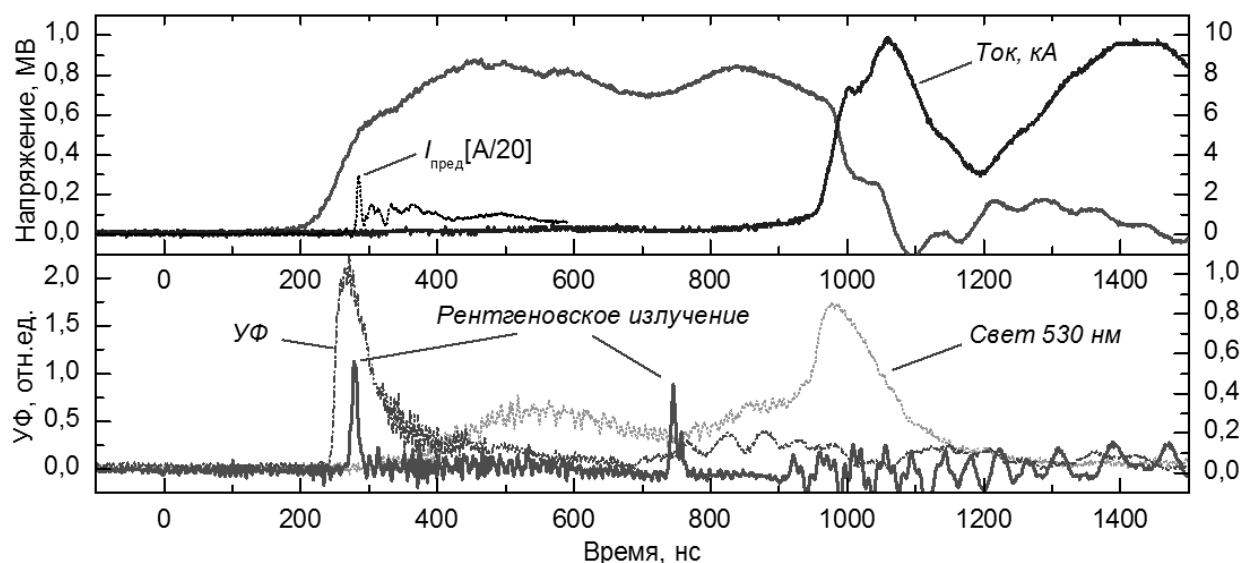


Рис. 2. Временная последовательность сигналов

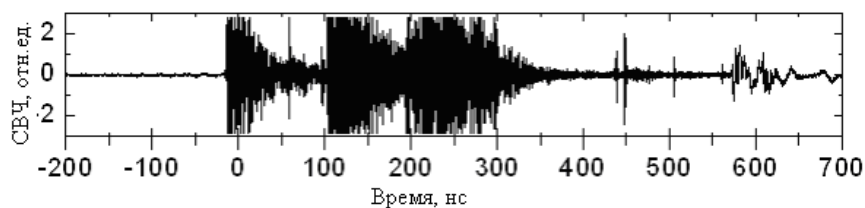


Рис. 3. Форма импульса радиоизлучения

1 или 2 блока по 12 трубок с регистрацией суммарного сигнала после компараторов с каждого блока;

4 секции по 6 трубок (2 суммарных сигнала с двух секций после компараторов и 2 суммарных аналоговых сигнала после предусилителя до компараторов), и др.

Общая площадь четырех секций по 6 СНМ-18 в каждой составляет 2000 см^2 . Секции расположены в среднем на расстоянии 70 см от анода и на расстоянии 130 см от катода. При расположении источника ^{252}Cf на катоде эффективность регистрации блоком из 12 счетчиков составляет $7,6 \times 10^{-4}$, а при расположении на аноде – $1,36 \times 10^{-3}$.

Временная структура сигналов

Характерное поведение напряжения на разрядном промежутке, тока разряда, светового, УФ- и рентгеновского излучения показано на рис. 2. В верхней части рис. 2 показан увеличенный в 20 раз предимпульс тока. Время появления импульса от рентгеновского излучения задержано относительно начала импульса напряжения на $\sim 200\text{--}300 \text{ нс}$ и

совпадает с нарастанием предимпульса тока. СВЧ-излучение регистрировалось с помощью 3-ГГц рупорной антенны и показано на рис. 3. Характерное положение импульса нейтронного излучения показано на рис. 4.

