

TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI

TOIMETISED

УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ

ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS

588

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ
АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ И ИОНОВ
В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

ИОНИЗАЦИЯ, АЭРОЗОЛИ, ЭЛЕКТРОМЕТРИЯ

XII

TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI TOIMETISED
УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS
ALUSTATUD 1893.a. VIHK 588 ВЫПУСК ОСНОВАНЫ В 1893.g.

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ
АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ И ИОНОВ
В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

ИОНИЗАЦИЯ, АЭРОЗОЛИ, ЭЛЕКТРОМЕТРИЯ

XII

ТАРТУ 1981

Редакционная коллегия: К.Куду, Я.Рейнет, О.Сакс

Ответственный редактор: Л. Виснапуу

О МЕХАНИЗМЕ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

М.Р. Яван

В настоящей статье приведены результаты дальнейшей обработки экспериментальных данных, представленных в работе [1].

Исследовали развитие высокочастотного (ВЧ) разряда в воздухе при атмосферном давлении в неоднородном промежутке острей-плоскость в течение первых десяти периодов ВЧ колебаний. Разрядный промежуток состоял из платиновой проволоки диаметром 1 мм с полусферическим концом и из латунного диска диаметром 150 мм. Межэлектродное расстояние равнялось 40 мм. Несущая частота питающего напряжения была равна 7,6 МГц. Развитие ВЧ разряда исследовали при небольшом (ок. 3%) перенапряжении, амплитудное значение которого на 1 кВ ниже пороговых напряжений импульсов короны постоянного напряжения (в случае положительного острья - стример, отрицательного острья - импульс Трчела).

Основным способом получения информации о процессах в разряде являлась регистрация пространственно-временного распределения свечения в разрядном промежутке при помощи фотомножителя, т.е. регистрация временного хода фототока

$i_{\text{фз}}(t)_x = \text{const}$ при разных расстояниях x от острья. На основе распределений амплитудных значений свечения вдоль разрядного промежутка в каждом полупериоде (III) ВЧ разряда в работе [1] объяснено развитие разряда по полупериодам ВЧ напряжения, а также оказалось возможным связать регистрируемый фототок с фотографиями разряда, полученными при помощи электронно-оптического преобразователя (ЭОП) в линейном режиме развертки [2].

Для изучения динамики разряда в течение одного III ВЧ напряжения исследовали распределение свечения разряда в разные фазы синусоиды ВЧ напряжения. Распределения, представленные на рис. 1, являются типичными для всех периодов ВЧ колебаний в начальной стадии разряда, за исключением первого периода.

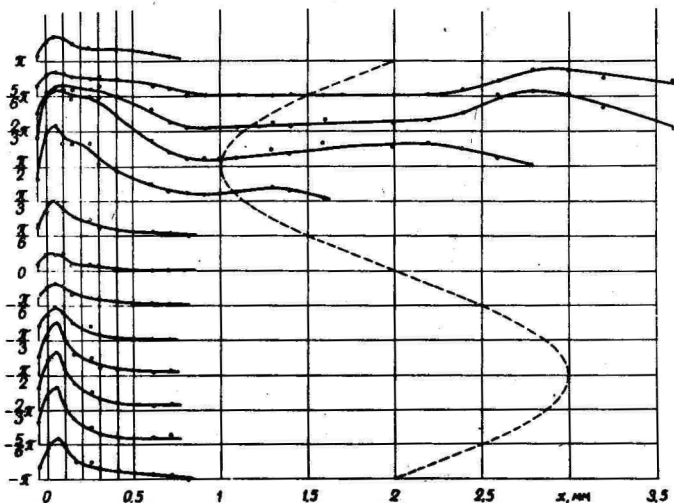


Рис. 1. I и J III от начала видимого ВЧ разряда.

Распределение свечения в промежутке в разные фазы ВЧ напряжения. Пунктирной линией показана синусоида ВЧ напряжения, а точки пересечения с горизонтальными линиями дают соответствующую фазу синусоиды. Начало положительного III условно считается нулем. Фазы в положительные III даются в положительных долях π , а в отрицательные III - в отрицательных долях π . x - расстояние от верхушки острья.

В первый положительный III при развитии разряда свечение регистрировали вблизи поверхности острья до достижения максимального значения ВЧ напряжения. При достижении амплитудного значения напряжения начинается распространение волны свечения вглубь разрядного промежутка. Этот процесс похож на переход вспыхивающего импульса в стример в случае постоянного напряжения [3].

Во все отрицательные III основная часть излучения сосредоточена вблизи острья. Характерное распределение свечения существует уже при нулевом напряжении на промежутке.

Анализ динамики свечения в положительные III открывает новое явление в разрядном канале, оставшееся до сих пор скрытым. До достижения амплитудного значения ВЧ напряжения происходит монотонное возрастание уровня свечения во всем

