

# ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУХА, ИОНИЗОВАННОГО $\gamma$ -ИМПУЛЬСОМ

© 2024 г. Б. Г. Птицын, Е. И. Фомичева\*, В. Д. Селемир

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
Российского федерального ядерного центра, г. Саров, Россия

\*E-mail: len10457742@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.01.2024 г.

После доработки 10.06.2024 г.

Принята к публикации 08.10.2024 г.

Рассмотрены процессы, определяющие динамику радиационно наведенной электропроводности в воздухе. Проведены оценки влияния приэлектродных слоев объемного заряда на точность измерения напряженности электрического поля в ионизационной камере. Показано, что ошибка измерений по данной методике не превышает 12%. Исследовались электрофизические характеристики сухого и влажного воздуха с помощью трехэлектродной ионизационной камеры при воздействии жесткого гамма-излучения с энергией квантов 1.5 МэВ в широком диапазоне давлений, влажности воздуха, напряженности приложенного электрического поля и поглощенной дозы излучения. Представлены результаты исследования радиационно наведенной электропроводности, частоты прилипания электронов, их дрейфовой скорости в сухом и влажном воздухе при отношении напряженности электрического поля к концентрации молекул, образующих воздушную среду,  $E/N$  от 0.3 до 75 Тд.

DOI: 10.31857/S0040364424060025

## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими характеристиками газов, определяющими их электрические свойства за время менее одной микросекунды, являются электропроводность и частота прилипания электронов к нейтральным молекулам. В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных изучению этих величин [1–10]. Все они получены в ограниченном диапазоне значений  $E/N$ , достоверные сведения существуют лишь для  $E/N > 100$  Тд. Однако, например, для определения времени релаксации плазмы высокого давления требуются знания электропроводности и коэффициентов прилипания при  $E/N < 100$  Тд.

В настоящей работе исследовались электрофизические характеристики сухого и влажного воздуха с помощью трехэлектродной ионизационной камеры при воздействии жесткого гамма-излучения с энергией квантов 1.5 МэВ в широком диапазоне давлений, влажности воздуха, напряженности приложенного электрического поля и поглощенной дозы излучения. Данный способ был избран, потому что он обеспечивает создание однородно ионизированного воздуха по всему исследуемому объему, что исключает необходимость учета диффузии заряженных частиц из одной ча-

сти газоразрядной камеры в другую. Измерения производились при давлениях 10–760 Торр.

Данный способ является хорошим дополнением к ранее разработанным методикам, позволяя получить надежные данные для малых значений  $E/N$ . Постановка эксперимента, конструкция измерительной (ионизационной) камеры, методики измерений проводимости воздуха и поглощенной дозы излучения подробно описаны в [1]. Представлены результаты исследования радиационно наведенной электропроводности, частоты прилипания электронов, их дрейфовой скорости в сухом и влажном воздухе при  $E/N$  от 0.3 до 75 Тд.

## КИНЕТИКА ИОНИЗАЦИИ ОБЛУЧЕННОГО ВОЗДУХА

*Кинетика электронов облученного воздуха*

Концентрация электронов проводимости в воздухе, подвергаемом облучению, описывается уравнением [2]

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = q(t) + (v_{\text{ion}} - v_{\text{at}}^{(2)} - v_{\text{at}}^{(3)})n_e - n_e \sum_i \alpha_{ei} n_+^i, \quad (1)$$

где  $q(t)$  — скорость ионизации внешним источником;  $v_{\text{ion}}$  — частота ионизации электронным

ударом;  $v_{at}^{(2)}$ ,  $v_{at}^{(3)}$  — частота двух- и трехчастичного прилипания электронов;  $\alpha_{ei}$  — коэффициент диссоциативной рекомбинации;  $n_+^i$  — концентрация положительных ионов сорта  $i$ . Скорость ионизации можно представить через мощность поглощенной дозы излучения

$$q(t) = \rho_0 Q_{ci} \dot{D} = 1.97 \times 10^{15} \left( \frac{p}{p_0} \right) \frac{\partial D}{\partial t},$$

где  $\rho_0 = 1.225 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха при нормальных условиях;  $Q_{ci} = 1.61 \times 10^{15} \text{ пар/(кг Р)}$ ;  $\dot{D}$  — мощность поглощенной дозы излучения в воздухе, Р/с;  $p$  — давление облучаемого воздуха,  $p_0 = 760 \text{ Торр}$ . Рассмотрим коэффициенты, входящие в уравнение (1).

**Частота прилипания.** Для плазмы воздуха существенны процессы трехчастичного прилипания электронов к молекулам кислорода с образованием устойчивых ионов  $O_2^-$ :  $e + O_2 \rightarrow O_2^- + M$ , где  $M$  — нейтральная молекула кислорода или азота, и двухчастичного прилипания электронов к молекулам кислорода с образованием неустойчивых отрицательных ионов  $O^-$ :  $e + O_2 \rightarrow O^- + O$ . Зависимость частоты трехчастичного прилипания  $v_{at}^{(3)}$  от напряженности электрического поля можно интерполировать формулой [3]

$$v_{at}^{(3)} = \frac{8.19 \times 10^4 p}{\sqrt{0.351 + 2.53 \times 10^{-2} E/p}}, \quad (2)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля, В/м.

При больших напряженностях электрического поля или низких давлениях, когда отношение приложенного электрического поля к давлению воздуха  $E/p > 2530 \text{ В/(м Торр)}$ , доминирующим является процесс двухчастичного прилипания с образованием отрицательных ионов  $O_2^-$ . Частота этого процесса сильно зависит от отношения  $E/p$  и задается формулой [3]

$$v_{at}^{(2)} = 4 \times 10^5 p \exp\{-2750 p/E\}. \quad (3)$$

Объединив (2) и (3), получим формулу для частоты прилипания с учетом двух- и трехчастичного прилипания  $v_{at} = v_{at}^{(2)} + v_{at}^{(3)}$ :

$$v_{at} = \frac{8.19 \times 10^4 p}{\sqrt{0.351 + 2.53 \times 10^{-2} E/p}} + 4 \times 10^5 p \exp\{-2750 p/E\}. \quad (4)$$

**Частота ионизации.** Частоту ионизации можно связать с дрейфовой скоростью электронов  $\vartheta_{dr}$  через таунсендовский коэффициент  $\alpha_T$ :  $v_{ion} = \alpha_T \vartheta_{dr}$ . Величина  $\alpha_T$  является функцией  $E/p$ . В качестве интерполирующих принимаем следующие зависимости:

$$\alpha_T = \begin{cases} 1.17 \times 10^{-6} p \left( \frac{E}{p} - 3220 \right)^2 & \text{при } 4000 < \frac{E}{p} < 14000, \\ 1500 p \exp\left(-36500 \frac{p}{E}\right) & \text{при } 10000 < \frac{E}{p} < 80000. \end{cases}$$

В проведенных экспериментах отношение  $E/p$  при  $E = 25 \text{ кВ/м}$  и  $p = 10 \text{ Торр}$  достигло значения  $2.5 \times 10^3 \text{ В/(м Торр)}$ . При этом ионизация не существенна, поскольку частота прилипания значительно больше частоты ионизации:

$$v_{at} \gg v_{ion}. \quad (5)$$

**Частота отлипания.** Коэффициент отлипания  $\Theta$  электронов от ионов  $O^-$  зависит от напряженности электрического поля следующим образом [4]:  $\Theta = 6 \times 10^4 p \exp\{-28300 p/E\}$ ,  $\text{м}^{-1}$ . Частота этого процесса связана с дрейфовой скоростью иона  $O^-$  формулой  $v_{dis} = \Theta \vartheta_{dr}^{O^-}$ .