В предыдущей работе [2] отмечалось, что импульс нейтронного излучения, регистрируемый сцинтилляционным детектором размещенным за свинцовой защитой, коррелирован с возникновением импульса жесткого рентгена и расположен внутри него, как это показано на рис. 4.

Т. е., наблюдается, в самом деле, в «темной» фазе разряда до смыкания катодных и анодных стримеров. Однако, как время появления, так и структура нейтронного импульса могут отличаться от упомянутых выше (см. рис. 5). Возникновение рентгеновского излучения не всегда сопровождается появлением нейтронов (верхний левый рисунок), возможно возникновение двойных нейтронных импульсов, лежащих как внутри, так и вблизи импульсов рентгеновского излучения (два нижних рисунка), а в некоторых, редких, случаях нейтронный импульс появляется и в завершающей стадии разряда (верхний правый рисунок) или в

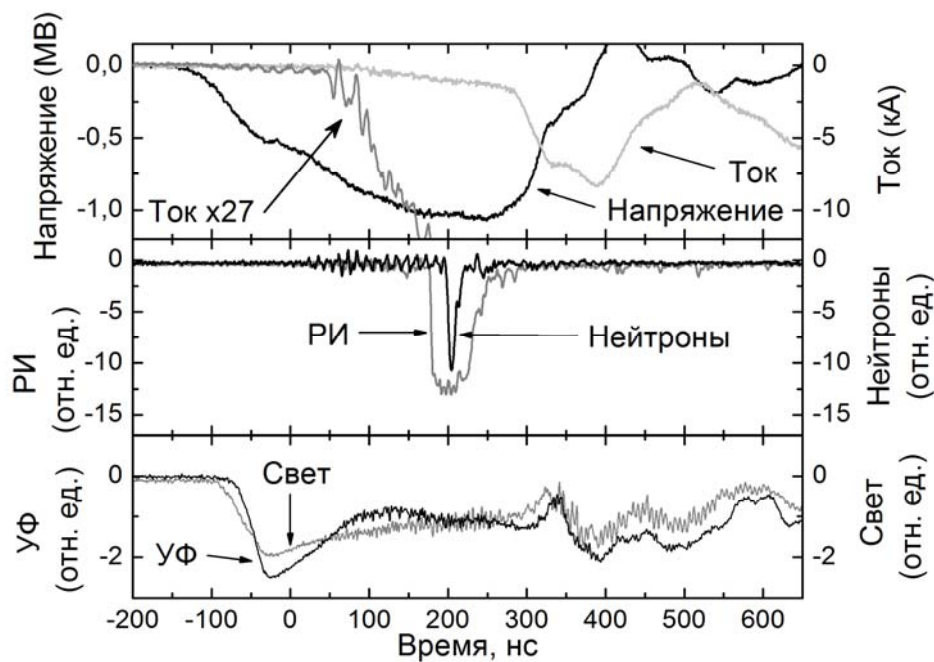


Рис. 4. Характерное положение импульса нейтронного излучения

момент, соответствующий смыканию стримеров. Амплитуда импульсов нейтронных сигналов в различных выстрелах может меняться на порядок величины.

По сдвигу импульса нейтронного излучения относительно рентгеновского можно оценить энергию нейтронов. Детекторы располагались на расстоянии ~150 см от зоны разряда. Один детектор был закрыт Al фольгой и мог регистрировать импульсы от рентгеновских гамма-квантов ($E_\gamma > 10$ кэВ) и нейтронов ($E_n > 1$ МэВ). Другой имел дополнительную защиту в 10 см Pb, через которую могут пройти только нейтроны. В момент разряда оба детектора показали наличие сигнала. Начало сигнала (предположительно, от быстрых нейтронов) от второго детектора с 10 см защитой из Pb задержано относительно первого сигнала (от гамма-квантов) на 35 нс. Это дает оценку энергии нейтронов по времени пролета расстояния 150 см – $E_n \sim 10$ МэВ.

С учетом эффективности регистрации нейтронов сцинтилляционным детектором и при условиях, что поток изотропен и спектр по энергиям не отличается сильно от спектра источника ^{252}Cf , поток нейтронов можно оценить в 10^4 – 10^5 нейтронов в импульсе в 4π.

Установка дополнительного замедлителя нейтронов (~20 см полиэтилена) перед свинцовой защитой привело к исчезновению сигнала от быст-

рых нейтронов, что можно рассматривать как дополнительное подтверждение того, что в момент разряда излучались именно быстрые нейтроны.

