

С 344.1и

К-906

3/III-67

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 3123



М.М. Кулюкин, Д.Б. Понтекорво, И.В. Фаломкин,
Ю.А. Щербаков

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ПОЛУЧЕНИЕ ХОРОШО ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СЛЕДОВ
ВЫСОКОЙ ЯРКОСТИ В СТРИМЕРНОЙ КАМЕРЕ
С ГЕЛИЕМ

1967.

1 1241 1111

4814 / 1 ч.о.
М.М. Кулюкин, Д.Б. Понтекорво, И.В. Фаломкин,
Ю.А. Щербаков

ПОЛУЧЕНИЕ ХОРОШО ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СЛЕДОВ
ВЫСОКОЙ ЯРКОСТИ В СТРИМЕРНОЙ КАМЕРЕ
С ГЕЛИЕМ

Направлено в ПТЭ и в Nucl. Instr. and Meth.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

A b s t r a c t

Comparison of data on helium and neon shows that an electrical discharge in helium develops with a speed several times larger than in neon for given parameters of the high-voltage pulse. For this reason it has not been possible to observe a noncompleted discharge in helium in contrast to neon. The pulse width affects the track brightness only, and has practically no effect on the apparent discharge pattern (fig. 3; $E = 12,5 \text{ kV/cm}$). There is no sense therefore in terminating the high-voltage pulse to be applied to a helium-filled streamer chamber. The discharge within the chamber itself shapes the high-voltage pulse, and the pulse width therefore is a function of the pulse height (fig. 5). Figure 2 presents oscillograms of high-voltage pulses (a, b) from a Marx generator ($C = 385 \text{ pf}$), and oscillograms of voltage shaped by the discharge within the chamber (δ, τ). Fig. 6a shows a photograph of a particle track in a helium-filled cylindrical chamber ($\delta = 280 \text{ mm}$, $h = 100 \text{ mm}$, $E = 22 \text{ kV/cm}$).

It is well known that various admixtures may strongly influence processes taking place in gaseous discharges. These phenomena may be used in order to obtain localized bright tracks in a chamber filled with helium. Indeed small admixtures of vapours of polyatomic hydrocarbons change the apparent picture of the discharge in the following way. The total light output of the gas volume is strongly reduced, but at the same time bright luminous dots appear on many streamers. The dimensions of such luminous dots along the electrical field are 1-2 mm. Fig. 6 presents photographs of tracks obtained in helium with admixtures of about $(1 - 2) \cdot 10^{-4}$ of α -pinene (δ) and of vacuum rubber vapour (τ). The light output of particle tracks consisting of such bright dots is sufficient for photographing through an objective with an aperture $f/5,6$ on a film with a sensitivity $S_{0,88} = 1000$ units GOST USSR.

It must be underlined that the discharge spreads throughout all the discharge gap (as is seen in fig. 6 δ, τ), and the bright dots are due only to an appropriate distribution of luminosity and have nothing to do with a limitation of the discharge within the chamber.

The number of dots \bar{n}_T per cm increases with the high-voltage pulse amplitude (fig. 7). A change of the pulse delay time τ_0 within the limits of $10 \mu \text{ sec}$ does not affect \bar{n}_T (fig. 8).

The bright dots' emission spectrum is analogous to the spectrum of helium whereas the gas volume emission spectrum corresponds to the spectrum of the admixtures. The mean energy of electrons in the discharge is decreased in helium by the presence of admixtures with a great number of low-energy levels. Therefore helium atoms can be excited only in regions of sufficient electron concentration. The electron density is the greatest in the region of the primary electron avalanche, i.e. in the region of the particle path.

Admixtures of less complicated hydrocarbons such as benzene and hexane also lead to a localization of particle tracks in helium. Fig. 9a, 9b, 9c show photographs of particle tracks in helium with 0.1% admixtures of benzene, hexane and α -pinene, correspondingly.

Thus by making use of admixtures of complicated hydrocarbons it is possible to obtain bright localized particle tracks in a streamer chamber with helium without preliminary shaping of the high-voltage pulse.

В в е д е н и е

Наиболее серьезным недостатком стримерных камер, работающих в режиме хорошей локализации следов за счет искусственного обрывания разряда в газовом объеме, является чрезвычайно малый световой выход, который затрудняет фотографирование с помощью обычных фотографических объективов и фотопленок^{/1,2/}. Особенно это относится к стримерной камере, наполненной гелием. Интерес к такому наполнению возникает при использовании камеры в качестве газовой мишени^{/3,4/}.

Возможным выходом из положения является усиление света с помощью электронно-оптических преобразователей^{/5,6/}, но это связано с применением сложной и дорогостоящей дополнительной аппаратуры и лишает стримерную камеру ценного качества - простоты в обращении. Кроме того, применение электронно-оптических преобразователей вносит различные оптические искажения.