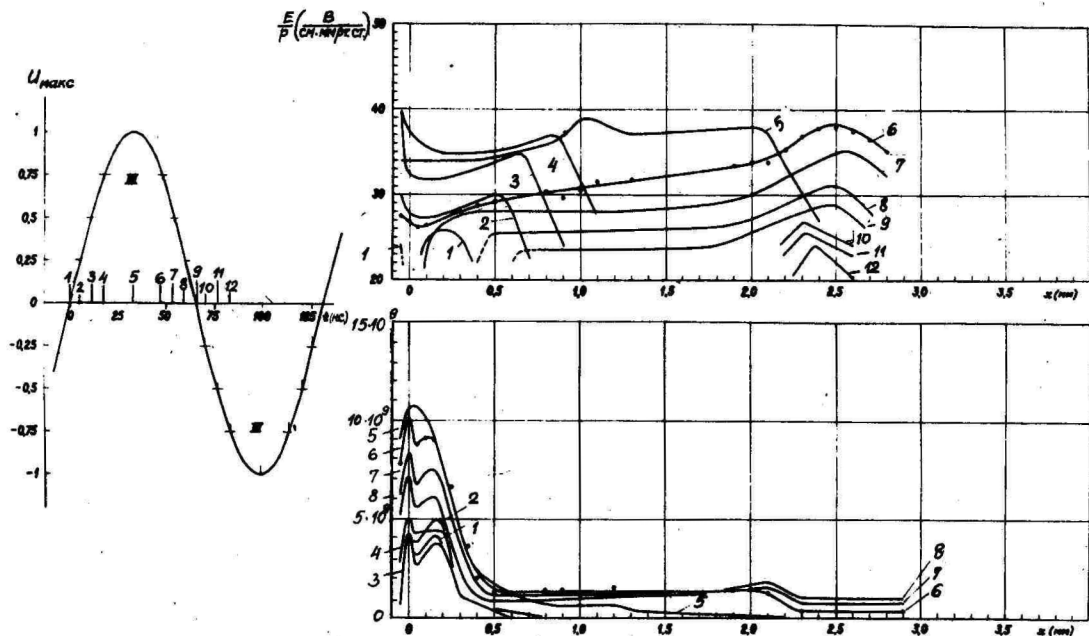


Рис. 2. III и IV III ВЧ разряда. Зависимости $E/p(x)_{t=\text{const}}$ и $n_e'(x)_{t=\text{const}}$. Параметр - время t в нс от начала III III. Соответствующие моменты времени указаны в левой части рисунка на синусоиде напряжения.

разрядном канале, но при амплитудном значении ВЧ напряжения возникает волна свечения, которая быстро распространяется вдоль разрядного промежутка. С ростом номера положительного III амплитуда волны уменьшается. У максимума XIX III наблюдается почти равномерное свечение вдоль всего разрядного канала. Дальнейший анализ показал важную роль этих волн свечения (волн ионизации) при наращивании проводимости разрядного канала.

В работе [3] на основе зависимостей $i_{фз\gamma}(t)_x = \text{const}$ были вычислены приведенная напряженность поля $E/p(t)$ и линейная плотность электронов $n'_e(t)$ в случае импульса Тричела и стримера. Критерием правильности расчетов являлось удовлетворительное совпадение измеренного и вычисленного импульсов тока. Поэтому эту методику вычислений применяли и в случае ВЧ разряда. Результаты расчета E/p и n'_e для третьего (положительного) III ВЧ разряда приведены на рис. 2.

На основе обобщения результатов можно представить модель развития ВЧ разряда, изображенную на рис. 3. В таком виде регистрируется развитие ВЧ разряда при помощи ЭОП-а [2].

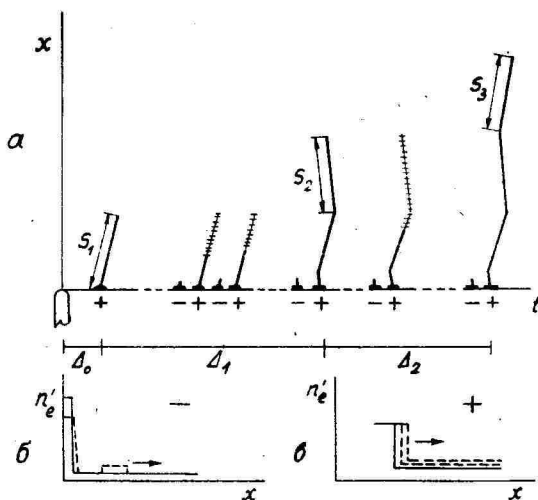


Рис. 3. Модель развития ВЧ разряда; а - стилизованная временная развертка разряда; б - отрицательный III; в - положительный III.

После включения ВЧ напряжения ($t = 0$) через время задержки Δ_0 возникает видимый разряд. В течение этого времени на поверхности острия образуется плазменный слой. Когда дебаевский радиус станет существенно меньшим, чем размеры приэлектродного слоя, возникает стример. Стример задает первоначальную структуру, в следе которой происходят все дальнейшие процессы. От стримера остается в промежутке плазменный канал. В течение большей части периода ВЧ колебаний в канале происходит прилипание электронов. В отрицательные III ионизация происходит только в приострие области. С каждым периодом напряженность поля в первой половине отрицательного III в электродном пятне увеличивается, в результате этого увеличивается и плотность электронов, достигая своего максимального значения при амплитудном напряжении (рис. 3б - сплошная линия). Во второй половине отрицательного III напряженность поля недостаточна для ионизации, электроны движутся в разрядный канал (рис. 3б - пунктирная линия). В результате этого происходит небольшое нарушение квазинейтральности в канале. В начале положительного III, из-за нарушения квазинейтральности, возникающее поле дополнительно усиливается, и по каналу распространяется ионизационная волна. Как причины возникновения, так и механизм распространения ионизационной волны совпадает с механизмом стратов (точнее - искусственных стратов), которые возникают в тлеющем разряде [4]. В результате распространения ионизационной волны плотность электронов в канале возрастает и с возрастанием номера III область большой плотности электронов перемещается медленно в сторону плоскости (рис. 3в).

В области большой плотности электронов регистрируется довольно интенсивное свечение (что легко регистрировать и при помощи ЭОП-а [2]). В остальной части канала разряд светится слабо.

Через интервал Δ_1 в конце первоначального канала снова возникает стример. Возникновение нового стримера становится возможным, когда в конце канала выполняются необходимые для этого условия (такие же, как и в случае первого стримера на поверхности острия). Момент возникновения нового стримера зависит от многих факторов.

