

94-317



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-94-317

В.Д.Аксиненко, Н.С.Глаголева, А.Т.Матюшин,
В.Т.Матюшин, Н.Н.Нургожин*, И.С.Саитов

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК
ИСКРОВЫХ КАМЕР, НАПОЛНЕННЫХ НЕОНОМ
С ПРИМЕСЬЮ ВОЗДУХА

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

*Институт физики высоких энергий,
Национальная академия наук Республики Казахстан, Алма-Ата

1994

В работе [1] приведены результаты исследования метода измерения времени памяти стримерной камеры с помощью вспомогательной искровой камеры, позволяющей контролировать время жизни свободных электронов в рабочем газе — неоне с примесью воздуха в качестве добавки, сокращающей это время. В процессе разработки этого метода и его применения в физических экспериментах на ускорителе с использованием стримерной камеры выявлены некоторые специфические особенности характеристик искровой камеры, связанные с присутствием воздуха в неоне. Эти особенности представляют определенный интерес, так как все газоразрядные детекторы окружены воздухом, натекание которого внутрь чувствительного объема детектора вполне вероятно. Они позволяют глубже разобраться в механизме образования трека в искровых и стримерных камерах. В данной статье представлены результаты более детального изучения этих особенностей искровых камер.

В упомянутой работе [1] были использованы две разные по конструкции искровые камеры, регистрация искр в которых производилась с помощью трансформаторов тока с ферритовыми сердечниками.

Первая камера представляла собой металлостеклянную коробку с окнами для установки проволочных электродов — латунных рамок площадью $14 \times 14 \text{ см}^2$, обмотанных проволокой типа БрБ2 диаметром 0,1 мм с шагом 1 мм. Искровой зазор камеры изменялся от 3,7 до 30 мм путем замены втулок из оргстекла, к которым крепились рамки электродов. Герметизация окон была осуществлена с помощью лавсановой пленки толщиной 100 мкм и вакуумной резины. Внутренний объем камеры — 1,2 л.

Вторая камера была полностью металлостеклянная и имела два смежных автономных по газу искровых промежутка по 10 мм и сплошные электроды площадью $42 \times 42 \text{ см}^2$. Рабочий газ камеры контактировал с деталями только из стекла и металла, что предотвращало изменение его состава за счет натекания воздуха и значительно уменьшало гажение. Объем одного промежутка камеры — 1,5 л.

Как оказалось, характеристики этих камер из-за малого объема газа были чувствительны к интенсивности искрообразования, особенно в том случае, если проток газа через них перекрывался. Это могло приводить к искажению результатов измерений времени жизни электронов в газе камеры при слабом протоке газа. Кроме того, газ требуемого состава в них можно было получить только методом создания его протока через камеру.

Поэтому, помимо двух упомянутых искровых камер, в процессе изучения влияния примеси воздуха к неону использовалась третья камера существенно большего объема (36 л) и с повышенной чувствительностью устройства регистрации искр (ФЭУ). Камера содержала сетчатые электроды с плавно регулируемым искровым зазором внутри герметизированного объема. Возможность его полного вакуумирования, а также создания избыточного давления в камере до 1 МПа позволяла осуществлять различные варианты приготовления газовой смеси заданного состава по парциальному давлению вводимой примеси. Более подробно конструкция камеры описана в [2].

Блок-схема установки приведена на рис.1. Запуск искровой камеры (ИК) осуществлялся от космических частиц с помощью сцинтилляционных счетчиков (C_1-C_2 ; ФЭУ₁-ФЭУ₃), сигналы от которых поступали на формирователи импульсов (Ф₁-Ф₃), затем на схему совпадений (СС) и далее на коммутирующее устройство (К). Последнее обеспечивало автоматическое переключение линий задержек (ЛЗ₁-ЛЗ₃) и соответствующих счетчиков (ПС₁-ПС₃) таким образом, что при работе камеры осуществлялся последовательно-параллельный набор данных сразу при трех значениях задержки, хотя, в принципе, если все работает правильно, а