Поэтому более привлекательной являлась бы возможность получать хорошо локализованные и вместе с тем яркие следы не с помощью ограничения самого разряда, а путем управления распределением интенсивности свечения в разряде. Как известно^{/7,8/}, примеси могут существенно влиять на механизм развития разряда в инертных газах, главным образом, за счет инициирования разрядки метастабильных уровней атомов инертного газа (эффект Пеннинга) и фотоионизации примеси. Этим, вероятно, можно воспользоваться для активного воздействия на разряд как на стадии развития электронной лавины, так и на стримерной стадии. В связи с этим в настоящей работе было обращено внимание на развитие разряда в гелиевой камере в условиях различной чистоты газа.

Поскольку разряд в стримерной камере с гелием до сих пор практически не исследован, в работе было предпринято изучение разряда в камере, наполненной гелием при атмосферном давлении, в широком диапазоне изменения величины напряженности электрического поля (от 13 до 25 кв/см).

Экспериментальная установка

Установка управляется телескопом счетчиков Гейгера, который выделяет частицы космического излучения, проходящие через объем стримерной камеры. Суммарная задержка высоковольтного импульса на выходе генератора импульсных напряжений (ГИН) относительно момента прохождения заряженной частицы составляла 0,5–1,5 мксек. На камеру высоковольтный импульс подается через передающий воздушный промежуток.

Камеры представляли собой склеенные эпоксидной смолой (марки Ероху-1200) цилиндрические сосуды диаметром 280 мм и высотой 100 мм. Мы использовали несколько одинаковых камер, которые поочередно помещались между внешними электродами. Толщина стекол, отделявших газовый объем камеры от электродов, составляла 3–6 мм.

Перед наполнением рабочим газом камера откачивалась форвакуумным насосом до давления 10^{-2} мм рт. ст. и промывалась чистым гелием. Камера наполнялась через азотную ловушку до давления 740 мм рт. ст. Во всех экспериментах использовался гелий "особой чистоты", в котором содержится не больше, чем 0,002% O_2 ; 0,003% N_2 и 0,01% N_2 .

Импульс с электрода камеры подавался через высоковольтный пробник-делитель из активных сопротивлений с коэффициентом деления 1:1000 на осциллограф С1-10. Экран осциллографа фотографировался с помощью кинокамеры РФК-5 с объективом Цейсс, светосила которого составляла 1:0,75.

Фотографирование камеры производилось через сетчатый электрод с расстояния 450 мм стереоаппаратом с объективами Юпитер-12; камера фотографировалась также сбоку в направлении, перпендикулярном электрическому полю, кинокамерой РФК-5 (объектив РОЭ-ЭМ). Во всех случаях использовалась пленка чувствительностью $S_{0,83} = 1000 - 1200$ ед. ГОСТ (тип 15-ТТ-800 или Панхром-10н). В статье приводятся только фотографии, полученные в направлении, перпендикулярном электрическому полю.

Генератор импульсных напряжений

Источником высоковольтного напряжения служил генератор импульсных напряжений Аркадьева-Маркса. Генератор состоял из тринадцати конденсаторных секций (по два конденсатора КОБ-3) емкостью 5000 пф каждая. Общая выходная

емкость генератора C_{Γ} равнялась 385 пф. Напряжение, до которого заряжались конденсаторы, контролировалось по киловольтметру. Для поджига первого разрядного промежутка генератора использовался тиратрон ТТИ1-325/16.

Устройство генератора импульсных напряжений позволяло менять амплитуду напряжения на камере путем изменения числа включенных секций. Для определения зависимости амплитуды выходного импульса генератора от числа включенных конденсаторных секций была произведена калибровка. Нагрузкой генератора при калибровке служила камера, наполненная воздухом. Воздух в камере при этом не пробивался.

Градуировочная кривая для зарядного напряжения 25 кв приведена на рис.1. Как видно, вплоть до величины $U = 150$ кв, амплитуда выходного импульса генератора линейно растет с увеличением числа включенных секций. В дальнейшем линейность нарушается. Это можно объяснить тем, что при высоких напряжениях нарушаются диэлектрические свойства воздуха. Возникает корона, которая шунтирует генератор, уменьшая амплитуду высоковольтного импульса. Применяемая нами конструкция генератора с воздушными разрядными промежутками позволяет получать амплитуду импульса до 250 кв.

На рис. 2а и 2 в приведены осциллограммы выходных импульсов генератора. Длительность переднего фронта импульса $t \approx 10-15$ нсек определяется в основном емкостью камеры C_k и внутренним сопротивлением генератора R_{Γ} . Спад напряжения на камере (при отсутствии разряда в ней) определяется разрядной емкостью C_{Γ} и C_k через сопротивление высоковольтного пробника $R_n = 5$ ком и сопротивление короны в воздухе R_b .