Скорость дрейфа иона  $O^-$  оценивается по его подвижности, определяемой по закону Бланка, однако отсутствие данных о подвижности ионов  $O^-$  в азоте не позволяет применять эту точную формулу. Поэтому используем оценку подвижности иона  $O^-$  в кислороде атмосферного давления [5]:  $K = 3.38 \times 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В с})$ .

Таким образом, подвижность ионов  $O^-$  в воздухе определяется по формуле  $K = 3.38 \times 10^{-4} \times p_0/p = 0.2569/p$ . Коэффициент отлипания электронов от ионов  $O^-$  в воздухе будет максимальным при максимальной напряженности электрического поля и минимальном давлении газа. В данной работе в экспериментах реализовано  $E = 25 \text{ кВ/м}$  и  $p = 10 \text{ Торр}$ . При этом

$$\Theta = 6 \times 10^4 \times 10 \exp\left\{-28300 \frac{10}{25 \times 10^3}\right\} = 7.3 \text{ м}^{-1},$$

$$\vartheta_{dr} = KE = 640 \text{ м/с},$$

$$v_{dis} = \Theta \vartheta_{dr}^{O^-} = 7.3 \times 640 = 4.7 \times 10^3 \text{ с}^{-1}.$$

Следовательно,

$$v_{dis} \ll v_{at}. \quad (6)$$

Полагая частоту диссоциативной электрон-ионной рекомбинации [5]  $\alpha_{ei} = 4 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ , получаем, что в проведенных экспериментах

$$v_{at} n_e \gg \alpha_{ei} n_e n_+^i. \quad (7)$$

С учетом соотношений (5)–(7) выражение (1) примет вид

$$\frac{dn_e}{dt} = q(t) - v_{at} n_e.$$

*Кинетика ионов облученного воздуха*

Уравнения, описывающие концентрацию отрицательных ионов ионизированного сухого воздуха, имеют вид

$$\frac{\partial n_-^{(1)}}{\partial t} = v_{at}^{(1)} n_e - v_{dis} n_e - \xi U_-^{(1)} n_-^{(1)} - n_-^{(1)} \sum_i \varepsilon_{ij} n_+^i,$$

$$\frac{\partial n_-^{(2)}}{\partial t} = v_{at}^{(2)} n_e + \xi U_-^{(2)} n_-^{(2)} - n_-^{(2)} \sum_i \varepsilon_{ij} n_+^i,$$

где  $n_-^{(1)}$  — концентрация ионов  $O^-$ ;  $n_-^{(2)}$  — концентрация ионов  $O_2^-$ ;  $v_{at}^{(1)}$  — частота прилипания электронов к молекуле  $O_2$  с образованием иона  $O^-$ ;  $v_{at}^{(2)}$  — частота прилипания электронов к молекуле кислорода с образованием иона  $O_2^-$ ;  $v_{dis}$  — частота отлипания электронов от ионов  $O^-$ ;  $\xi$  — коэффициент переноса заряда от иона  $O^-$  к молекуле  $O_2$  с образованием иона  $O_2^-$ ;  $U_-^{(1)}$ ,  $U_-^{(2)}$  — скорости дрейфа ионов;  $\varepsilon_{ij}$  — коэффициент ион-ионной рекомбинации.

Полагая коэффициент ион-ионной рекомбинации  $\varepsilon_{ij} = 2.2 \times 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с [5], а также учитывая тот факт, что перенос заряда от отрицательных ионов  $O^-$  к молекулам кислорода не изменяет числа отрицательных ионов, можно записать уравнение изменения концентрации отрицательных ионов:  $dn_-/dt = v_{at} n_e - n_- n_+ \varepsilon_{ij}$ . Если пренебречь процессами ион-ионной рекомбинации и отлипания, то уравнение, описывающее концентрацию отрицательных ионов, можно значительно упростить:  $dn_-/dt = v_{at} n_e$ . Аналогично, можно записать уравнение для концентрации положительных ионов:  $dn_+/dt = q(t)$ . Следовательно, упрощенная система уравнений, описывающая концентрации носителей зарядов в воздухе, облученном гамма-импульсом с мощностью дозы излучения  $\dot{D}(t)$ , имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dn_e}{dt} = A p \dot{D}(t) - v_{at} n_e, \\ \frac{dn_+}{dt} = A p \dot{D}(t), \\ \frac{dn_-}{dt} = v_{at} n_e, \end{cases} \quad (8)$$

где  $A = 2.59 \times 10^{12}$  м<sup>-3</sup> (Торр Р)<sup>-1</sup>.

Подставив в систему уравнений (8) зависимость  $\dot{D}(t)$  в виде [1]  $\dot{D}(t) = (D\omega/2) \sin \omega t$ , где  $D$  — поглощенная воздухом доза радиации,  $\omega = 1.57 \times 10^8$  с<sup>-1</sup>, получаем

$$\begin{cases} \frac{dn_e}{dt} = \alpha D \omega p \sin \omega t - v_{at} n_e, \\ \frac{dn_+}{dt} = \alpha D \omega p \sin \omega t, \\ \frac{dn_-}{dt} = v_{at} n_e, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\alpha = 1.3 \times 10^{12}$  м<sup>-3</sup> (Торр Р)<sup>-1</sup>.

Решение системы уравнений (9) с начальными условиями  $n_e(t=0) = 0$ ,  $n_+(t=0) = 0$ ,  $n_-(t=0) = 0$  имеет вид

$$\begin{aligned} n_e(t) &= \alpha \omega p D e^{-v_{at} t} \left[ \frac{\omega}{\omega^2 + v_{at}^2} + \frac{v_{at} \sin \omega t - \omega \cos \omega t}{\omega^2 + v_{at}^2} e^{v_{at} t} \right] \\ &\quad \text{при } 0 \leq t \leq \tau_p, \\ n_e(t - \tau_p) &= n_e(t = \tau_p) e^{-v_{at} t}, \\ n_+(t) &= \alpha p D (1 - \cos \omega t), \\ n_-(t) &= \frac{\alpha p \omega D}{\omega^2 + v_{at}^2} \times \\ &\quad \times \left[ -\frac{v_{at}^2}{\omega} \cos \omega t - v_{at} \sin \omega t + \frac{\omega^2 + v_{at}^2}{\omega} \right] \\ &\quad \text{при } 0 \leq t \leq \tau_p, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\tau_p$  — длительность гамма-импульса;  $v_{at}$  — частота прилипания электронов, определяемая формулой (4).