Основные потери в разрядном канале определяются прилипанием электронов. Если $\tau/T \ll 1$ (τ - постоянная времени прилипания, T - длительность периода ВЧ колебаний), то к началу

очередного положительного III в разрядном канале не остается электронов (следовательно, невозможно и постепенное увеличение концентрации в конце разрядного канала), и условия для возникновения стримера не могут быть выполнены. Чем больше электронов остается в разрядном канале к началу следующего положительного III, тем раньше станет возможным возникновение стримера. Другими словами, чем выше частота, тем раньше происходит следующий скачок.

Отношением τ/T определяется главным образом и стационарный вид разряда. При $\tau/T \ll 1$ плотность электронов в канале со временем не увеличивается, нет причины для нагревания газа — стационарным видом разряда является ВЧ корона. С увеличением τ (при пониженных давлениях) или уменьшением T в канале остаются электроны, в результате становится возможным нагрев газа — стационарным видом разряда является ВЧ факел. Следовательно, как наблюдаемое в эксперименте существование двух видов стационарного ВЧ разряда, так и изменение переходной частоты от одного вида разряда к другому в зависимости от давления можно объяснить при помощи единственного основного механизма — прилипания.

Уравнения, которые лежат в основе описанной модели, получены в результате многих упрощающих допущений. Достоверность полученных результатов определяется точностью вычисления $E/p(t)$. В первом приближении для определения $E/p(\tau)$ используют соотношение [3]:

$$\frac{d[\ln i_{\Phi\Omega\gamma}(t)]}{dt} \approx \alpha_{\text{эфф}} v_e, \quad \alpha_{\text{эфф}} = \alpha - \eta, \quad (I)$$

где α — первый коэффициент Таунсенда, η — коэффициент прилипания, v_e — дрейфовая скорость электронов. Исходя из экспериментальной кривой $i_{\Phi\Omega\gamma}(t)$, получают значения для $\alpha_{\text{эфф}} v_e$ и по известным зависимостям $\alpha_{\text{эфф}}(E/p)$ и $v_e(E/p)$ определяют E/p . На точность расчетов в основном влияют два фактора:

I. При вычислениях считают, что существует пропорциональная зависимость между интенсивностью света и током фотумножителя, т.е. пренебрегают интегрирующим действием фотумножителя. Так как экспериментальные значения $i_{\Phi\Omega\gamma}$ в соотношении (I) стоят под логарифмом, влияние интегрирования на абсолютные значения E/p небольшое, но временной ход зависимости $E/p(t)_{x = \text{const}}$, а следовательно, и пространственные распределения $E/p(x)_{t = \text{const}}$ (рис. 2) могут быть искаженными.

2. При вычислениях используют значения $\alpha_{эфф}(E/p)$, полученные для невозмущенной среды. В случае импульсов короны постоянного напряжения и ВЧ разряда в первый III это оправдано, но для других периодов $\alpha_{эфф}$ меняется из-за существования в разрядном канале метастабильных колебательно-возбужденных молекул [5]. Хотя большие изменения $\alpha_{эфф}$ слабо влияют на значение напряженности поля $(E/p) \sqrt{\alpha_{эфф} v_e}$ [6], примененные одинаковых значений $\alpha_{эфф}$ для всех периодов разряда является некорректным.

В заключение можно сказать, что перечисленные факторы не влияют существенно на модель скачкообразного развития ВЧ разряда в начальной стадии, но ими нельзя пренебрегать при уточнении механизма развития.

Автор благодарен с.н.с. ФИАН им. П.Н. Лебедева И.А.Косому за обсуждение результатов вычислений.

Л и т е р а т у р а

1. Корге Х.И., Лаан М.Р. Изучение формирования высокочастотного разряда на факельной частоте. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 409, Тарту, 1977, с. 3-27.
2. Айтс М.Х., Куду К.Ф., Хальясте А.Я. Пространственно-временное развитие одноэлектродного ВЧ разряда. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 409, Тарту, 1977, с. 29-58.
3. Лаан М.Р. Вычисление распределения поля в случае импульсов короны постоянного напряжения. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 479, Тарту, 1979, с. 77-106.
4. Пекарек Л. Ионизационные волны (страты) в разрядной плазме. - Успехи физ. наук, т. 94, вып. 3, 1968, с. 463-500.
5. Hartmann G., Gallimberti I. The influence of metastable molecules on the streamer progression. - J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 8, 1975, p. 670-680.
6. Дупан Ю.А. Об одной возможности уточнения результатов элементарной теории ВЧ разряда в воздухе. - ЖТФ, т. 46, вып. II, 1976, с. 2321.

ON THE MECHANISM OF THE DEVELOPMENT OF
A HIGH-FREQUENCY DISCHARGE

M. Laan

S u m m a r y

The author has studied the development of a high-frequency (HF) discharge in the air at atmospheric pressure in the point-to-plane discharge gap. The spatio-temporal distribution of luminosity was recorded in different phases of HF voltage. As a result of the mathematical treatment of the results of the experiment, the reduced field-strength and the linear density of electrons were calculated as functions of time and coordinate. The more important characteristics of the model of HF discharge development are the following:

1. A visible discharge develops when a plasma layer forms on the surface of the point electrode.
2. In the case of a positive half-cycle there develop ionization waves along the discharge channel.
3. The basic mechanism of the disappearance of electrons is attachment.