Особенности распространения разряда в гелиевой стримерной камере

На рис. 3 приведены две фотографии следов заряженных частиц, полученные в гелии при разных значениях длительности высоковольтного импульса, сформированного шунтирующим разрядником. Амплитуды импульсов в обоих случаях равны $U = 125$ кв ($E = 12,5$ кв/см). Фотографирование производилось при относительном отверстии объектива $1 : 2,8$. Как видно, изменение длительности импульса, подаваемого на камеру, при заданной амплитуде приводит лишь к изменению яркости свечения следа. Наибольшая яркость следа достигается при

подаче на камеру высоковольтного импульса без обрывания. При этом вид разрядов, расположенных вдоль следа, и длина ярко светящейся части их (≈ 10 мм) практически не меняется. При напряжении 125 кв уменьшение длительности импульса до 50 нсек приводит к тому, что яркость следов уменьшается настолько, что фотографирование их в заданных условиях становится невозможным.

Таким образом, в гелии не удается наблюдать незавершенный разряд, в то время как в неоне при тех же параметрах высоковольтного импульса разряд обрывается^{х)}. Однако, несмотря на распространение газового разряда на весь разрядный промежуток, потери информации о координатах следа частицы нет. Вследствие кистеобразного, ветвящегося характера разряда, распространяющегося от места возникновения первичной лавины, в разряде выделяется ярко светящийся участок длиной ≈ 10 мм (область максимальной плотности электронов).

Аналогичная картина наблюдается и при высоких напряженностях электрического поля в камере — структура разряда сохраняется при изменении параметров импульса, хотя яркость следов при больших полях сильно возрастает. Одновременно резко возрастает свечение всего газового объема камеры. На рис. 6а приведена фотография следа, полученная при $E = 22$ кв/см и относительном отверстии объектива 1:8,8.

Увеличение задержки высоковольтного импульса до 10 мксек, как оказалось, не приводит к изменению структуры разряда; число разрядов на 1 см \bar{n} также остается при этом неизменным (рис. 8). Увеличение длительности переднего фронта импульса в несколько раз также не меняет характер разряда в камере.

Работа камеры без внешнего формирования высоковольтного импульса

Если амплитуда импульса, подаваемого на камеру, достаточно велика ($E > 10$ кв/см), то видно, что газовый разряд в самой камере шунтирует выход генератора и искажает форму импульса. На рис. 2а и 2в приведены осциллограм-

^{х)} Сопоставление данных о разряде в гелии и в неоне показывает, что скорость распространения разряда в гелии в несколько раз больше, чем в неоне при данном электрическом поле. Это значит, что для получения стримера заданной длины на гелиевую камеру необходимо подать импульс соответственно короче, чем на неоновую камеру, т.е. в конечном счете использовать для разветвления разряда меньшую мощность. Поэтому хорошая локализация следа в гелии может получиться при неприемлемой яркости.

мы выходных импульсов генератора с амплитудами, равными 225 кВ и 175 кВ соответственно. Осциллограммы соответствующих импульсов, сформированных разрядом в камере, приведены на рис. 2б и 2г. Как видно, передний фронт импульса практически не искажается разрядом в камере.

Изменение формы высоковольтного импульса разрядом в камере можно понять, если обратиться к ее эквивалентной электрической схеме (рис. 4). Разрядная цепь выходной емкости генератора импульсных напряжений C_{Γ} состоит из внутреннего сопротивления генератора R_{Γ} , емкости внутреннего объема стримерной камеры C_k , сопротивления газового разряда в камере R_k и емкости стекол, отделяющих объем камеры от электродов C_e . R_b - сопротивление утечки и короны в воздухе, а также R_n - сопротивление высоковольтного пробника велики и не оказывают существенного влияния на процессы, происходящие внутри камеры (мы рассматриваем случай, когда отсутствует шунтирующий разрядник).

Величина R_{Γ} представляет собой сопротивление искрового пробоя разрядных промежутков в генераторе Аркадьева-Маркса и, судя по длительности переднего фронта импульса на камере $t \approx 10-15$ нсек, равно ≈ 300 ом (при $C_k = 30$ пф). При отсутствии развитого разряда в объеме камеры величина напряжения на камере определяется только напряжением на емкости C_k (так как $C_k \ll C_e \approx 200$ пф и $C_k \ll C_{\Gamma}$). Форма импульса при этом зависит также от величин R_b и R_n , которые определяют времена разрядки емкостей (рис. 2а, в).

Возникновение тока в камере, т.е. уменьшение R_k , приводит к разрядке емкости C_k и, следовательно, к изменению напряжения на камере. При этом скорость спада напряжения будет определяться, в основном, величиной $R_k C_k$ (судя по осциллограмме R_k равно ≈ 300 ом, как и R_{Γ}). Одновременно с началом развития разряда в камере начинается зарядка стекла, скорость которой зависит от величины $R_{\Gamma} C_e$ (рис. 2б, г).

При больших амплитудах напряжения, а, следовательно, и при больших скоростях развития разряда в газовом объеме камеры с гелием воздушный искровой разряд при атмосферном давлении не может быть использован для укорачивания высоковольтного импульса. Если шунтирующий разрядный промежуток велик, то разряд в камере завершается и напряжение на ней падает до пробоя шунтирующего промежутка. Если же длина промежутка достаточно мала для возникновения

искрового разряда, то импульс обрывается раньше, чем свечение разряда в камере становится видимым.