#### Влияние приэлектродных слоев на точность измерений

При измерении радиационно наведенной проводимости воздуха возникает систематическая ошибка в определении статического электрического поля в межэлектродном промежутке. Ошибка обусловлена созданием приэлектродных слоев. Используя результаты работы [6], проведем оценки указанной систематической погрешности.

Подстановка в формулу, определяющую прикатодное падение напряжения, численных значений напряженности статического электрического поля  $E = 50$  кВ/м и поглощенной дозы излучения 30 Р при давлении воздуха в ионизационной камере 760 Торр дает следующий результат: ко времени окончания воздействия гамма-импульса, генерируемого ускорителем И-3000, прикатодное падение напряжения составляет 18 В, а через  $t = 100$  нс после начала облучения — 63 В, т.е. <10% от приложенного напряжения.

Ошибка возрастает при переходе к малым значениям приложенного электрического поля и малым давлениям. Так, при уровне дозы гамма-облучения 30 Р, давлении воздуха 100 Торр, электрическом поле 12.5 кВ/м падение напряжения на прикатодном слое составляет ~50 В, что соответствует ошибке в определении напряжения ≤20%. Если давление воздуха 10 Торр, а остальные параметры неизменны, прикатодное падение напряжения составляет 65 В и ошибка достигает 30%.

В диапазоне давлений исследуемого воздуха от 10 до 10<sup>-1</sup> Торр для учета приэлектродных

эффектов необходимо рассмотреть кинетику не только электронов, но и положительных и отрицательных ионов, так как с ростом отношения  $E/N$  растет скорость дрейфа ионов. В этом случае нельзя использовать предположение о дрейфе электронов в постоянном электрическом поле, обусловленном внешним источником, и требуется учет движения всех видов заряженных частиц в самосогласованных полях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ПРОВЕДЕННЫХ НА ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

### *Результаты экспериментов с сухим воздухом*

Гамма-импульс, генерируемый ускорителем И-3000 [8], имеет следующие параметры: длительность импульса на полувысоте — 8 нс, длительность по основанию — 16 нс. Максимум мощности гамма-излучения достигался при  $t = 8$  нс от начала импульса. Характеристики гамма-излучения ускорителя практически не менялись от импульса к импульсу на протяжении всех экспериментов.

Измерения временной зависимости импульса гамма-излучения проводились полупроводниковым детектором СППД-5. Чувствительность СППД-5 к гамма-квантам  $^{60}\text{Co}$  с энергией 1.25 МэВ, близкой к энергии гамма-квантов ускорителя И-3000, согласно паспортным данным, составляет  $3.12 \times 10^{-18}$  А см<sup>2</sup> с/квант. Погрешность чувствительности детектора —  $\pm 15\%$  при доверительной вероятности 0.95, временное разрешение (ширина импульсной характеристики на половине ее высоты) при выходном токе  $< 1$  А, реализованном в проведенных измерениях, не превышает 1.2 нс.

Поглощенная воздухом доза излучения внутри ионизационной камеры измерялась с помощью дозиметров методики ИКС-А. Экспериментальные исследования электропроводности проведены при фиксированных значениях напряженности статического электрического поля в межэлектродном промежутке ионизационной камеры, составляющих 125, 100, 75, 50, 25, 12.5 кВ/м, и давлениях воздуха 760, 300, 100, 50, 15 и 10 Торр.

В табл. 1 представлены данные по условиям проведения экспериментов с сухим воздухом, а также расчетные и экспериментальные результаты. Здесь  $D$  — поглощенная доза излучения;  $U$  — приложенное статическое напряжение;  $P$  — давление воздуха в камере;  $T$  — температура окружающей среды;  $E/N$  — отношение напряженности приложенного статического электрического поля к концентрации молекул, составляющих воздушную смесь;  $\sigma$  — максимальная проводимость при различных поглощенной дозе излуче-

ния и отношении  $E/N$ , рассчитанная по формуле  $\sigma = J_{\max}/2ES$ , где  $J_{\max}$  — максимальный ток разрядки,  $E$  — напряженность электрического поля,  $S$  — площадь электродов ионизационной камеры;  $v_{\text{ат расч}}$  — коэффициент прилипания электронов к молекулам кислорода в сухом воздухе, рассчитанный по формуле (4);  $n_{e \max}$  — максимальная концентрация электронов, вычисленная по формуле (10). Экспериментальная дрейфовая скорость определялась соотношением

$$\vartheta_{\text{др эксп}} = \frac{J_{\max}}{Sen_{e \max}},$$

где  $e$  — заряд электрона. Расчетное значение дрейфовой скорости  $\vartheta_{\text{др эксп}}$  приведено в табл. 1 на основании данных [9]. Экспериментальные исследования [10] показали, что временная зависимость проводимости полностью обуславливается ходом временной зависимости концентрации электронов, а та в свою очередь двумя конкурирующими процессами: рождением электронов под действием гамма-квантов и двух- и трехчастичным прилипанием электронов к молекулам кислорода. После окончания облучения проводимость спадает экспоненциально, так как концентрация электронов зависит только от процессов прилипания и описывается уравнением  $n_e(t) = n_e(\tau_p) \exp(-t/\tau_p)$ .

Осциллограмма тока разрядки в этом случае повторяет временное поведение концентрации электронов, по спаду которой определен экспериментальный коэффициент прилипания

$$v_{\text{ат эксп}} = -\frac{1}{t} \ln \frac{n_e(t=50)}{n_e(t=16)},$$

где  $n_e(t=50)$  — концентрация электронов при  $t=50$  нс,  $n_e(t=16)$  — на момент окончания гамма-импульса  $t=16$  нс. Данные по  $v_{\text{ат расч}}$  и  $v_{\text{ат эксп}}$  приведены в табл. 1.

Зависимость коэффициента прилипания электронов от  $E$  представлена на рис. 1. Сравнение его расчетных значений с экспериментальными показывает, что полученные опытным путем значения несколько больше.

Зависимость радиационно наведенной электропроводности от отношения  $E/N$  при постоянной поглощенной дозе излучения  $D=40$  Р и давлении сухого воздуха в камере 744, 300, 50 и 10 Торр изображена на рис. 2.

При неизменных значениях давления и поглощенной дозы излучения проводимость линейно уменьшается с увеличением отношения  $E/N$ . Так, для давления 744 Торр и  $E/N=0.5$  Тд проводимость составила  $2.56 \times 10^{-3}$  (Ом м)<sup>-1</sup>, а при  $E/N=4$  Тд проводимость равна  $1.08 \times 10^{-3}$  (Ом м)<sup>-1</sup>. Подобную зависимость можно объяснить тем,