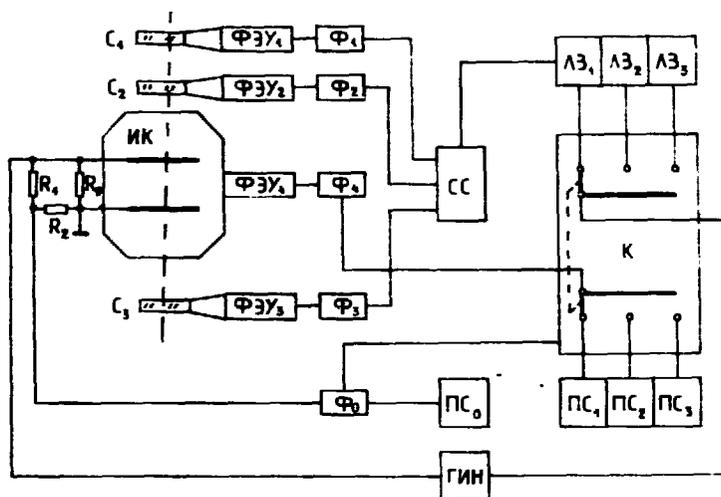


Рис.1. Блок-схема установки: ИК — искровая камера, C_1-C_3 — сцинтилляционные счетчики, ФЭУ — фотоэлектронные умножители, Ф — формирователи импульсов, СС — схема совпадений, ЛЗ — линии задержек, ПС₀-ПС₃ — пересчетные устройства, ГИН — генератор импульсных напряжений, R — резисторы, К — коммутатор

диффузией электронов можно пренебречь, достаточно двух значений. Поэтому третья точка могла быть использована в качестве контрольной.

Сигнал с коммутирующего устройства запускал генератор импульсных напряжений (ГИН). Высоковольтный импульс подавался на камеру, искровой промежуток которой был шунтирован резисторами ($R_0 - R_2$) с эквивалентным сопротивлением 50 Ом (волновое сопротивление кабеля). От делителя напряжения ($R_1 R_2$), установленного на камере, через формирователь Φ_0 сигнал подавался на счетчик числа запусков ($ПС_0$) и на коммутирующее устройство для перевода его в новое состояние.

Эффективность запуска была не хуже 0,99. Регистрация искр производилась с помощью ФЭУ₄, что давало возможность проведения измерений при малых уровнях светимости следов вплоть до отдельных стримеров.

Измерения концентрации воздуха производились с помощью градуированного (в диапазоне 0,05÷100% воздуха) газоразрядного датчика [3], который устанавливался внутри объема камеры.

Вычисление постоянной прилипания τ , характеризующей время жизни свободных электронов в искровом зазоре, производилось с помощью соотношения, выведенного в работе [1]:

$$\tau = (t_2 - t_1) / \{ \ln \ln (1 - \eta_1)^{-1} - \ln \ln (1 - \eta_2)^{-1} \}, \quad (1)$$

где $\eta_1 = \eta(t_1)$ и $\eta_2 = \eta(t_2)$ — любые два значения эффективности камеры, измеренные при двух разных значениях времени задержки t_1 и t_2 высоковольтного импульса. Под эффективностью искровой камеры, как обычно, понималось отношение числа зарегистрированных частиц к количеству запусков камеры, а временем ее памяти считалось время задержки, при котором эффективность снижалась вдвое.

Первая из наблюдавшихся особенностей работы искровой камеры — это явно выраженное снижение требуемой амплитуды высоковольтного импульса в присутствии воздушной примеси в неоне по сравнению с чистым неоном, связанное, очевидно, с наличием в ней аргона (эффект Пеннинга).

Для измерений необходимо было выбрать какую-либо точку отсчета эффективности регистрации при изменении амплитуды высоковольтного импульса по мере повышения или снижения концентрации воздуха в камере. Удобной оказалась точка, соответствующая 50% эффективности, так как в начале регистрации искровая камера очень чувствительна к напряжению.

На рис.2 представлены зависимости амплитуды высоковольтных импульсов, точнее, зарядного напряжения генератора (зарядная емкость с