Регистрация нейтронов ^3He -детекторами

Первые свидетельства о генерации нейтронов в лабораторном высоковольтном атмосферном разряде были получены на трековых детекторах CR-39 с помощью трех трековых методик: регистрация протонов отдачи; регистрация альфа-частиц, возникающих при захвате тепловых нейтронов бором; регистрация распада ядра C-12 на 3 альфа-частицы. Результаты подробно изложены в работе [2]. Обработка треков показала присутствие нейтронов, энергия которых лежит в широком диапазоне (от тепловых до энергий выше 10 МэВ).

Чтобы подтвердить полученные выводы, были задействованы ^3He -детекторы. На рис. 6 приведены коррелированные события, когда в одном выстреле одновременно регистрировались нейтроны как сцинтилляционным, так и ^3He -детекторами. В левой колонке приведены осциллограммы со сцинтилляционных детекторов, в правой – осциллограммы суммарного сигнала с компараторов ^3He -детектора (1 блок, 10 трубок). В других сериях регистрировались также аналоговые сигналы с двух секций по 6 счетчиков (рис. 7).

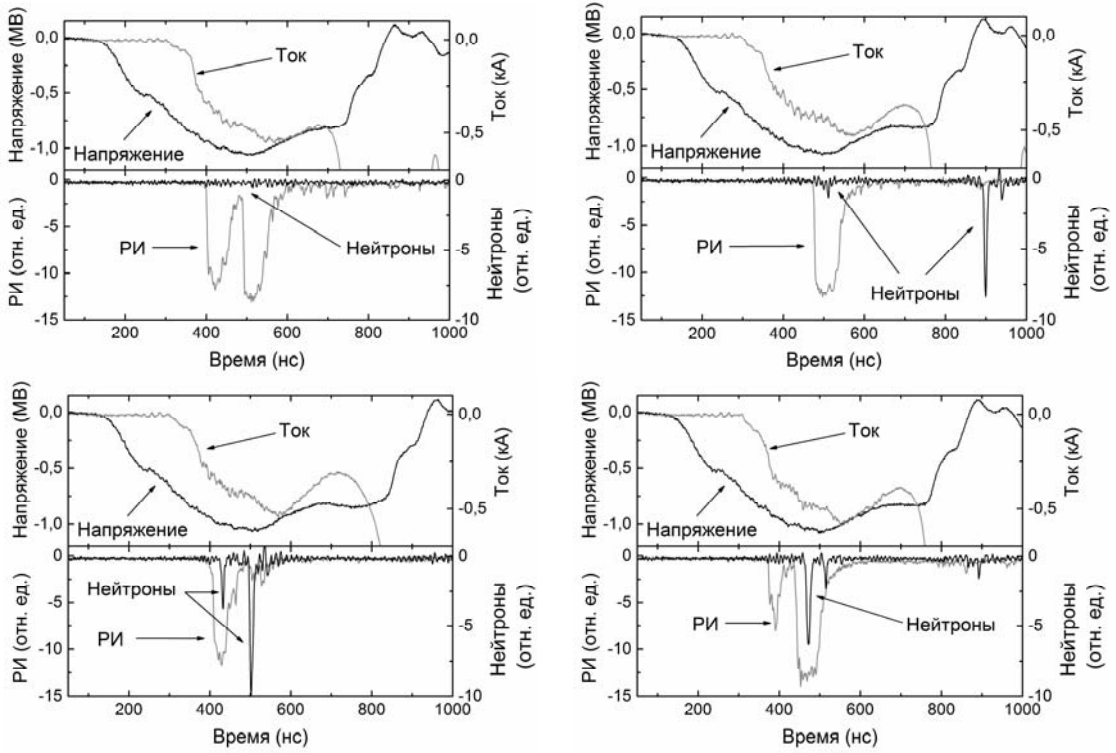
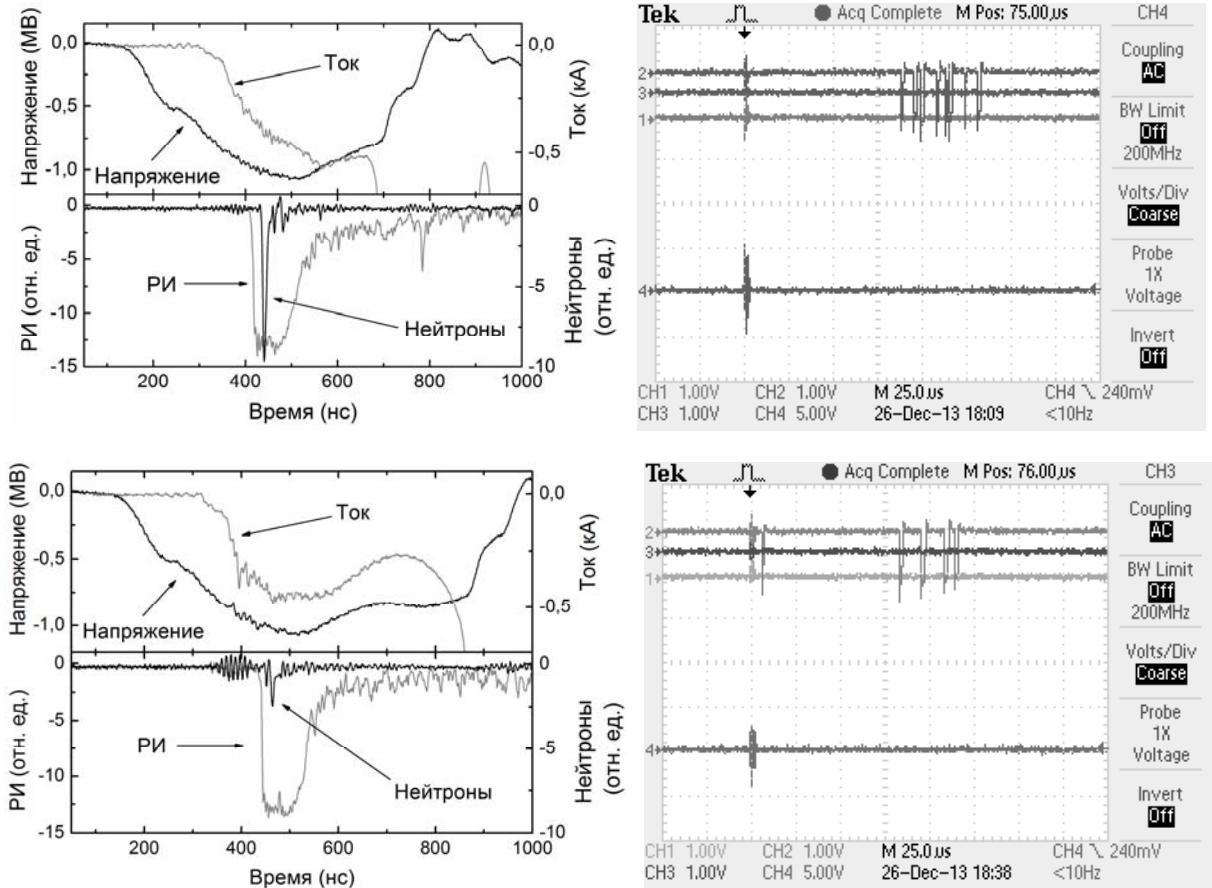