Таблица 1. Условия и результаты экспериментов с сухим воздухом

$D$ , Р	$P$ , Торр	$T$ , °C	$U$ , В	$E/N$ , ТД	$\sigma$ , $10^{-3} (\text{Ом м})^{-1}$	$v_{\text{ат расч}}$ , $10^7 \text{ с}^{-1}$	$v_{\text{ат эксп}}$ , $10^7 \text{ с}^{-1}$	$n_{e \text{ max}}$ , $10^{-16} \text{ м}^{-3}$	$\vartheta_{\text{др расч}}$ , $10^4 \text{ м/с}$	$\vartheta_{\text{др эксп}}$ , $10^4 \text{ м/с}$
60	760	21	750	0.3	$2.40 \pm 0.24$	—	—	3.5	1.22	$1.7 \pm 0.34$
40	760	21	200	0.4	$3.42 \pm 0.34$	—	—	4.5	0.4	$0.47 \pm 0.1$
60	760	21	200	0.4	$4.75 \pm 0.47$	—	—	6.7	0.4	$0.44 \pm 0.09$
27	744	19	250	0.5	$2.56 \pm 0.2$	6.92	$6.1 \pm 0.91$	3.43	0.45	$0.58 \pm 0.12$
40	744	19	250	0.5	$2.56 \pm 0.2$	6.92	$6.1 \pm 0.91$	5	0.45	$0.4 \pm 0.08$
60	760	21	250	0.5	$4.91 \pm 0.49$	—	—	6.7	0.45	$0.56 \pm 0.11$
30	760	21	500	0.9	$1.15 \pm 0.11$	—	—	3.7	0.65	$0.48 \pm 0.09$
40	760	21	500	0.9	$2.45 \pm 0.24$	—	—	4.9	0.65	$0.77 \pm 0.14$
7	760	21	500	0.9	$0.36 \pm 0.04$	—	—	0.9	0.65	$0.7 \pm 0.14$
38	60	20	500	1	$1.65 \pm 0.17$	—	—	2.9	0.65	$0.80 \pm 0.15$
50	744	9	500	1	$2.12 \pm 0.16$	5.56	$8.3 \pm 1.2$	4.64	0.65	$0.71 \pm 0.14$
56	744	19	500	1	$2.12 \pm 0.16$	5.56	$8.3 \pm 1.2$	5.2	0.65	$0.63 \pm 0.13$
9.6	300	18.5	250	1.26	$0.71 \pm 0.1$	2.1	$1.16 \pm 0.1$	2.97	0.73	$0.9 \pm 0.18$
33	300	18.5	250	1.26	$2.3 \pm 0.34$	2.1	$1.8 \pm 0.14$	1	0.73	$0.9 \pm 0.18$
40	300	18.5	250	1.26	$2.3 \pm 0.34$	2.1	$2 \pm 0.10$	1.3	0.73	$1.0 \pm 0.20$
23	760	21	750	1.51	$1.20 \pm 0.12$	—	—	2.9	0.82	$0.94 \pm 0.18$
26	760	21	750	1.51	$1.38 \pm 0.14$	—	—	3.4	—	—
15	760	21	1000	1.82	$0.86 \pm 0.09$	—	—	2.1	0.95	$0.9 \pm 0.18$
19	760	21	1000	1.82	$0.81 \pm 0.19$	—	—	2.7	0.95	$0.9 \pm 0.2$
21	760	21	1000	1.82	$0.87 \pm 0.09$	—	—	2.8	0.95	$0.89 \pm 0.18$
21	760	21	1000	1.82	$0.96 \pm 0.09$	—	—	2.8	0.95	$1.07 \pm 0.21$
21	760	21	1000	1.82	$0.95 \pm 0.15$	—	—	2.8	0.95	$1.19 \pm 0.24$
22	760	21	1000	1.82	$0.78 \pm 0.08$	—	—	3.2	0.95	$0.99 \pm 0.2$
30	760	21	1000	1.82	$1.50 \pm 0.15$	—	—	4.3	0.95	$1.19 \pm 0.24$
41	744	19	1000	2	$1.81 \pm 0.14$	4.25	$9.4 \pm 1.4$	5.9	0.95	$0.96 \pm 0.19$
41	744	19	500	2	$1.81 \pm 0.14$	5.56	$9.4 \pm 1.4$	5.9	0.95	$0.96 \pm 0.19$
47	744	19	1000	2	$2.04 \pm 0.16$	4.25	$4 \pm 0.6$	6.83	0.95	$0.93 \pm 0.19$
47	744	19	1000	2	$1.72 \pm 0.13$	4.25	$5.25 \pm 0.78$	6.83	0.95	$0.91 \pm 0.18$
38	60	20	1000	2.1	$0.99 \pm 0.1$	—	—	3.4	0.95	$0.83 \pm 0.16$
38	300	20	500	2.4	$1.73 \pm 0.17$	—	—	2.1	1.05	$1.1 \pm 0.21$
27	760	21	1250	2.42	$1.08 \pm 0.11$	—	—	3.75	1.05	$1.11 \pm 0.22$
30	760	21	1250	2.42	$1.15 \pm 0.12$	—	—	4.2	1.05	$1.07 \pm 0.21$
40	300	18.5	500	2.5	$2.06 \pm 0.3$	1.57	$1.44 \pm 0.1$	1.34	1.0	$1.4 \pm 0.28$
44	300	18.5	500	2.5	$1.74 \pm 0.2$	1.57	$1 \pm 0.1$	1.53	1.0	$1.0 \pm 0.20$
28	744	19	1500	3	$0.76 \pm 0.06$	3.58	$5.7 \pm 0.85$	3.7	1.13	$0.96 \pm 0.19$
36	744	19	1500	3	$0.84 \pm 0.126$	3.58	$5.6 \pm 0.84$	4.77	1.13	$0.83 \pm 0.17$
38	60	20	1500	3	$0.74 \pm 0.07$	—	—	3.7	1.13	$0.91 \pm 0.17$
49	744	19	1500	3	—	3.58	$4.9 \pm 0.73$	6.5	1.13	$0.97 \pm 0.20$
17	760	21	1500	3.03	$0.72 \pm 0.07$	—	—	2.4	1.14	$1.38 \pm 0.29$
22	760	21	1500	3.03	$1.00 \pm 0.10$	—	—	3.1	1.14	$1.47 \pm 0.31$
27	760	21	1500	3.03	$1.08 \pm 0.11$	—	—	3.85	1.14	$1.31 \pm 0.26$
31	760	21	1500	3.03	$1.38 \pm 0.14$	—	—	4.45	1.14	$1.45 \pm 0.29$
44	744	19	2000	4	$1.08 \pm 0.1$	3.15	$4.2 \pm 0.63$	5.5	1.2	$1.22 \pm 0.25$
52	744	20	2000	4	$1.08 \pm 0.1$	3.15	$4.2 \pm 0.03$	6.52	1.2	$1.0 \pm 0.20$