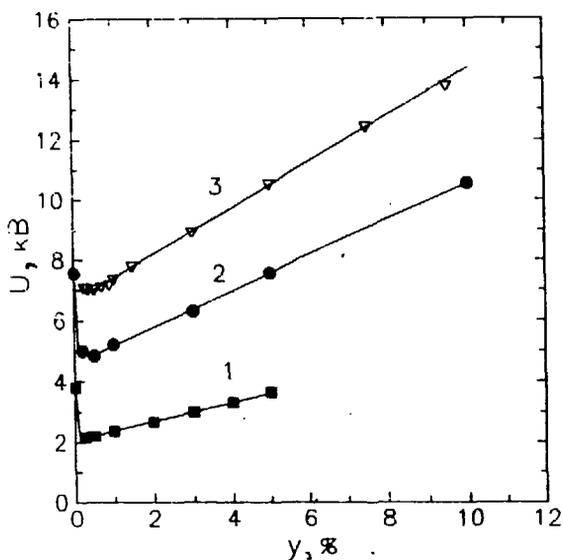


Рис.2. Зарядное напряжение U генератора, соответствующее 50% эффективности искровой камеры, в зависимости от концентрации воздуха y в неоне при различных величинах искрового зазора l и зарядной емкости C : $l=0,37$ см, $C=7,5$ нФ (кривая 1), $l=1$ см, $C=5,6$ нФ (кривая 2), $l=1$ см, $C=2,2$ нФ (кривая 3)

водородным тиратроном), соответствующего 50% эффективности камеры при задержке импульса 1 мкс, от концентрации воздуха в неоне для различных величин искровых промежутков и зарядных емкостей. На этих кривых при концентрации воздуха около четверти

процента наблюдается минимум, при больших же концентрациях зависимость практически линейна. Обращают на себя внимание почти вдвое меньшее напряжение при концентрации воздуха 0,2—0,3% по сравнению с чистым неоном и неожиданно высокая эффективность узкого зазора ($l=3,7$ мм, кривая 1) вплоть до значительной примеси воздуха ($y=5\%$). Если в металлостеклянной камере (кривая 2) удалось достичь предельной чистоты паспортизованного неона промышленного производства («Неон высокой чистоты») при непрерывном его продуве из баллона, когда увеличение протока не требовало изменения напряжения на тиратроне генератора ($U=7,6$ кВ), то в другой камере с таким же зазором (кривая 3) это было затруднительно из-за повышенного расхода неона, связанного с ее достаточно большим объемом (36 л) и длительным газовыделением внутри камеры даже после продолжительного вакуумирования ее объема. Однако во всех трех камерах диапазон с малыми примесями воздуха ($y \leq 0,5\%$) был труден для проведения измерений из-за сравнительно медленного, но заметного процесса выделения и поглощения воздуха материалами конструкции (адсорбции, десорбции и др.). Очевидно, именно поэтому и в больших стримерных камерах стабильный режим устанавливается лишь через несколько суток работы.

Линейный участок зависимости напряжения от концентрации воздуха в искровой камере (рис.2) можно использовать для измерения концентрации воздуха в проходящем через камеру газе. Так, при подготовке очередного сеанса облучения стримерной камеры [4] через нее был установлен постоянный проток чистого неона из баллона, а часть выходящего из стримерной камеры газа пропускалась через искровую. На рис.3 представлены результаты измерений концентрации воздуха в выходящем из

стримерной камеры газе, полученные с помощью искровой камеры с межэлектродным зазором 3,7 мм. Результаты измерений практически совпадают с расчетным снижением концентрации воздуха в стримерной камере при установленном протоке газа (91 л/час) и известном ее объеме (1100 л).

Анализ характеристик показал также, что в пределах прямой пропорциональной зависимости напряжения от концентрации воздуха в искровой камере зависимость постоянной прилипания, вычисленной по приведенной выше формуле (1), обратно пропорциональна концентрации воздуха (рис.4).

Следующая наблюдавшаяся особенность работы искровой камеры — это ее малое (2—3 мкс) время памяти при заполнении неоном высокой чистоты (паспортизованный неон промышленного производства), а также резкое увеличение памяти (по сравнению с чистым неоном) при небольших (сотые доли процента) примесях воздуха. Практически неона с таким малым количеством примесей в искровых и стримерных камерах не бывает, так как для этого необходимо было бы принимать специальные меры по его тщательной очистке, в том числе и от аргона, которого в воздухе достаточно много. Описанная выше металлостеклянная искровая камера при перекрытии газовых вводов длительное время (месяцы) сохраняла газовый состав