Амплитуда импульса на камере U и длительность его T (измеренная на полувысоте) оказываются связанными соотношением $U^2 T = \text{const}$. В нашем случае $E^2 T = 9,8 \pm 1,0 \text{ в}^2 \text{ сек} / \text{см}^2$ для E в интервале от 13 до 22 кв/см. На рис. 5 приведены графики зависимости длительности импульса T и длительности переднего фронта импульса t от амплитуды U . Как видно, величина t практически остается постоянной при всех значениях напряжения вплоть до $U \approx 225 \text{ кв}$.

Как было показано В.А. Любимовым и др. /8/, минимальное значение длительности высоковольтного импульса на разрядной камере с большим промежутком и с металлическими электродами r_{min} , необходимое для возникновения искрового пробоя вдоль трека в неоне, также связано с амплитудой напряженности поля E соотношением $E^2 r_{\text{min}} = \text{const}$. Аналогичное выражение называется справедливым для стримерной камеры, работающей без шунтирующего разрядника, потому что длительность импульса, очевидно, как раз определяется временем, необходимым для образования большого разрядного тока внутри камеры.

Локализация свечения разряда в гелии при наличии малых примесей углеводородов

При наличии в гелиевой камере продуктов выделения вакуумной резины на уровне 0,01–0,02% наблюдается падение общего свечения газового объема камеры, но наряду с этим на многих разрядах появляются ярко светящиеся центры, причем их размеры в направлении электрического поля составляют 1–2 мм (рис.6в). Яркость следов, состоящих из этих "точек", примерно на два порядка выше, чем удавалось до сих пор получить в неоновой камере при такой же степени локализации следа /1/ и достаточна для фотографирования на пленку чувствительностью 1000–1200 ед. ГОСТ при относительном отверстии объектива 1:5,6.

Описанное явление получено в камере, работающей без шунтирующего разрядника; при этом высоковольтный импульс формируется разрядом в камере, как сказано в предыдущем параграфе. Параметры (форма и длительность) импульсов, сформированных разрядом в камере с "точками" и в камере с чистым гелиевым

наполнением, практически совпадают. Необходимо подчеркнуть, что разряд распространяется на весь объем камеры (как видно из рисунка), и светящиеся центры связаны только с соответствующим распределением интенсивности свечения, а не с ограничением разряда.

Число "точек" на единицу длины следа: \bar{n}_T растет с увеличением амплитуды высоковольтного импульса. При уменьшении напряжения до $U = 125$ кв "точки" пропадают. На рис. 7 приведены графики зависимости от напряжения величины \bar{n}_T , а также \bar{n} - числа разрядов на единицу длины вдоль следа. Нужно отметить, что размеры "точек" практически не зависят от амплитуды высоковольтного импульса (во всяком случае вплоть до 250 кв).

При изменении задержки импульса в пределах от 1 до 10 мксек количество "точек" на единицу длины следа не меняется (рис. 8). Число "точек" \bar{n}_T сохраняется также при увеличении в 1,5-2 раза длительности фронта высоковольтного импульса.

В целях выяснения природы влияния на разряд примесей, выделяемых вакуумной резиной, было предпринято изучение спектрального состава излучения разряда. Камера фотографировалась через различные светофильтры. Как [оказалось, спектр излучения "точек" лежит преимущественно в области длин волн, больших 6500 \AA , так же, как и спектр излучения гелия. Излучение же газового объема лежит в синей области спектра, что соответствует свечению добавки.] Наблюдаемое распределение излучения в разряде по спектральному составу, по-видимому, можно объяснить следующим образом. Наличие в гелии добавок с большим числом низких уровней уменьшает среднюю энергию электронов и, соответственно, количество электронов с энергией, большей, чем энергия возбуждения гелия. Поэтому эффективное возбуждение атомов гелия возможно только в области достаточно большой концентрации электронов. Наибольшей плотность электронов в разряде будет в области первичной лавины, т.е. в области следа частицы. Поэтому именно в области следа будет наблюдаться свечение гелия, в то время как в остальной части объема камеры наблюдается преимущественно свечение примеси. Такой подход согласуется с ростом числа "точек" \bar{n}_T при увеличении амплитуды высоковольтного импульса (поскольку плотность электронов в разряде сильно возрастает с ростом амплитуды импульса).

Наиболее вероятно, что резина выделяет различные углеводороды (скорее всего, тяжелые). Действительно, добавление к гелию тяжелых углеводородов приводит к резкой локализации следов частиц в камере. На рис. 9а, 9б, 9в соответственно приведены фотографии следов заряженных частиц в камере, наполненной гелием с добавками бензола, гексана и α -пинена (скипидара). Концентрация добавки во всех трех случаях равнялась 0,1%. Фотографирование производилось при относительном отверстии объектива 1:2,8, амплитуда высоковольтного импульса равнялась 225 кв. Отмечается резкое падение общего свечения газового объема камеры по сравнению с чистым гелиевым наполнением.