$D$ , Р	$P$ , Торр	$T$ , °C	$U$ , В	$E/N$ , Тд	$\sigma$ , $10^{-3} \text{ (Ом м)}^{-1}$	$v_{ат\text{ расч'}}$ , $10^7 \text{ с}^{-1}$	$v_{ат\text{ эксп'}}$ , $10^7 \text{ с}^{-1}$	$n_{e\text{ max'}}$ , $10^{-16} \text{ м}^{-3}$	$\vartheta_{др\text{ расч'}}$ , $10^4 \text{ м/с}$	$\vartheta_{др\text{ эксп'}}$ , $10^4 \text{ м/с}$
57	744	19	2000	4	$1.08 \pm 0.1$	3.15	$5.4 \pm 0.81$	7.15	1.2	$0.94 \pm 0.19$
38	300	20	1000	5	$1.11 \pm 0.11$	—	—	2.3	1.41	$1.49 \pm 0.28$
9	300	18.5	1000	5	$0.45 \pm 0.067$	1.15	$6.28 \pm 0.5$	0.594	1.4	$1.4 \pm 0.28$
32	300	18.5	1000	5	$1.06 \pm 0.15$	1.15	$0.626 \pm 0.05$	1.33	1.4	$1.67 \pm 0.34$
39	300	18.5	1000	5	$1.22 \pm 0.18$	1.15	$0.93 \pm 0.074$	1.33	1.4	$1.5 \pm 0.30$
37	300	19	500	7.57	$0.96 \pm 0.076$	1.57	$5.68 \pm 0.85$	1.26	1.6	$1.35 \pm 0.27$
38	300	20	1500	7.57	$0.82 \pm 0.08$	—	—	2.4	1.75	$1.57 \pm 0.29$
38	100	20	500	7.57	$1.03 \pm 0.1$	—	—	0.9	1.75	$1.65 \pm 0.31$
38	50	20	250	7.57	$1.01 \pm 0.1$	—	—	0.5	1.75	$1.63 \pm 0.33$
42	300	18.5	1500	7.57	$1.11 \pm 0.16$	0.951	$7 \pm 0.56$	1.26	1.47	$1.35 \pm 0.27$
44	50	19	250	7.57	$1.1 \pm 0.16$	0.159	—	3	1.68	$1.87 \pm 0.37$
50	300	18.5	1500	7.57	$1.45 \pm 0.21$	0.951	—	1.74	1.8	$1.89 \pm 0.38$
74	50	19	250	7.57	$0.76 \pm 0.11$	0.159	—	5	1.68	$1.2 \pm 0.24$
75	10	19	500	75.7	$0.66 \pm 0.1$	0.143	—	5	—	$0.206 \pm 0.04$
38	100	20	750	11.5	$0.96 \pm 0.1$	—	—	0.9	2.2	$2.28 \pm 0.43$
18	50	19	500	15	$0.3 \pm 0.04$	0.122	—	1.23	—	$0.39 \pm 0.08$
22	50	19	500	15	$0.3 \pm 0.04$	0.122	—	1.51	—	$0.314 \pm 0.06$
38	50	20	500	15	$0.62 \pm 0.06$	—	—	0.5	—	$1.96 \pm 0.40$
68	50	19	500	15	$0.91 \pm 0.13$	0.122	—	4.6	—	$0.31 \pm 0.06$
38	50	20	750	22.7	$0.53 \pm 0.05$	—	—	0.5	—	$2.34 \pm 0.44$
38	15	20	250	25	$0.57 \pm 0.06$	—	—	0.15	—	$2.98 \pm 0.60$
38	50	20	1000	30	$0.44 \pm 0.04$	—	—	0.5	—	$2.26 \pm 0.42$
30	10	19	250	37.8	$0.76 \pm 0.12$	0.059	—	4.7	—	$0.432 \pm 0.09$
54	10	19	250	37.8	$0.66 \pm 0.11$	0.059	—	3.6	—	$0.143 \pm 0.03$
70	10	19	250	37.8	$0.8 \pm 0.12$	0.059	—	4.7	—	$0.132 \pm 0.03$
38	15	20	500	50	$0.48 \pm 0.05$	—	—	0.14	—	$4.99 \pm 1.0$
38	15	20	750	75	$0.37 \pm 0.04$	—	—	0.14	—	$5.92 \pm 1.2$
32	10	19	500	75.7	$0.28 \pm 0.04$	0.143	—	2.19	—	$0.199 \pm 0.04$
56	10	19	500	75.7	$0.5 \pm 0.9$	0.143	—	3.8	—	$0.23 \pm 0.05$

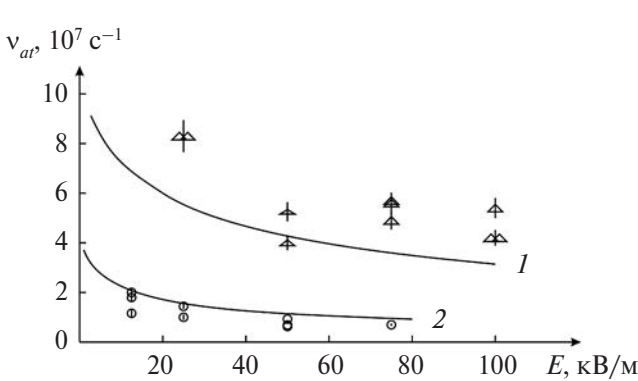


Рис. 1. Зависимость коэффициента прилипания электронов в сухом воздухе от напряженности электрического поля  $E$ : 1 –  $P = 744$  Торр, 2 – 300; символы – эксперимент, кривые – расчет.

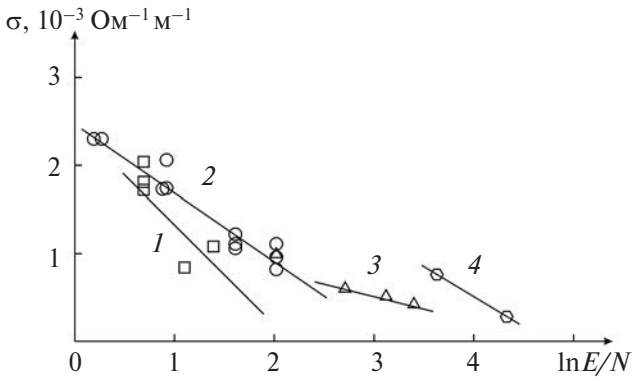


Рис. 2. Зависимость проводимости сухого воздуха от  $E/N$  при поглощенной дозе  $D = 40 \pm 8$  Р: 1 –  $P = 300$  Торр, 2 – 744, 3 – 50, 4 – 10.

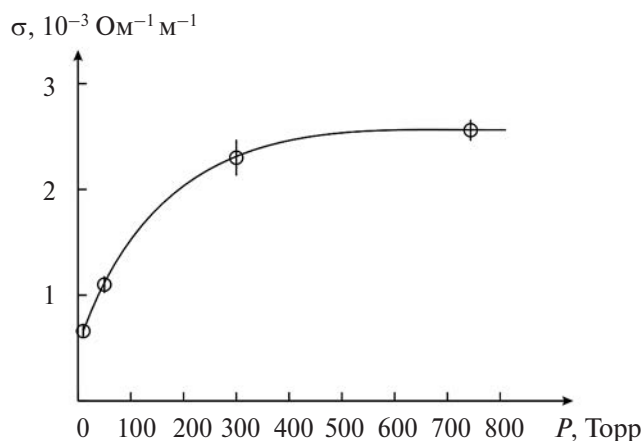


Рис. 3. Зависимость  $\sigma$ -наведенной электропроводности сухого воздуха от давления при  $E = 12.5$  кВ/м,  $D = 50$  Р.