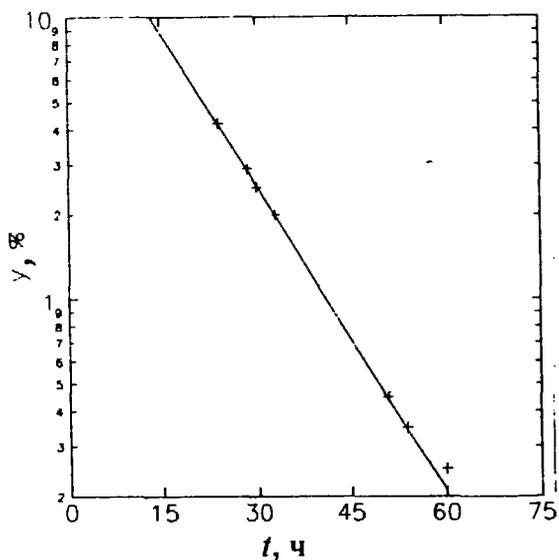
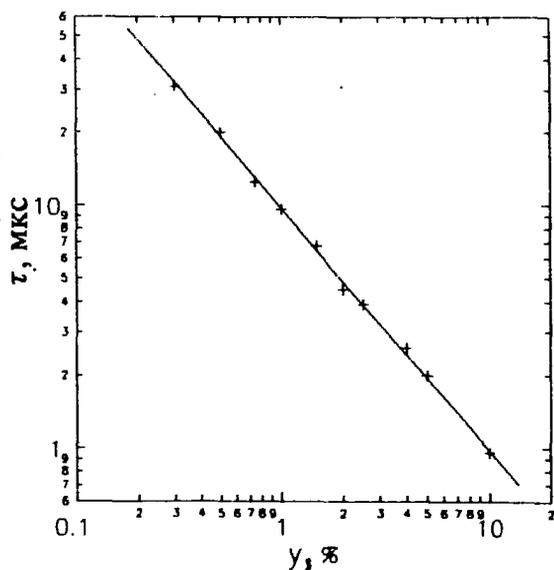


Рис.4. Зависимость постоянной прилипания τ от концентрации воздуха y

Рис.3. Снижение концентрации воздуха в стримерной камере по результатам измерений с помощью вспомогательной искровой камеры. Сплошная линия — расчетная прямая при известных протоке газа и объеме камеры (91 л/ч, 1100 л)



(неон с примесью воздуха на уровне сотых долей процента), т.е. натекание и гажение были ничтожны. Тем не менее требовалось несколько суток продувать эту камеру со скоростью 1,5 л/час (смена газа в ее объеме за час) неонем высокой чистоты через металлический трубопровод с металлическими мембранными вентилями (типа КВ—2МС) для того, чтобы приблизить чистоту газа в камере к чистоте газа в баллоне. При этом трубопровод был предварительно вакуумирован и неоднократно на протяжении месяца «промыт» неонем из баллона.

Изложенное выше иллюстрирует рис.5, где наклон линий определяется временем памяти: чем круче наклон, тем меньше память. Зависимость 1 — это состояние камеры, продуваемой чистым неонем из баллона до тех пор, пока дальнейшее увеличение протока неона не приводило к прекращению снижения времени памяти. Затем вентили камеры были перекрыты и данные на линии 2 получены спустя 1,5 месяца, после чего через камеру был восстановлен прежний проток неона из баллона. Память камеры стала резко возрастать, в какой-то момент достигая сотен микросекунд, а затем начала медленно снижаться. Зависимость 3 получена через 2 часа, а зависимость 4 — через 8 часов после восстановления протока неона. Попытки определить концентрацию микропримеси с помощью хроматографа типа ЛХМ-8МД успеха не имели, так как чувствительность искровой камеры к примесям воздуха оказалась выше. Это обстоятельство можно использовать для контроля чистоты промышленного неона.

Малое время памяти искровой камеры с чистым неонем связано, по видимому, с высокой скоростью диффузии электронов в нем, так как время их жизни в чистом неоне, как известно, велико. Высокая скорость дрейфа электронов способствует быстрому рассасыванию их сгустков-кластеров, образованных при термализации первичных электронов («кластерная

память» [1]), а также значительному росту доли свободных электронов следа, потерянных на электродах камеры.