The reliability of the results obtained from the experiments is discussed. The simplifications introduced in calculations do not significantly influence the model, but they must not be ignored when the mechanism of development is studied in more detail.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ОДНОЭЛЕКТРОДНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

М.Х. Айтс, К.Ф. Куду, А.Я. Хальясте

Известно [1, 2, 3], что в воздушном промежутке острие-плоскость, к которым приложено высокочастотное (ВЧ) напряжение (U_{ω}) частоты порядка 10 МГц и выше, а на острие подан дополнительно положительный потенциал (U_{\pm}^+), наблюдается изменение внешней формы разрядных вспышек от многоканальных "кустикообразных" до одноканальных "стреловидных". Было установлено, что увеличение U_{\pm}^+ способствует возникновению одноканальных ВЧ вспышек при заданной величине U_{ω} . Скорость развития канала при постоянном значении U_{\pm}^+ тем больше, чем выше U_{ω} [4].

Целью настоящей работы было более подробное исследование закономерностей развития канальной структуры остриевого ВЧ разряда на частоте 20 МГц в зависимости от величины как постоянной, так и переменной составляющей смешанного напряжения.

Условия и методика эксперимента

Разряд изучали в промежутке острие-плоскость (рис. 1)

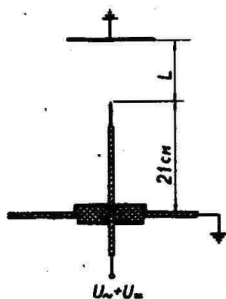


Рис. 1. Разрядный промежуток.

длиной $L = 12$ и 40 см и без пластины, образующей плоскость. Остриями служили цилиндрические проволоки диаметром $1...4$ мм, вершины которых были заточены конусообразно с углом заточки $30...120^\circ$ и имели радиус кривизны кончика $\sim 0,1$ мм. Применяли также острия диаметром $1...3$ мм с полусферически обработанной вершиной. Материал острия с полусферически обработанной вершиной — платина, а остальных острий — латунь или вольфрам. Источником ВЧ напряжения служила радиостанция с номинальной выходной мощностью 5 кВт, работающая на частоте 20 МГц. Постоянное напряжение до 25 кВ подавали от регулируемого стабилизированного источника и измеряли электростатическим вольтметром С-96 класса точности $1,0$. Переменное напряжение измеряли при помощи емкостного делителя и осциллографа с точностью 5% . Постоянное напряжение подавали к острию непрерывно, ВЧ напряжение в виде радиоимпульсов частотой следования $0,1...10$ Гц, обеспечивающей отсутствие влияния предыдущей разрядной вспышки на последующую. Разрядные вспышки фотографировали. Варьируя длительность радиоимпульсов, были получены фотографии разряда в разных стадиях развития. Одновременно была сфотографирована и соответствующая осциллограмма радиоимпульсного напряжения. Исследования были проведены в воздухе при атмосферных условиях, близких к нормальным.

Результаты наблюдений

Анализ визуальных наблюдений и полученных фотографий подтвердил описанные в работах [1, 2, 3] общие закономерности поведения разряда в зависимости от U_{\pm}^+ . Если $U_{\pm}^+ \gtrsim 1,5$ кВ, то разветвление разряда уменьшается и разрядные каналы выпрямляются.

Существенные изменения внешней формы разряда прекращаются при $U_{\pm}^+ \gtrsim (8...10)$ кВ. Форма ВЧ всплеск весьма чувствительна к величине U_{\sim} . Чем больше U_{\sim} , тем большую U_{\pm}^+ надо приложить к острию для выпрямления разрядных каналов. С увеличением диаметра острия, а также с изменением формы вершины острия от острозаточенной до полусферической происходит уменьшение вероятности появления одноканального разряда.

По направлению оси острия прямолинейно в промежуток распространяющиеся вспышки разряда характерны прежде всего коническим остриям при $U_{\pm}^+ \gtrsim 10$ кВ, если U_{\sim} выбрано немного превышающим пороговое напряжение при данном U_{\pm}^+ . Исключением являлось острие $\varnothing 4$ мм с углом заточки 120° , разряд с которого всегда имел излом на высоте $5-10$ мм от острия. С повы-

шением U_{\sim} появляются вспышки с изломанной траекторией впере­мешку с прямолинейными. При дальнейшем повышении U_{\sim} их относительное число растет, а угол отклонения увеличивается, траектория разряда изгибается. Начиная с $U_{\sim} \approx 6$ кВ наблюдается разветвление. Разветвление происходит сначала на высоте 3...10 мм от острия (чем больше U_{\pm}^+ , тем больше это расстояние в случае конических острий), т.е. на высоте первых разветвлений стримера. При дальнейшем увеличении U_{\sim} возникает разветвление и в более отдаленных от острия областях. Наблюдаются также вспышки, в которых развиваются несколько каналов непосредственно с поверхности острия. Это характерно остриям с полусферически обработанной вершиной и с конусообразной вершиной при больших углах заточки.

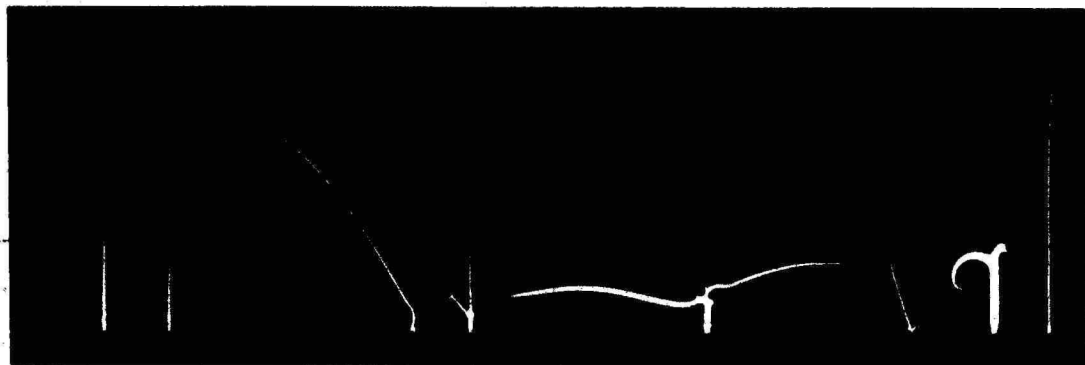
На основе вышеописанных особенностей можно классифици­ровать разрядные вспышки по внешней форме следующим образом:

1. разряд одноканальный, прямолинейный, осевой (откло­нение от оси менее 5°);
2. разряд одноканальный, с изломами;
3. разряд разветвляющийся;
4. разряд многоканальный (с поверхности острия исходят несколько каналов).