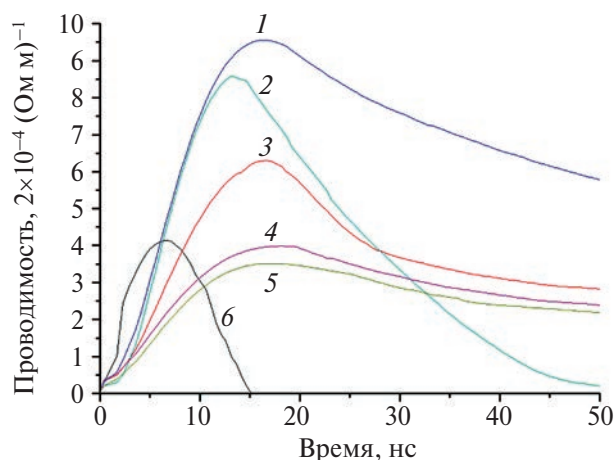


Рис. 4. Зависимость радиационно наведенной электропроводности воздуха при  $E = 25$  кВ/м,  $D = 28 \pm 4$  Р от времени для различных давлений воздуха в камере: 1 —  $P = 300$  Торр, 2 — 760, 3 — 100, 4 — 50, 5 — 15, 6 — мощность поглощенной дозы  $\bar{D}$  (отн.ед.).

что радиационно наведенная электропроводность пропорциональна подвижности электронов, которая в свою очередь равна дрейфовой скорости электронов, отнесенной к напряженности электрического поля  $\vartheta_{dr}/E$ . Дрейфовая скорость растет с увеличением отношения  $E/N$  по закону более слабому, чем линейный. Отсюда следует, что проводимость воздуха при постоянном давлении с увеличением отношения  $E/N$  уменьшается.

Зависимость максимальной проводимости сухого воздуха от давления при напряженности электрического поля  $E = 12.5$  кВ/м представлена на рис. 3. Зарегистрировано увеличение проводимости с повышением давления. Проводимость пропорциональна плотности электронов,

которая при постоянной поглощенной дозе излучения пропорциональна давлению.

При уменьшении давления характер импульса разрядного тока несколько изменяется. В частности, при одних и тех же напряжениях электрического поля амплитуда тока падает, а длительность импульса увеличивается с уменьшением давления.

Длительность интервала времени от начала импульса до максимума разрядного тока при этом также увеличивается. Полученная экспериментально зависимость проводимости воздуха от времени при напряженности электрического поля  $E = 25$  кВ/м иллюстрируется семейством кривых рис. 4.

#### Результаты экспериментов с влажным воздухом

В серии экспериментов проведено исследование влияния влажности воздуха на наведенную электропроводность. Подготовка воздуха с необходимой влажностью осуществлялась в специальном резервном объеме, соединенном трубопроводом с ионизационной камерой. В резервном объеме имелись подводы осушенного баллонного и атмосферного воздуха, увлажненного парами подогретой воды. Контроль влажности смеси производился при атмосферном давлении гигрометром пьезосорбционного типа «Волна 2М», датчик которого размещался внутри объема.

В табл. 2 представлены данные по условиям выполнения экспериментов: влажность воздуха, время от создания паровоздушной смеси до момента проведения опытов, температура окружающей среды, давление в ионизационной камере, давление воздуха в окружающем пространстве, поглощенная доза излучения, напряженность электрического статического поля, отношение  $E/N$ , экспериментально определяемая максимальная радиационно наведенная электропроводность, а также расчетное значение коэффициента прилипания по формуле (4) для сухого воздуха и экспериментально определяемый по спаду кривой тока разрядки ионизационной камеры коэффициент прилипания электронов.

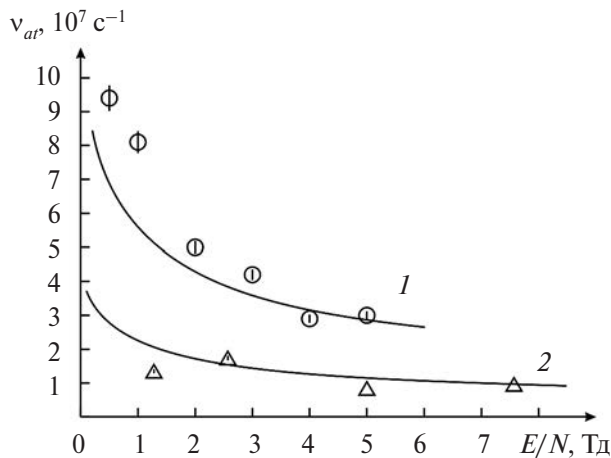
Получены зависимости коэффициента прилипания электронов в воздухе при влажности 30 и 70% для фиксированных значений давления воздуха в зависимости от отношения  $E/N$  (рис. 5, 6). Расчетные значения коэффициента прилипания для определенных давлений воздуха в ионизационной камере обозначены сплошными линиями.

Зависимости радиационно наведенной электропроводности воздуха при влажности 30, 70, 90% и постоянных значениях поглощенной дозы

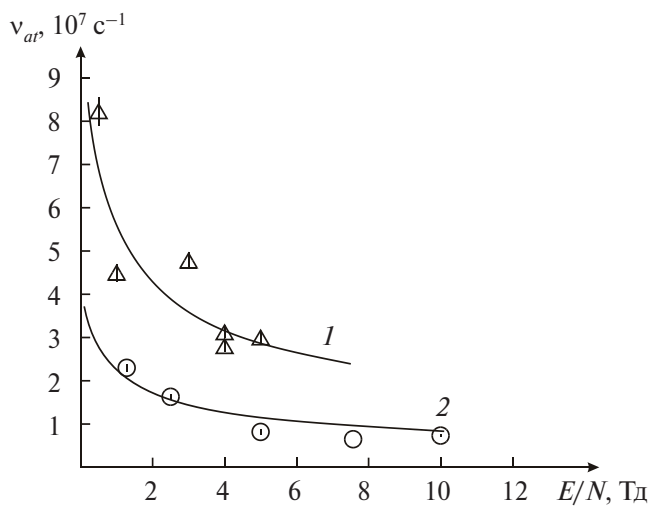
Таблица 2. Условия и результаты экспериментов с влажным воздухом