Рис. 5. Различные структуры нейтронных импульсов

Рис. 6. Сигналы со сцинтиляционного детектора (слева) и с ^3He -детектора (справа)

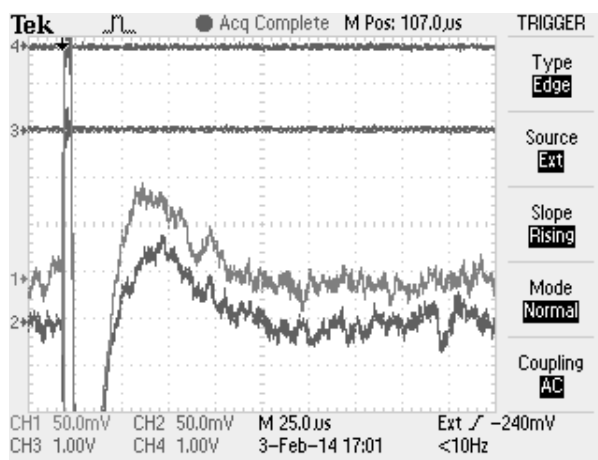
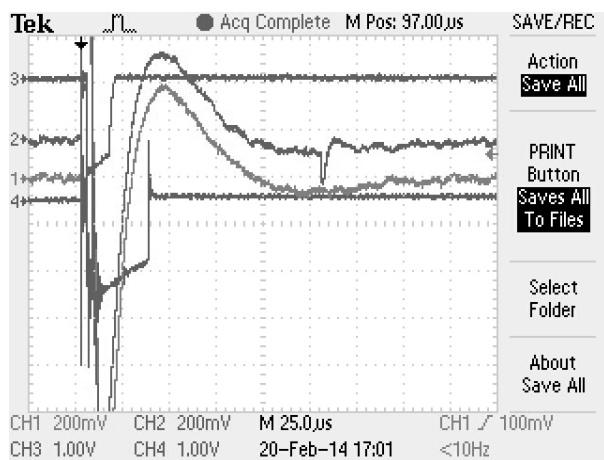