Характерные формы разрядных вспышек в промежутке дли­ной 12 см представлены на рис. 2. По приведенным выше призна­кам классификации вспышки № 1 и 2 можно отнести к первому, 3, 4 – ко второму, 5, 6 – к третьему, 7 – к четвертому типу.

В табл. приведены численные значения U_{\sim} возникнове­ния выделенных типов ВЧ вспышек для примененных острий при определенных U_{\pm}^+ . Переход от одной формы разряда к другой при повышении U_{\sim} происходит постепенно на определенном ин­тервале напряжения U_{\sim} . В таблице приведены те минимальные значения U_{\sim} , при которых данная форма разряда появляется примерно с 10%-ной вероятностью. Самые низкие значения U_{\sim} являются одновременно и пороговыми напряжениями возникнове­ния ВЧ разряда при данном U_{\pm}^+ . В середине интервалов напря­жения соответствующие формы разряда возникают с вероятностью более 90% (ширина этих интервалов определяется цифрами в со­седних столбцах для U_{\sim} в таблице). В некоторых случаях, на­пример, для острия № 6 при пороговых напряжениях по U_{\sim} возни­кали вспышки двух или трех типов, причем вероятность появле­ния вспышек с большим типовым номером превышала 10%. В этих случаях в таблице отмечены одинаковые цифры во всех соответ­ствующих колонках. Черточка в таблице означает, что данная

50 мм





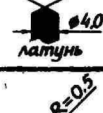





№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\sim}(RB)$	+10	+10	+15	+8,5	+10	+10	+8,5	-25	-25
$U_{\sim}(RB)$	2,6	3,9	4,0	5,5	4,3	3,3	5	5	5
$\frac{dU}{dt} \left(\frac{B}{MPC} \right)$	0	3,3	0	0	0	4	0	25	60
T(мкс)	300	300	300	300	300	540	300	300	100
№ острия	1	1	1	6	1	1	6	1	1

Рис. 2. Характерные формы ВЧ волышек при смешанном напряжении.

Численные значения напряжения
возникновения ВЧ эспышек

Таблица

№	Острже	U _{пороговое} стремле- ра (кВ)	U _{порого-} вое (кВ)	тип U (кВ)	U _{возникновения} разнн тип ВЧ эспышек (кВ)			
					1	2	3	4
I		4,5	3,1	5	2,1	2,8	2,8	3,5
				10	2,1	5,0	6,3	9,9
				15	2,1	5,4	6,7	-
				20	2,2	5,2	7,0	-
				25	2,3	4,5	7,3	-
2		7,0	5,1	5	3,7	4,0	4,0	4,8
				10	3,4	4,2	6,5	-
				15	3,2	4,4	6,8	-
				20	3,1	4,5	6,9	-
				25	2,8	4,7	6,9	-
3		9,5	7,0	5	5,1	5,4	5,4	6,4
				10	4,3	4,8	5,7	7,1
				15	4,1	4,8	7,1	14,5
				20	4,0	4,8	7,4	-
				25	3,9	5,0	7,4	-
4		10,7	7,5	5	-	6,1	7,5	7,5
				10	4,7	5,4	6,5	9,9
				15	4,5	5,4	7,1	-
				20	4,5	5,4	7,4	-
				25	4,4	5,3	7,5	-
5		15,8	11,3	5	-	-	11,4	11,4
				10	-	7,2	7,2	8,4
				15	-	5,8	6,8	8,2
				20	5,4	5,4	7,0	8,3
				25	5,4	5,4	7,1	-
6		8,2	6,0	5	4,2	4,4	5,0	5,4
				10	4,2	4,2	6,1	10,5
				15	5,0	5,0	6,1	-
				20	4,8	4,8	6,0	-
				25	4,8	4,8	6,5	-
7		12,2	8,2	5	-	-	7,9	8,1
				10	-	5,8	6,4	6,4
				15	-	4,8	5,9	7,1
				20	-	5,1	6,1	9,2
				25	-	5,1	6,1	9,9
8		15,0	11,3	5	-	-	11,2	11,3
				10	-	7,5	7,5	9,2
				15	-	5,4	6,9	8,5
				20	-	5,2	7,1	9,2
				25	-	5,2	7,1	-

формы разряда при данном U_{\sim}^+ не наблюдалась при повышении U_{\sim} до 15 кВ (максимальная величина U_{\sim} на нашей установке).

Приведенные в таблице значения U_{\sim} были получены при прямоугольной форме огибающей радиоимпульса (передний фронт на уровне 0,9 менее 5 мкс), когда ВЧ разряд возникал при установившемся значении U_{\sim} .