Влаж- ность, %	Время выдержки смеси, ч	$T$ , °C	$P_{\text{кам}}$ , Торр	$P_{\text{зал}}$ , Торр	$D$ , Р	$E$ , кВ/м	$E/N$ , Тд	$\sigma_{\text{эксп}}$ , $10^{-3}(\text{Ом м})^{-1}$	$v_{\text{ат расч}}$ , $10^7\text{с}^{-1}$ (сухой воздух)	$v_{\text{ат эксп}}$ , $10^7\text{с}^{-1}$
30	4	22	745	745	79	1250	5	$0.93 \pm 0.13$	2.85	$3 \pm 0.24$
30	4	22	745	745	52	1000	4	$0.82 \pm 0.13$	3.15	$2.9 \pm 0.24$
30	4	22	745	745	34	1000	4	$0.51 \pm 0.07$	3.15	$4.1 \pm 0.32$
30	4	22	745	745	18	750	3	$0.99 \pm 0.15$	3.58	$4.2 \pm 0.31$
30	4	22	745	745	46	500	2	$1.14 \pm 0.17$	4.26	$5 \pm 0.36$
30	4	22	745	745	60	250	1	$1.97 \pm 0.29$	5.57	$8.1 \pm 0.64$
30	4	22	745	745	30	125	0.5	$1.69 \pm 0.25$	6.93	$9.4 \pm 0.75$
30	4	22	300	745	90	750	7.57	$1.21 \pm 0.2$	0.951	$0.958 \pm 0.06$
30	4	22	300	745	26	500	5	$0.91 \pm 0.14$	1.15	$0.666 \pm 0.053$
30	4	22	300	745	88	500	5	$1.52 \pm 0.23$	1.15	$0.844 \pm 0.058$
30	4	22	300	745	108	250	2.57	$3.18 \pm 0.47$	1.57	$1.74 \pm 0.13$
30	4	22	300	745	102	125	1.28	$5.3 \pm 0.79$	2.07	$1.35 \pm 0.11$
30	4	22	300	745	31	125	1.28	$1.77 \pm 0.26$	2.07	$1.35 \pm 0.11$
30	4	22	300	745	125	125	1.28	$6.2 \pm 0.92$	2.07	$1.35 \pm 0.11$
30	24	24	50	752	114	250	15.15	$1.52 \pm 0.23$	0.122	$1.25 \pm 0.1$
30	24	24	50	752	120	125	7.57	$2.75 \pm 0.41$	0.159	$1.15 \pm 0.1$
30	24	24	10	752	114	250	15.15	$1.52 \pm 0.22$	0.143	$0.125 \pm 0.01$
30	24	24	10	752	120	250	75.7	$1.06 \pm 0.15$	0.143	$0.18 \pm 0.002$
30	24	24	10	752	35	125	37.8	$0.46 \pm 0.07$	0.0588	$0.19 \pm 0.015$
70	3	18	743	743	100	1250	5	$1.6 \pm 0.24$	2.83	$3 \pm 0.24$
70	3	18	743	743	110	1000	4	$2.29 \pm 0.34$	3.14	$3.12 \pm 0.23$
70	3	18	743	743	106	1000	4	$1.8 \pm 0.25$	3.14	$2.81 \pm 0.22$
70	3	18	743	743	115	750	3	$2.37 \pm 0.36$	3.57	$4.78 \pm 0.38$
70	3	18	743	743	100	250	1	$4.58 \pm 0.7$	5.55	$4.5 \pm 0.4$
70	3	18	743	743	110	125	0.5	$5.6 \pm 0.84$	6.9	$8.23 \pm 0.66$
70	2	16	300	743	122	1000	10	$1.65 \pm 0.25$	0.832	$0.733 \pm 0.058$
70	2	16	300	743	70	750	7.57	$1.44 \pm 0.2$	0.951	$0.649 \pm 0.05$
70	2	16	300	743	117	500	5	$2.62 \pm 0.39$	1.15	$0.818 \pm 0.064$
70	2	16	300	743	117	250	2.5	$3.96 \pm 0.6$	1.57	$1.63 \pm 0.13$
70	2	16	300	743	130	125	1.28	$6.88 \pm 1$	2.07	$2.3 \pm 0.18$
90	2	20	300	762	85	1000	10	$1.32 \pm 0.19$	0.832	$0.696 \pm 0.055$
90	2	20	300	762	110	750	7.5	$2.5 \pm 0.3$	0.951	$0.14 \pm 0.011$
90	2	20	300	762	135	500	5	$3.53 \pm 0.52$	1.15	$1.94 \pm 0.16$
90	2	20	300	762	110	250	2.5	$4.88 \pm 0.73$	1.57	$2.28 \pm 0.18$
90	2	20	300	762	110	250	2.5	$5.52 \pm 0.82$	1.57	$1.8 \pm 0.16$
90	2	20	300	762	110	125	1.25	$6.7 \pm 0.95$	2.07	$2.6 \pm 0.2$
90	2	20	300	762	105	125	1.25	$6.7 \pm 0.95$	2.07	$2.6 \pm 0.2$
90	2	20	300	762	96	125	1.25	$5.8 \pm 0.87$	2.07	$2.6 \pm 0.2$
90	2	17	50	750	105	250	15	$2.29 \pm 0.27$	0.122	$1.15 \pm 0.13$
90	4	17	50	750	100	125	7.5	$3.05 \pm 0.45$	0.159	$0.133 \pm 0.01$
90	4	17	10	750	130	250	75.7	$1.12 \pm 0.17$	0.143	$2.2 \pm 0.17$
90	4	17	10	750	140	125	37.8	$1.1 \pm 0.17$	0.0588	$0.16 \pm 0.012$

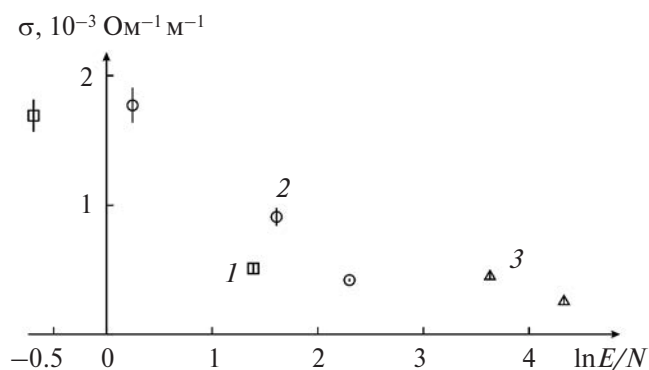




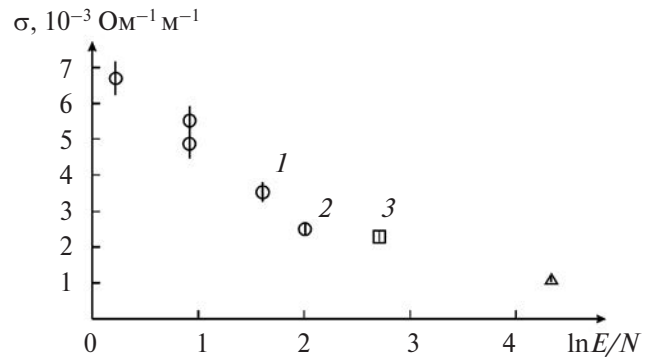
**Рис. 5.** Зависимость коэффициента прилипания электронов в воздухе с влажностью 30% от  $E/N$ : 1 –  $P = 745$  Торр, 2 – 300; символы – эксперимент, кривые – расчет.



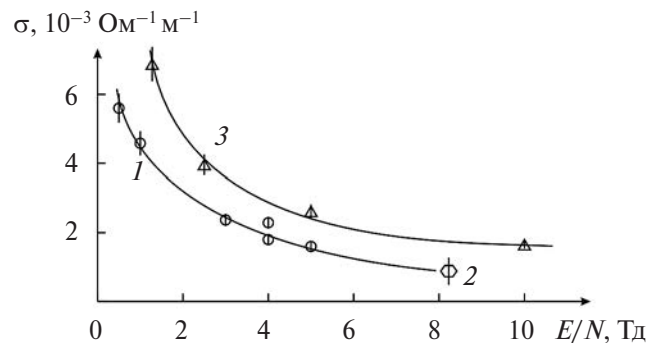
**Рис. 6.** Зависимость коэффициента прилипания электронов в воздухе с влажностью 70% от  $E/N$ : 1 –  $P = 743$  Торр, 2 – 300; символы – эксперимент, кривые – расчет.