Уменьшение концентрации бензола и гексана приводит к увеличению общей светимости газового объема камеры и к удлинению ярко светящейся области разряда. Примесь же скипидара на уровне сотых долей процента влияет на картину разряда таким же образом, как и примеси, выделяемые резиной. На многих разрядах возникают такой же яркости светящиеся центры размером ≈ 2 мм (рис. 9б), наблюдается аналогичное распределение излучения в разряде по спектральному составу.

Таким образом, введение в гелиевую стримерную камеру добавок сложных углеводородов позволяет без специального формирования высоковольтного импульса локализовать след заряженной частицы. По-видимому, локализация улучшается, если в качестве примеси вводятся все более сложные углеводороды. Различный спектральный состав излучения разных участков разряда и большая яркость "точек" дают возможность повышения контрастности изображения следов путем устранения засветки от свечения объема камеры с помощью соответствующих светофильтров (например, КС-15). Возможно, что исследованные добавки не являются наиболее оптимальными с точки зрения управления разрядом.

З а к л ю ч е н и е

Метод управления газовым разрядом с помощью малых добавок может оказаться весьма перспективным для техники газоразрядных камер и требует дальнейшего изучения и развития. Он значительно упрощает конструкцию и эксплуатацию установки со стримерной камерой и дает при этом хорошую локализацию ярко светящихся следов. Малый уровень примеси, необходимый для уже значительного влияния на распределение интенсивности свечения разряда, позволяет

считать основной газ "чистым" при физических экспериментах, в которых камера играет роль газовой мишени.

В заключение мы благодарим В.Н. Бушуева, А.Г. Жукова, Н.В. Лебедева, С.П. Михеева, В.И. Орехова, В.Ф. Поенко, А.Г. Потехина за помощь в работе, а также Б.М. Смирнова и О.Б. Фирсова за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. Г.Е. Чиковани, В.Н. Ройнишвили, В.А. Михайлов, А.К. Джавришвили. Международная конференция по физике частиц высоких энергий, Дубна 1964.
2. Б.А. Долгошеин, Б.И. Лучков, Б.У. Родионов. ЖЭТФ, 46, 1953 (1964).
3. М.М. Кулюкии, Д.Б. Понтекорво, И.В. Фаломки, Ю.А. Щербаков, ПТЭ, 6, 70 (1965).
4. М.М. Кулюкии, Д.Б. Понтекорво, И.В. Фаломкии, Д.М. Хазинс, Ю.А. Щербаков. Препринт ОИЯИ Р13-2988, Дубна 1966.
5. М.М. Бутслов, В.И. Комаров, О.В. Савченко. Препринт ОИЯИ Р-1619, Дубна 1964.
6. E. Gygi and F. Schneider. Preprint CERN,66-14
7. Дж. Мик, Дж. Крэгс. Электрический разряд в газах, 1956, Изд-во иностранной литературы.
8. С. Браун. Элементарные процессы в плазме газового разряда, 1961, Госатомиздат.
9. В.А. Любимов, Ю.В. Галактионов, Ф.А. Павловский, Ф.А. Еч, И.В. Сидоров. Препринт ИТЭФ 269 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 января 1967 г.

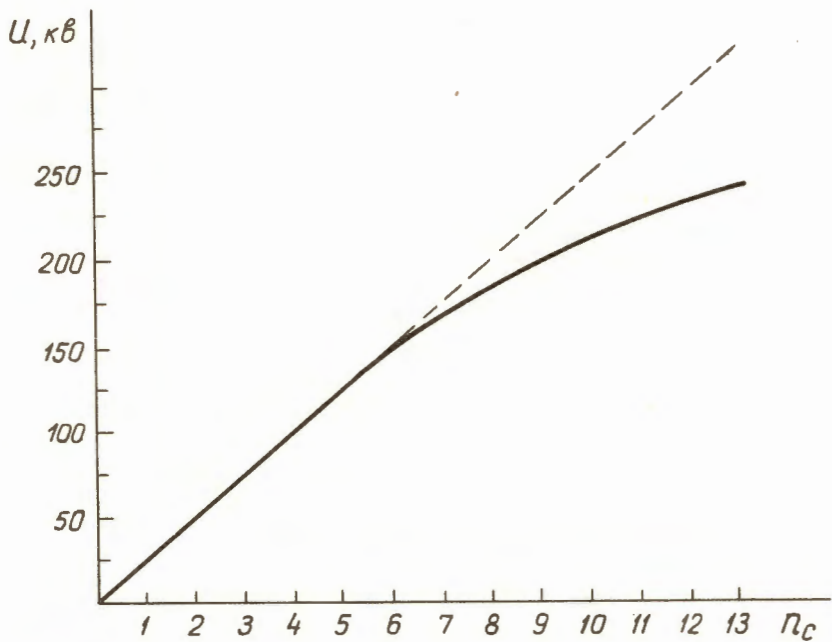


Рис. 1. Кривая калибровки генератора импульсных напряжений. n_c - число включенных конденсаторных секций. U - амплитуда выходного импульса генератора.