В случае более пологого фронта радиоимпульса разряд мог возникнуть на фронте импульса, так что дальнейшее его развитие происходило при возрастающем во времени ВЧ напряжении. При этом было замечено, что в таких условиях вспышки типа I распространяются на значительно большие расстояния, чем при неизменяющемся во времени U_{\sim} . (При постоянной амплитуде U_{\sim} вспышки типа I распространялись максимально до расстояния 40 мм). Поэтому было исследовано влияние изменения U_{\sim} во времени на развитие ВЧ вспышек. Поскольку устойчивое появление прямолинейных осенаправленных вспышек наблюдалось только у конических острий, у которых область напряжений возникновения вспышек типа I наиболее широкая, влияние изменения U_{\sim} было изучено только для острий № I...3.

Оказывается, что внешняя форма вспышек сильно зависит как от начального значения U_{\sim} в момент возникновения вспышки, так и от скорости его изменения. Если вспышка возникает при пороговых значениях U_{\sim} (при $U_{\sim}^+ \geq 10$ кВ) и скорость дальнейшего роста U_{\sim} меньше ~ 15 В/мкс, то вероятнее всего развивающийся вначале по оси острия разрядный канал на высоте ~ 10 мм разветвляется обычно на две ветви, причем ветви расходятся на противоположные стороны под углом почти 180° (см. фото 6 на рис. 2). Если канал не разветвляется, то появляется излом на значительный угол. При скоростях нарастания U_{\sim} 15...40 В/мкс возникший при пороговых значениях U_{\sim} разряд чаще всего распространялся до определенного расстояния (2-5 см) по оси промежутка, после чего траектория его искривлялась.

Если ВЧ вспышки зажигались при напряжениях, немного меньших порогового вспышек типа 2 (вторая колонка в таблице)*, то при дальнейшем повышении U_{\sim} с подходящей скоростью

* Возникновение вспышки при требуемом значении U_{\sim} можно обеспечить быстрым нарастанием U_{\sim} до требуемого уровня. В наших экспериментах время нарастания U_{\sim} до желаемого значения менее 10 мкс обеспечило возникновение ВЧ вспышки при этом значении U_{\sim} .

они распространялись по оси острия на значительные расстояния. Максимальная длина развивающегося по оси острия канала была достигнута при $\frac{dU_{\sim}}{dt} = 0,3$ В/мкс. При больших $\frac{dU_{\sim}}{dt}$ участок, на котором разряд развивается по оси острия, тем меньше, чем больше $\frac{dU_{\sim}}{dt}$. Например, разряд типа I распространялся с острия № 2 (при отсутствии плоскостного электрода) при начальном значении $U_{\sim} = 4$ кВ, $U_{\sim}^+ = 15$ кВ, $\frac{dU_{\sim}}{dt} = 0,3$ В/мкс на расстояние 40 см за 5 мс — это время, в течение которого удавалось обеспечить рост U_{\sim} . Скорость распространения такого разряда оставалась постоянной, начиная с расстояния ~ 20 мм от острия, и равнялась 75 м/с. При $\frac{dU_{\sim}}{dt} = 3$ В/мкс разряд распространялся до расстояния ~ 20 см по оси острия, после чего его траектория стала отклоняться от оси. Скорость распространения разряда в интервале 2...20 см от острия составляла при этом 250 м/с. Чем больше скорость нарастания U_{\sim} , тем короче путь развития разряда по оси промежутка.

Если $\frac{dU_{\sim}}{dt} > 40$ В/мкс, то траектория разряда обычно криволинейна с самого начала. При $\frac{dU_{\sim}}{dt} < 0,2$ В/мкс возникший при пороговом значении U_{\sim} разряд имел уже при длине ~ 10 мм диффузный вид и в дальнейшем быстро приобрел форму медленно удлиняющегося факела.

Если начиная с какого-то момента развития разряда $\frac{dU_{\sim}}{dt} \leq 0$, то распространение канала прекращалось, у его вершины образовывалась характерная "звездочка" и разряд со временем переходил в факел.

При отрицательном постоянном потенциале на острие заметные изменения во внешней форме ВЧ всплеск наблюдались лишь при значительных его значениях ($U_{\sim}^- \geq 20$ кВ). Разряд распространялся прямолинейно по оси промежутка до определенного расстояния, зависящего как от начального значения U_{\sim} , так и от $\frac{dU_{\sim}}{dt}$. Затем траектория разряда всегда изгибалась, образуя крюк. Для обеспечения прямолинейного распространения требовалось более высокое начальное U_{\sim} по сравнению с положительным U_{\sim} .

С увеличением $\frac{dU_{\sim}}{dt}$ точка начала искривления канала перемещалась дальше от острия. Например, при начальном значении $U_{\sim} = 5,0$ кВ и $\frac{dU_{\sim}}{dt} = 25$ В/мкс длина прямого участка канала была 13 мм (рис. 2, фото 8). Прямолинейные каналы максимальной длины (~ 50 мм) были получены при $\frac{dU_{\sim}}{dt} = 50$ В/мкс, но в этом случае рост U_{\sim} прекращался из-за перегрузки разрядом генератора при $U_{\sim} \approx 7$ кВ и U_{\sim} начало падать, чем,

наверно, и вызвано образование крика при дальнейшем развитии разряда (см. рис. 2, фото 9). Средняя скорость распространения на прямолинейном участке траектории разряда при этом составляла ~ 1000 м/с.

Заключение

Исследования формы ВЧ разрядных вспышек в лабораторном воздухе на частоте 20 МГц в условиях смешанного напряжения показали, что в широком интервале варьирования геометрии остриевого электрода ВЧ вспышки с увеличением постоянной положительной составляющей смешанного напряжения становятся одноканальными, имеющими тенденцию распространяться вдоль оси остриевого электрода. Наилучшие условия для распространения разряда по оси острия обеспечивают конические острия с острым углом заточки, при применении которых отклонения разрядных каналов от оси менее 5° при подходящем выборе значений U_- и U_+^+ . Применяя нарастающее во времени ВЧ напряжение, можно обеспечить распространение разряда по оси острия на значительно большие расстояния (порядка 0,5 м в наших условиях), чем при неизменяющемся U_- .