Интересной и впервые отмеченной в работе [4] особенностью камеры, заполненной неонем с примесью воздуха, является сокращение ее памяти по мере увеличения искрения внутри объема,

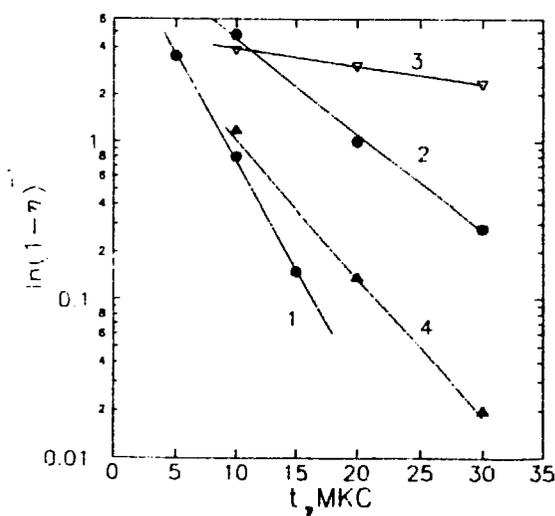
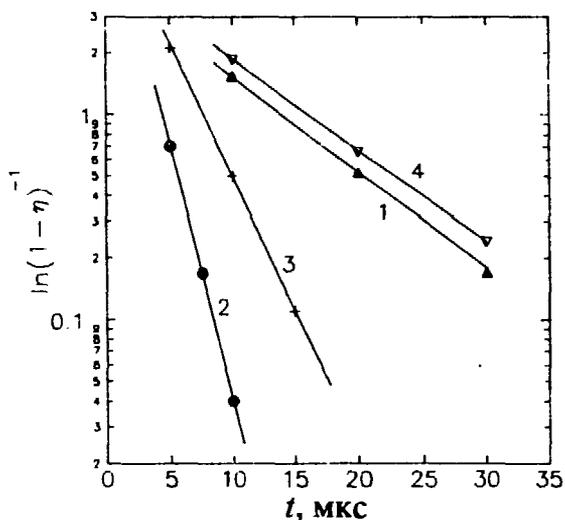


Рис.5. Зависимость $\ln(1 - \eta)^{-1}$ от времени задержки t в металлоглазной камере после ее длительного продува чистым неонем ($l=1$ см, $U=8$ кВ, $C=5,6$ нФ)

Рис.6. Зависимость $\ln(1-\eta)^{-1}$ от времени задержки t при $l = 1$ см, $U = 10$ кВ, $C = 2,2$ нФ для камер с протоком рабочего газа (линия 1) и без него (линии 2—4)



причем тем сильнее, чем меньше объем камеры, больше частота и мощность искр и значительнее концентрация воздуха. Интенсивное же искрение (3 ÷ 3,5 тыс. искр за час) в металлостеклянной камере приводило к резкому (на порядок) сокращению ее времени памяти, которое при

отсутствии искрения и протока газа через сутки возрастало.

Характерен следующий эксперимент. Металлостеклянная камера была установлена под 36-литровой так, что система запуска от космических частиц у них была общей, искровые зазоры в обеих камерах были одинаковы (по 10 мм). Нижняя камера и все металлические трубопроводы, соединяющие камеры, были предварительно «промыты» неонem. В 36-литровую камеру, содержащую определенное количество воздуха, добавлялся неон для создания в ней избыточного давления газа. На следующий день этим газом продувалась металлостеклянная камера и производились измерения ее времени памяти (рис.6, линия 1). Затем газовые вводы камеры перекрывались и после предварительного искрения (100 искр, $U = 12$ кВ, $C = 2,2$ нФ, $t = 1$ мкс) снималась зависимость 2, после чего камера была выключена, и спустя двое суток получена зависимость 3 (вводы не открывались). По мере выхода газа, после выравнивания давления в 36-литровой камере с атмосферным, такие же измерения были сделаны и в ней (линия 4). При этом с помощью газоразрядного датчика, установленного в 36-литровой камере, измерялась концентрация воздуха, которая была близка к расчетной по смешиваемым объемам воздуха и неона (1,3%). При достаточно интенсивном протоке газа из 36-литровой камеры через металлостеклянную (смена 8—10 ее объемов в час) влияние искрения при ее работе на время памяти было мало, что видно из одинакового наклона линий 1 и 4. При выключении камеры на двое суток ее память заметно возросла, поэтому наклон линии 3 меньше, чем линии 2.