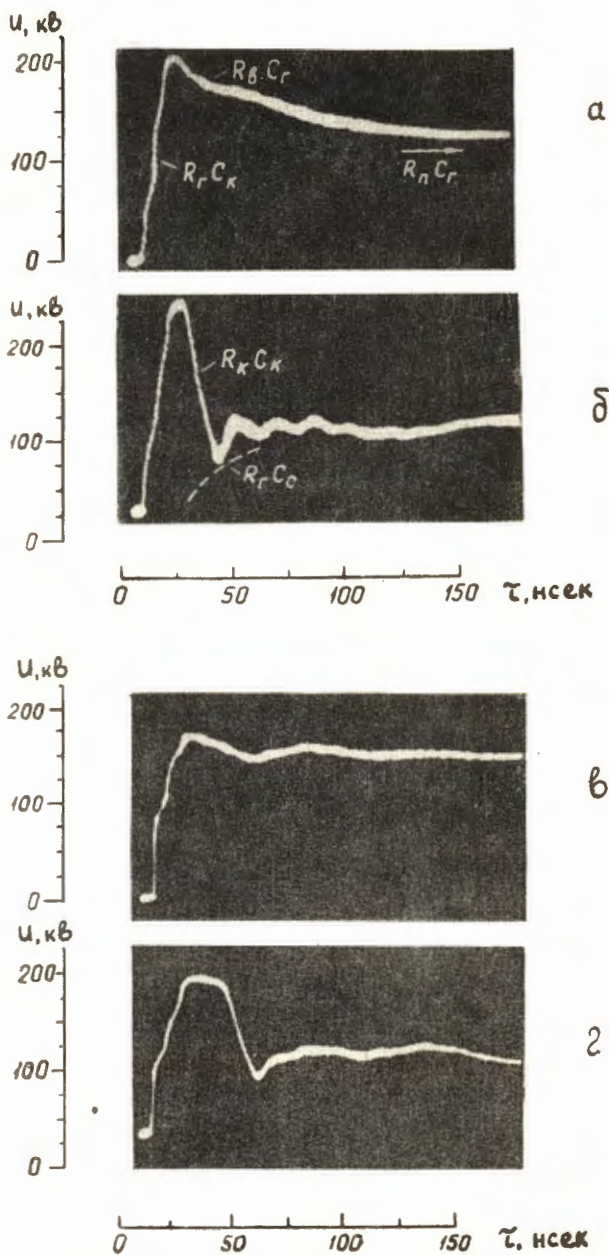
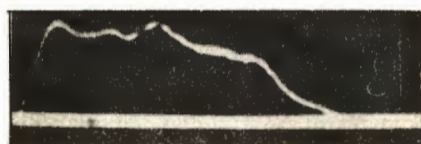


Рис. 2. Осциллограммы выходных импульсов генератора (а, в) и импульсов, сформированных разрядом в камере (б, г).

CM
3
2
1
0



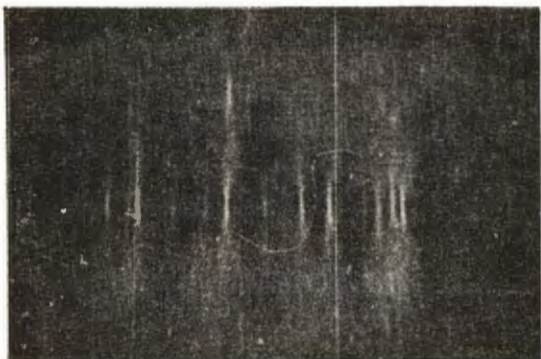
a



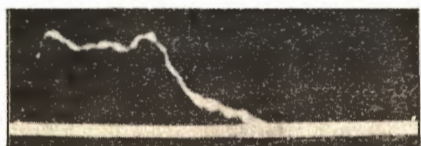
b

0 50 100 150 τ сек

CM
3
2
1
0



v



g

0 50 100 150 τ сек

Рис. 3. Фотографии следов заряженных частиц в гелии особой чистоты (а, в) и соответствующие осциллограммы импульсов (б, г).

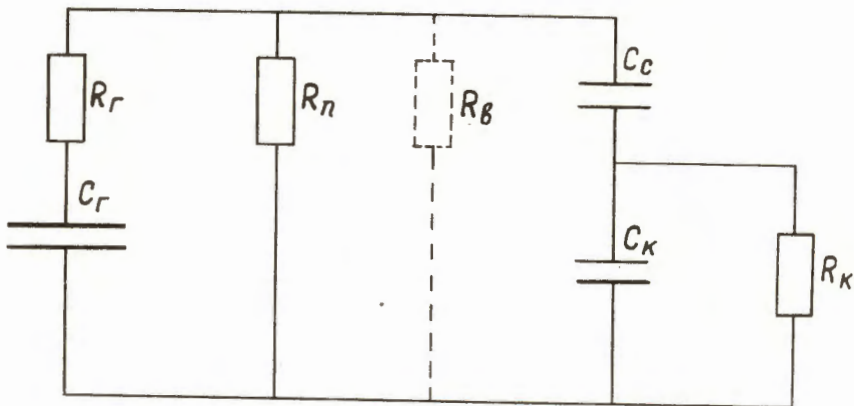


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема стримерной камеры.