ВЧ вспышки становятся одноканальными и по оси распространяющимися и тогда, когда постоянная составляющая смешанного напряжения является отрицательной, хотя по абсолютной величине она должна быть, при прочих равных условиях, гораздо больше, чем соответствующая положительная составляющая.

Л и т е р а т у р а

1. Куду К.Ф. О начальных стадиях разряда с острия в воздухе. Тарту, 1960.
2. Прокофьев А.М. Влияние постоянного напряжения на форму вспышек разряда с острия при высокой частоте. - XIX Герценовские чтения, 1966, с. 115-116.
3. Прокофьев А.М. Влияние дополнительного постоянного напряжения положительной полярности на форму факельных вспышек разряда. - XX Герценовские чтения, 1967, с. 100-101.
4. Бердышев А.В. Фотоэлектрические исследования формирования высокочастотных разрядов с острия в воздухе. Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук, Л., 1971.

THE STUDY OF THE DEVELOPMENT OF THE HF
POINT-DISCHARGE UNDER CONDITIONS OF
SUPERIMPOSED HF AND DC VOLTAGES

M. Aints, K. Kudu and A. Haljaste

S u m m a r y

The shape of HF discharge bursts has been studied in superimposed HF and DC fields at a carrier frequency of 20 MHz. The point-to-plane discharge gap was used in laboratory air. It has been found that with an increase of the positive DC voltage the HF bursts are getting single-channelled and there appears a tendency for them to develop axially over a large scale of point electrode geometry. The best conditions for axial development are ensured by sharp conic point electrodes, by which the discharge channel diverges from the point axis by less than 5° , if the HF and DC components are chosen properly. Applying a HF component increasing in time, one can ensure the axial development of the discharge channel of considerably greater distances (up to 0,5 m in our case) than in case of an invariable HF potential.

The transformation of the branched HF bursts into axially developing single-channelled discharges also occurred at a negative DC component, but its absolute value must be chosen, under other unchanged conditions, much higher than the corresponding value of a positive DC component.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА МОДУЛЯЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА ДК-79

Ю.А. Хяммалов

Введение

Конструкция и основные технические данные динамического конденсатора ДК-79 приведены в работе [1]. Была обнаружена сильная температурная нестабильность коэффициента модуляции, которая не объясняется только тепловым расширением конструкционных деталей динамического конденсатора (ДК). При этом изменение коэффициента модуляции при изменении температуры у различных экземпляров ДК может сильно отличаться.

С целью установления причин такой температурной нестабильности коэффициента модуляции было изготовлено 9 динамических конденсаторов ДК-79 и исследована зависимость их параметров от температуры.

Ввиду того, что зависимость коэффициента модуляции от температуры у различных экземпляров ДК сильно отличается, нельзя связывать причины, обуславливающие такую зависимость, со структурными изменениями материала мембраны, как было высказано в работе [1].

Результаты измерения

1. Измерения проводились при комнатной температуре и при температурах -20°C и $+50^{\circ}\text{C}$.

2. Емкость измерительного конденсатора у всех ДК при понижении температуры от комнатной до -20°C увеличивается в среднем на $0,12\% \text{ K}^{-1}$ (максимально $0,17\% \text{ K}^{-1}$) и при повышении температуры от комнатной до $+50^{\circ}\text{C}$ уменьшается в среднем на $0,09\% \text{ K}^{-1}$ (максимально $0,17\% \text{ K}^{-1}$). В то же время емкость конденсатора возбуждения у некоторых экземпляров ДК при понижении температуры увеличивается, а у некоторых уменьшается, и в среднем изменение емкости конденсатора возбуждения составляет $0,12\% \text{ K}^{-1}$ (максимально $0,28\% \text{ K}^{-1}$). При повышении температуры изменение емкости конденсатора возбуждения в среднем составляет $0,17\% \text{ K}^{-1}$ (максимально $0,26\% \text{ K}^{-1}$).

3. При комнатной температуре резонансные частоты ДК находятся в пределах от 4800 до 7800 Гц. При понижении температуры резонансная частота у всех ДК увеличивается в среднем на $0,04\% \text{ K}^{-1}$ (максимально $0,07\% \text{ K}^{-1}$) и при повышении температуры уменьшается в среднем на $0,035\% \text{ K}^{-1}$ (максимально $0,07\% \text{ K}^{-1}$).

4. Коэффициент модуляции ДК при напряжениях возбуждения от 15 до 50 В изменяется в пределах $0,15 \dots 0,4$ (при комнатной температуре). При понижении температуры коэффициент модуляции у всех ДК увеличивается в среднем на $2,5\% \text{ K}^{-1}$ (максимально $3,8\% \text{ K}^{-1}$). При повышении температуры коэффициент модуляции у двух ДК увеличивается, а у семи уменьшается, и его изменение в среднем составляет $1,4\% \text{ K}^{-1}$ (максимально $3,1\% \text{ K}^{-1}$).

Необходимо отметить, что данные результаты измерения коэффициента модуляции представляют собой граничные значения, т.к. значения коэффициента модуляции при данной температуре при повторных измерениях в какой-то мере колеблются.

Анализ результатов измерения

Изменение емкостей измерительного конденсатора и конденсатора возбуждения в зависимости от температуры полностью объясняется тепловым расширением конструктивных элементов ДК.