Похожая картина наблюдалась во всем исследованном диапазоне концентраций воздуха в неоне от 0,3% до 5%. Попытки выявить образующиеся при искрообразовании новые соединения с помощью упомянутого лабораторного хроматографа типа ЛХМ-8МД, с использованием неона в качестве основного газа-носителя, результатов также не дали из-за чрезвы-

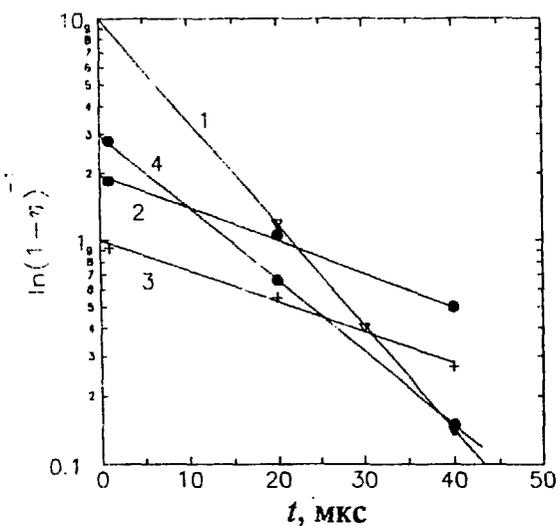


Рис.7. Зависимость $\ln(1-\eta)^{-1}$ от времени задержки t в 36-литровой камере при давлении $P = 0,1$ МПа (линия 1), $P = 0,01$ МПа (линии 2—4) и неизменной величине $C = 2,2$ нФ. Зависимость 1: $U = 12$ кВ, $l = 1$ см; 2: $U = 10$ кВ, $l = 2$ см; 3: $U = 5$ кВ, $l = 1$ см; 4: $U = 13$ кВ, $l = 3$ см

чайно малой концентрации и неустойчивости новых соединений. Однако известно, что в электрическом разряде в атмосфере воздуха интенсивно образуются такие неустойчивые соединения, как озон и окислы азота, обладающие большим сечением захвата электронов.

Как показано в работе [1], если в искровой камере, содержащей примесь воздуха, длина критической лавины много меньше искрового зазора l камеры, а напряженность поля, создаваемого высоковольтным импульсом, достаточна для инициирования лавины от одиночных электронов, то

$$\ln \ln [1 - \eta(t)]^{-1} = \ln (l dN_1 / dx) - t / \tau, \quad (2)$$

где dN_1 / dx — удельная первичная ионизация газа.

В связи с этим следующей особенностью искровой камеры с примесью воздуха является возможность измерения первичной ионизации газа путем экстраполяции зависимости $\ln [1 - \eta(t)]^{-1}$ в точку, соответствующую $t = 0$. Или, практически, прямые измерения ионизации, производимой заряженной частицей в камере с низким давлением газа при малой задержке высоковольтного импульса, в отличие от работы [5], где первичная ионизация в камере с чистым неоном получена в зависимости от расчетного диффузионного среднеквадратичного отклонения электронов, образованных заряженной частицей в газе камеры.

Для примера на рис.7 приведены некоторые зависимости, полученные с помощью 36-литровой камеры, в которой процесс искрообразования сказывался на ее характеристиках значительно слабее, особенно при большей задержке высоковольтного импульса и пониженном давлении газа. Пересечение линий с осью ординат есть число первичных (до термализации) электронов в искровом зазоре. С учетом давления P это число $n = l(dN_1 / dx)(P / P_0)$, где P_0 — атмосферное давление. Тогда $(dN_1 / dx) =$

$= n(P_0/P)/l$. Зависимость I (по 100 отсчетов на точку) была получена после откачки воздуха из камеры и заполнения ее неона до атмосферного давления за два дня до измерений. Остаточная концентрация воздуха при измерениях составила 1,1%. На следующий день давление в камере путем откачки газа было снижено в 10 раз и произведены измерения при двух значениях искрового зазора: 1 и 2 см (зависимости 2 и 3 по 50 отсчетов на точку). Время памяти соответственно возросло (в $\sqrt{P_0/P}$ раз). После этого искровой зазор был увеличен до 3 см и зависимость 4 получена спустя три дня (по 900 отсчетов на точку), концентрация воздуха к этому времени возросла почти вдвое (натекание и гажение).

Из рис. 7 видно, что удельная первичная ионизация, приведенная к атмосферному давлению, близка к 10 см^{-1} для всех зависимостей, хотя статистическая погрешность измерений у них разная (14% для линий 2 и 3 и 3,3% для линии 4). Если привести давление и температуру газа к нормальным условиям, то измеренная таким способом величина удельной первичной ионизации неона с учетом возможных систематических ошибок близка к $(11 \pm 1) \text{ см}^{-1}$.

Эта величина в пределах ошибок измерений совпадает с данными, полученными разными авторами и приведенными в работе [5], где значение измеренной удельной первичной ионизации неона при нормальных условиях, производимой релятивистскими электронами в минимуме ионизации, находится в пределах $10,6 \div 12,4 \text{ см}^{-1}$.