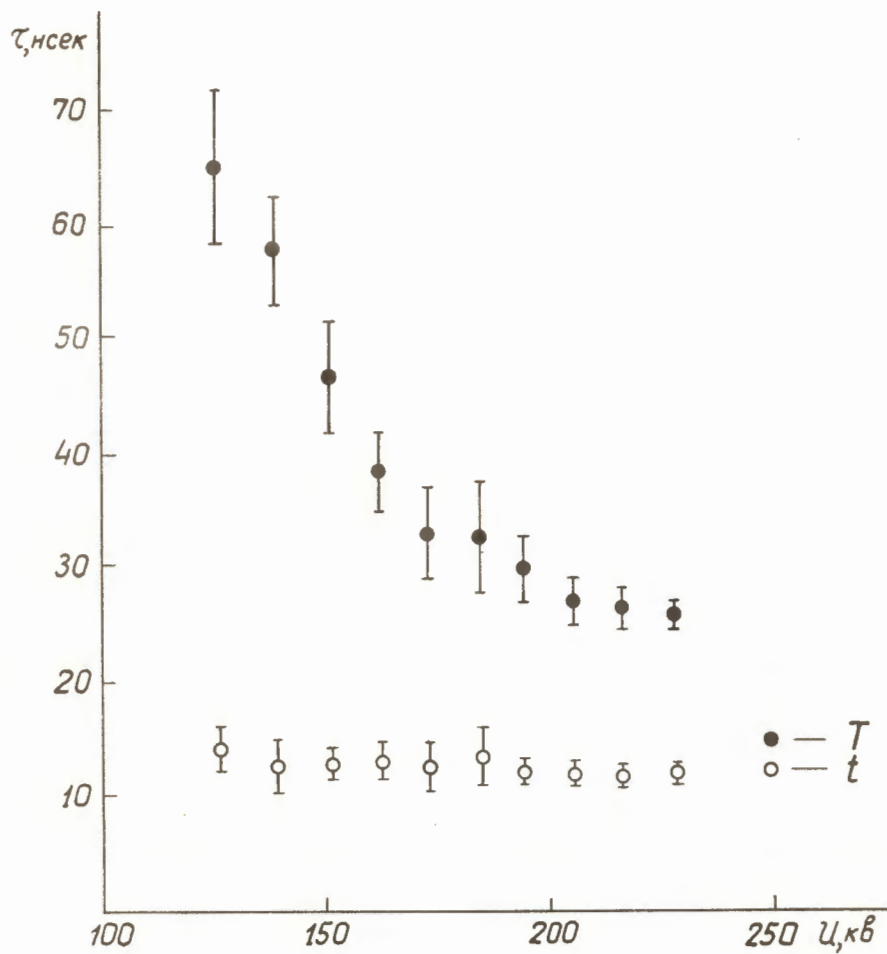


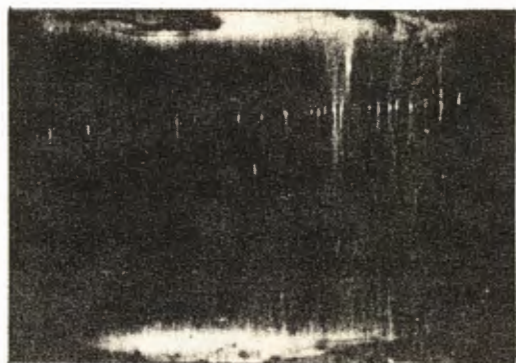
Рис. 5. Графики зависимости длительности импульса T и переднего фронта импульса t от амплитуды высоковольтного импульса U .



а



б



в

0 1 5 см

Рис. 8. Фотографии следов заряженных частиц в гелевой камере: а - без добавок, б - с добавкой скипидара ($\approx 0,02\%$), в - с добавкой продуктов выделения вакуумной резины на уровне $\approx 0,01\%$.