**Рис. 7.** Зависимость  $\sigma$ -наведенной электропроводности влажного воздуха от  $E/N$  при  $D = 30 \pm 6$  Р и влажности 30%: 1 –  $P = 744$  Торр, 2 – 300, 3 – 10.



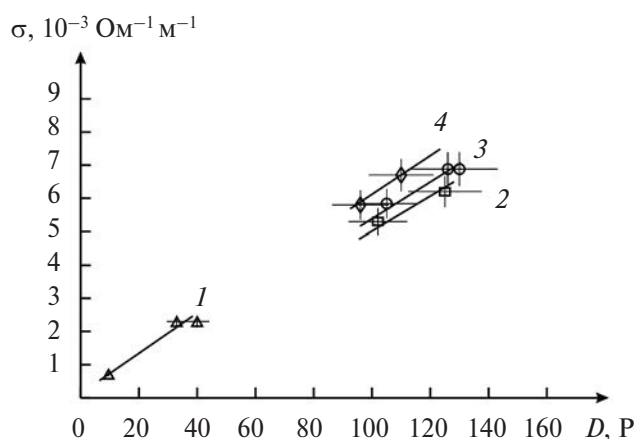
**Рис. 8.** Зависимость  $\sigma$ -наведенной электропроводности влажного воздуха от  $E/N$  при  $D = 110 \pm 21$  Р и влажности 90%: 1 –  $P = 300$  Торр, 2 – 50, 3 – 10.



**Рис. 9.** Зависимость  $\sigma$ -наведенной электропроводности воздуха от  $E/N$  при  $D = 110 \pm 21$  Р и влажности 70%: 1 –  $P = 749$  Торр, 2 – 750, 3 – 300.

излучения и давления воздуха представлены на рис. 7–9. Из анализа полученных зависимостей следует, что при постоянном значении поглощенной дозы излучения и фиксированном давлении проводимость с увеличением отношения  $E/N$  падает. Экспериментальные точки на графиках лежат тем выше, чем ниже давление воздуха в ионизационной камере.

Существует гипотеза, что получаемая лабораторно паровоздушная смесь не содержит водяных кластеров, поэтому данные по проводимости, полученные в таких паровоздушных смесях, не сильно отличаются от данных, полученных в сухом воздухе. Для проверки этого предположения получаемая в газонаполнительной системе паровоздушная смесь выдерживалась в резервном объеме от 2 до 24 ч и лишь затем подавалась в ионизационную камеру для проведения экспериментов. Анализ полученных данных не показал существенного изменения электрофизических характеристик влажного воздуха в зависимости от времени выдержки паровоздушной смеси.



**Рис. 10.** Зависимость  $\sigma$ -наведенной электропроводности воздуха от поглощенной дозы при влажности: 1 – 0%, 2 – 30%, 3 – 70%, 4 – 90%;  $E/N = 1.26$ ,  $P = 300$  Торр,  $E = 12.5$  кВ/м.

Зависимости проводимости сухого воздуха и воздуха с влажностью 30, 70, 90% от поглощенной дозы при постоянном давлении  $P = 300$  Торр и  $E/N = 1.26$  Тд представлены на рис. 10. Линейный характер зависимости проводимости от поглощенной дозы излучения обусловлен тем, что проводимость пропорциональна концентрации электронов. При постоянном давлении и отношении  $E/N$  концентрация электронов в свою очередь пропорциональна поглощенной дозе. К сожалению, зависимости для различных значений влажности получены при различных уровнях доз излучения. В связи с этим непосредственно сравнивать проводимость воздуха при различных степенях влажности затруднительно, однако, если линейную зависимость для сухого воздуха экстраполировать на большие уровни доз излучения, то можно сделать вывод, что проводимость влажного воздуха незначительно, в пределах погрешности измерений, отличается от проводимости сухого воздуха. По-видимому, достигнутая точность измерений позволяет отметить, что проводимость влажного воздуха несколько меньше, чем сухого.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы основные процессы, происходящие в облученном воздухе, и оценен вклад каждого из них в динамику радиационно наведенной электропроводности воздуха.

Показано, что ошибка при экспериментальном измерении электропроводности определялась приборной погрешностью осциллографа  $\varepsilon_1$ , составляющей 5%, источника питания СБПК-20 –  $\varepsilon_2 = 5\%$ , а также  $\varepsilon_3$  – погрешностью измерения электрического поля, обусловленной нали-

чием прикатодного падения напряжения и не превышающей 10% в проведенных экспериментах. Полная ошибка при определении проводимости облученного воздуха составляет

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2} = 12\%.$$

На установке И-3000 проведены экспериментальные исследования радиационно наведенной электропроводности сухого и влажного воздуха при давлениях 10, 15, 50, 100, 300, 760 Торр, облученного потоком тормозного излучения со средней энергией  $\gamma$ -квантов 1.5 МэВ. Реализован диапазон мощностей доз тормозного излучения от  $2.25 \times 10^9$  до  $8 \times 10^9$  Р/с.

Показано, что при временах, меньших 100 нс, после начала  $\gamma$ -излучения наведенная электропроводность определяется ионизацией,  $\gamma$ -излучением и прилипанием электронов к молекулам кислорода, входящим в воздушную смесь.

Получены зависимости коэффициента прилипания электронов в сухом и влажном воздухе и скорости дрейфа электронов от отношения  $E/N$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинов А.Е., Летягин В.А., Михеев К.Е. и др. Методика измерения электрофизических характеристик и кинетика элегаза // ТВТ. 2001. Т. 39. № 1. С. 35.
2. Смирнов Б.М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974. 456 с.
3. Hessenauer H. Anlagerungskoeffizienten und Driftgeschwindigkeiten von Elektronen in Luft // Z. Phys. 1967. Bd. 204. S. 142.
4. Kline L.E. Effect of Negative Ions on Current Growth and Ionizing Wave Propagation in Air // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. № 5. P. 1994.
5. Мак-Даниэль И. Процессы столкновений в ионизованных газах. Пер. с англ. М.: Мир, 1967. 832 с.
6. Дубинов А.Е., Летягин В.А., Михеев К.Е. и др. Исследование электрофизических характеристик элегаза. Влияние приэлектродных слоев на точность измерений // ТВТ. 2001. Т. 39. № 2. С. 225.
7. Дубинов А.Е., Летягин В.А., Михеев К.Е. и др. Исследование электрофизических характеристик элегаза. Полученные результаты // ТВТ. 2001. Т. 39. № 3. С. 363.
8. Павловский А.И., Босамыкин В.С., Селемир В.Д. и др. Линейные индукционные ускорители для СВЧ-генераторов // Тр. ИПФ РАН. 1992. Вып. 7. С. 81.
9. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 672 с.
10. Chervenak J.G., van Lint V.A.J. Conductivity of Highly Dosed Air // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1980. V. NS-27. № 6. P. 1810.