Определенный интерес может представлять возможность применения искровой камеры для измерения сечения прилипания электронов к молекулам примеси. Это сечение можно назвать также сечением захвата [6] электронов, точнее, средним сечением захвата, так как оно суммирует сечения ряда процессов, происходящих в газе при наличии примесей (фотоприлипание, захват электрона с участием трех тел, захват электрона молекулой с последующей передачей возбуждения третьему телу, диссоциативный захват).

Сечение прилипания σ можно вычислить, полагая, что $\tau = 1/n\upsilon\sigma$, где n — число молекул в единице объема, υ — концентрация примеси, υ — скорость тепловых электронов.

Усредненное по нашим многократным измерениям постоянной прилипания τ значение сечения прилипания электронов к молекулам воздуха в неоне $\sigma = (3 \pm 0,3) \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$. Оно вычислено в предположении, что за время задержки высоковольтного импульса электроны полностью термализованы и, если считать, что захват электронов обусловлен, в основном, кислородом, содержание которого в воздухе составляет пятую часть, то

$\sigma(O_2) = 1,5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$. Близкое значение $\sigma(O_2) = (1,60 \pm 0,15) \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ получено нами по измерениям постоянной прилипания в 36-литровой камере при непосредственном добавлении в нее кислорода.

Добавление даже 6% азота в камеру с неоном, содержащим 0,5% воздуха, заметного влияния на память камеры не оказало.

Кроме того, был проделан опыт по измерению сечения прилипания тепловых электронов в искровой камере, наполненной неоном с насыщающими парами воды. Полученное значение $\sigma(H_2O) = (7,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$. По данным [7], полученным в стримерной камере, $\sigma(H_2O) = (7,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$.

Точность измерений первичной ионизации и сечения прилипания в искровой камере может быть повышена не только уменьшением влияния отмеченных выше факторов, но и совершенствованием системы запуска камеры (отбор только одиночных моноэнергичных частиц в узком интервале углов).

Таким образом, можно отметить следующие особенности характеристик искровой камеры, наполненной неоном с примесью воздуха, а также возможности их использования в практике физических измерений:

1. Наличие явно выраженного минимума на зависимости напряжения питания камеры от концентрации воздуха в районе $0,3 \pm 0,5\%$. Напряжение питания камеры с чистым неоном и зазором до 1 см почти вдвое больше, чем в минимуме, и равно напряжению питания камеры с 4—5% воздуха.

2. При увеличении концентрации воздуха в камере свыше $0,3 \pm 0,5\%$ линейная зависимость напряжения питания от концентрации воздуха до концентрации 10% (пока наблюдалась локализация искры по треку).

3. Малое (2—3 мкс) время памяти искровой камеры с зазором 1 см, наполненной чистым неоном (неон «высокой чистоты» промышленного производства).

4. Быстрый рост памяти и резкое снижение напряжения питания при появлении малой примеси воздуха ($<0,1\%$) в чистом неооне камеры.

5. Появление микропримесей ($<0,01\%$) продуктов разложения молекул воздуха и образование новых нестабильных соединений в искровом разряде при работе камеры, которые существенно сокращают ее время памяти.

6. Возможность измерения первичной ионизации газа с примесью воздуха.

7. Возможность измерения сечения прилипания тепловых электронов к молекулам примеси различных газов.

В заключение авторы выражают благодарность за помощь на отдельных этапах работы Ю.Н.Волкову, В.Д.Володину, Н.Н.Графову, Е.А.Матюшиной, В.Я.Рубцову, О.Ю.Тятюшкиной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксиненко В.Д. и др. — Препринт ОИЯИ Р13-94-309, Дубна, 1994.
2. Володин В.Д. и др. — ПТЭ, 1983, №4, с.60.
3. Аксиненко В.Д. и др. — ПТЭ, 1993, №2, с.204.
4. Аксиненко В.Д. и др. — ПТЭ, 1993, №1, с.90.
5. Асосков В.С. и др. — ЖЭТФ, 1977, т.73, вып.1(7), с.146.
6. Будагов Ю.А. и др. — Ионизационные измерения в физике высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1988, с.77.
7. Давиденко В.А. и др. — ЖЭТФ, 1969, т.57, вып.1(7), с.84.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 августа 1994 года.