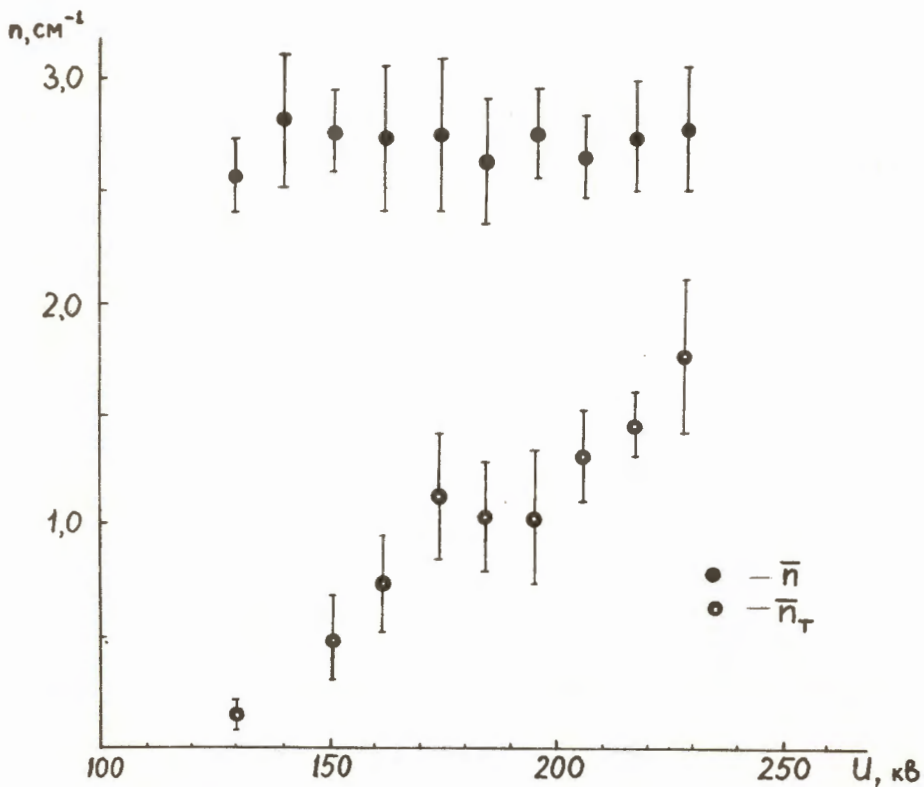


Рис. 7. Графики зависимости числа "точек" \bar{n} и числа разрядов \bar{n}_T на единицу длины следа от амплитуды высоковольтного импульса.

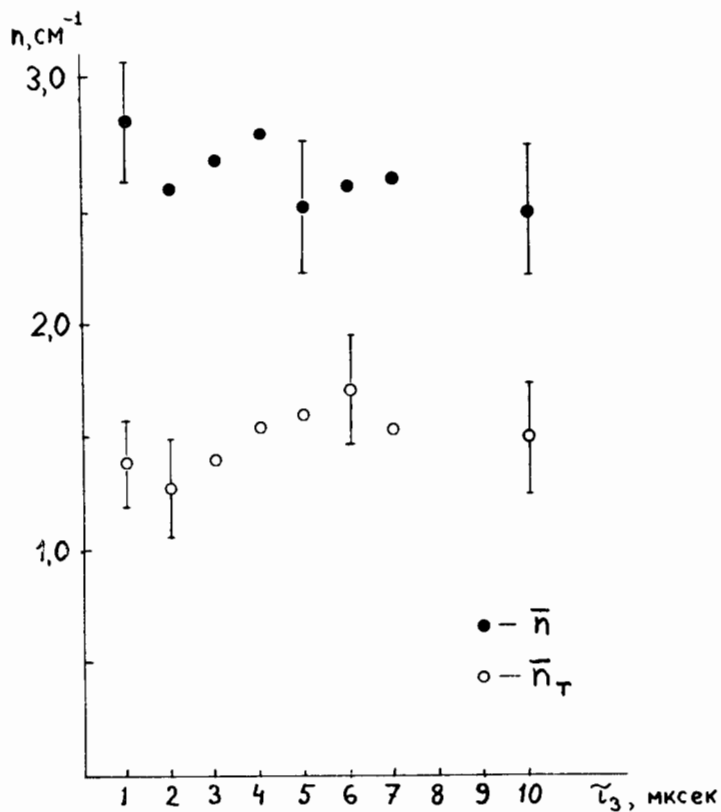
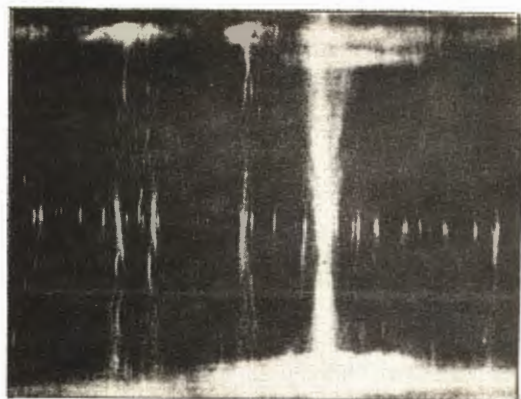


Рис. 8. Графики зависимости числа "точек" \bar{n} и числа разрядов \bar{n}_T на единицу длины следа от задержки высоковольтного импульса τ_3 .



а



б



в

0 1 5 см

Рис. 9. Фотографии следов заряженных частиц в гелевой камере с добавками бензола (а), гексана (б) и скипидара (в). Концентрации добавок равны 0,1%.