Рис. 7. Аналоговые сигналы с ³He-детектора до компаратора

С учетом эффективности регистрации нейтронов ³He-детектором и при условиях, что поток изотропен и спектр по энергиям не отличается сильно от спектра источника ²⁵²Cf, поток нейтронов можно оценить на уровне от 10³ до нескольких единиц 10⁴ нейтронов в импульсе в 4л.

Воспроизводимость

В табл. 1 приведены статистические данные по одновременной регистрации импульсов рентгеновского и нейтронного излучений сцинтилляционными детекторами, и нейтронов ³He-детектором. В верхней строке – данные по всем основным сериям выстрелов, в которых применялись ³He-детекторы. Во второй строке – данные по одной из наиболее удачных серий, а в третьей – суммарные данные по нескольким стандартным сериям.

Таблица 1

Статистические данные

Общее число выстрелов	Число импульсов с рентгеном > 10 кэВ	Число импульсов с нейтронами на СД	Число импульсов с нейтронами на ³ He
340 (100 %)	266 (78 %)	35 (10 %)	65 (13 %)
64 (100 %)	78 %	19 %	48 %
108 (100 %)	89 %	5 %	2 %

В табл. 2 приведены данные по корреляции сигналов со сцинтилляционного детектора и с ³He-детектора по их регистрации или отсутствию в каждом выстреле. Во второй колонке приведено число выстрелов с регистрацией нейтронов на сцинтилляционном детекторе, в третьей – число выстрелов, в которых нейтроны не были зарегист-

рированы. Во второй строке – число совпадающих выстрелов с регистрацией нейтронов ³He-детектором, в третьей – число выстрелов, в которых не наблюдались нейтроны на ³He-детекторе.

Таблица 2

Корреляция сигналов

	Есть нейтроны на СД	Нет нейтронов на СД
Есть нейтроны на ³ He	10	28
Нет нейтронов на ³ He	2	17

Из этих данных видно, что воспроизводимость результатов существенно меняется от серии к серии, а корреляция сигналов по выбранной серии также неоднозначна.

Заключение

Применение ³He-детекторов подтвердило данные, полученные в работе [2], о генерации нейтронов в лабораторном высоковольтном атмосферном разряде. Предварительные данные указывают на сильную анизотропию излучения нейтронов. Два сцинтилляционных детектора, расположенных за 10 см Рb и находящихся на расстоянии около 50 см друг от друга в одной плоскости, ни разу одновременно не зафиксировали нейтроны. Из четырех секций ³He-счетчиков отсчеты нейтронов дают, как правило, одна или две. Анизотропия нейтронного излучения позволила бы объяснить плохую корреляцию между показаниями сцинтилляционных и ³He-детекторов. С другой стороны это означало бы на порядки меньшее количество нейтронов, формируемых в разряде. Од-

нако набранная статистика пока мала и для подтверждения анизотропии излучения необходимо проведение целенаправленных исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке грантами РФФИ 13-08-01379 и 14-08-31397 мол_а.

Список литературы

1. Agafonov A. V., Oginov A. V., Shpakov K.V. Prebreakdown Phase in Atmospheric Discharges.

Physics of Particles and Nuclei Letters, 2012, Vol. 9, No. 4–5, pp. 380–383.

2. Agafonov A. V., Bagulya A. V., Dalkarov O. D. et al. Observation of Neutron Bursts Produced by Laboratory High-Voltage Atmospheric Discharge. PRL 2013, 111, 115003.

3. Gurevich A. V., Antonova V. P., Chubenko A. P. et al. Strong Flux of Low-Energy Neutrons Produced by Thunderstorms. PRL 108, 125001 (2012).