Коэффициент модуляции при малых амплитудах колебания мембраны определяется соотношением [2]:

$$M = \frac{\epsilon_0 \tau_d^2 U_{\epsilon_0}^2}{16 \beta \omega_{\text{рез}} \beta d^2} \left(1 - \frac{\tau_d^2}{2R_0^2} \right), \quad (1)$$

где M - коэффициент модуляции, ϵ_0 - электрическая постоянная, τ_d - радиус электрода конденсатора возбуждения, U_{ϵ_0} - амплитудное значение переменного напряжения возбуждения, β - коэффициент потерь энергии, $\omega_{\text{рез}}$ - резонансная круговая частота колебания мембраны, β - расстояние между электродами измерительного конденсатора, d - расстояние между электродами конденсатора возбуждения, τ_{ϵ} - радиус электрода измерительного конденсатора, R_0 - радиус мембраны.

В формуле (1) поглощение энергии учитывается коэффициентом β . Такая зависимость коэффициента модуляции от β возникает, если в уравнении движения мембраны принять потери энергии пропорциональными ее скорости движения. При малых амплитудах колебания мембраны такой прием оправдан, т.к. резонансные кривые симметричны относительно резонансной час-

тоты. Как известно, если потери энергии пропорциональны не скорости движения, а амплитуде колебания мембраны, то имеет место искривление резонансных кривых (уравнение движения нелинейное) [3]. Аналогичное искривление резонансных кривых существует и в ДК с натянутой мембраной (как, например, в ДК-79), но это вызвано уже нелинейностью возбуждающей электростатической силы [2]. Следовательно, при больших амплитудах колебания мембраны установление зависимости потери энергии от амплитуды колебания затруднено, и поэтому ограничимся в дальнейшем рассмотрением только малых колебаний мембраны.

Коэффициент потерь обычно связывают с добротностью данной колебательной системы. Для натянутой мембраны эта связь коэффициента потерь β и реальной добротности Q мембраны как колебательной системы выражается следующим соотношением:

$$\beta = \frac{m\omega_{\text{рез}}}{3Q}, \quad (2)$$

где m - масса мембраны, а $m/3$ представляет собой эквивалентную массу колеблющейся мембраны.

Учитывая соотношение (2), вместо расстояний между электродами ДК b и d подставляем соответственно емкость C_b измерительного конденсатора и емкость C_d конденсатора возбуждения. Тогда формулу (1) можно привести к виду:

$$M = \frac{3C_d^2 C_b U_{\text{вн}}^2 Q}{4\pi^2 m \epsilon_0^2 r_d^2 r_b^2 \omega_{\text{рез}}} \left(1 - \frac{r_b^2}{2R_0^2}\right). \quad (3)$$

Теперь в формулу (3) для определения коэффициента модуляции входят параметры C_b , C_d и $\omega_{\text{рез}}$, температурные изменения которых легко можно измерить. Тепловым расширением электродов и мембраны по диаметру можно пренебречь.

Продифференцировав соотношение (3) по C_b , C_d и $\omega_{\text{рез}}$ и подставив соответствующие данные температурного изменения C_b , C_d и $\omega_{\text{рез}}$, приходим к выводу, что изменение коэффициента модуляции превышает в среднем на $1...2\% \text{ K}^{-1}$ суммарное изменение C_b , C_d и $\omega_{\text{рез}}$. Следовательно, добротность Q колеблющейся мембраны должна также зависеть от температуры.

Можно выделить три фактора, участвующих при поглощении внешней возбуждающей энергии при колебаниях мембраны:

- 1) поглощение энергии в самой мембране, объясняемое внутренним трением в материале мембраны;
- 2) трение о газовую среду вблизи мембраны;
- 3) поглощение энергии в конструкционных деталях закреп-

ления и натягивания мембраны, вызванное неоднородностью натяжения мембраны. Поглощаемая энергия при этом тем больше, чем меньше однородность натяжения мембраны.

Трение о газовую среду вблизи мембраны можно устранить вакуумированием корпуса ДК, и, как показывает практика, для этого достаточно снизить давление до 3...5 Па. Поглощение энергии за счет внутреннего трения в материале мембраны ограничивает амплитуду колебания мембраны из данного материала. Практически мембрану никогда не удастся натянуть совершенно однородно и, следовательно, эта граничная добротность не реализуется.

Неоднородно натянутую мембрану можно мысленно представить в виде набора бесконечного числа жестко связанных натянутых струн, резонансные частоты которых лежат в интервале от ω_1 до ω_2 . Для количественной оценки неоднородности натяжения мембраны воспользуемся уже известной из работы 2 пружинно-пластинчатой колебательной системой, эквивалентной мембране. Поделим пружинно-пластинчатую колебательную систему на n тождественных пружинно-пластинчатых подсистем. Пусть пружины имеют упругости $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ и массы всех пластин равны между собой, т.е. $m_1 = m_2 = \dots = m_n = m$. Единственным фактором, оказывающим сопротивление колебательному процессу, примем внутреннее трение в пружинах, которое учитываем с коэффициентами потерь $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$. Пусть на каждую пружинно-пластинчатую подсистему действует внешняя периодическая сила $F = (F_0/n) \cos \omega t$. Если считать эти подсистемы жестко связанными между собой, то они имеют одинаковую фазу и амплитуду колебания, и уравнение движения всей системы может быть представлено в виде:

$$nm\ddot{x} + (\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n)\dot{x} + (\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n)x = (F_0/n)\cos \omega t.$$

После решения этого уравнения движения амплитуда колебания всей системы определяется соотношением:

$$x_0 = \frac{f_0}{\sqrt{\left(\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2}{n} - \omega^2\right)^2 + \frac{(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n)^2 \omega^2}{Q_{\text{ш}}^2 n^2}}}, \quad (4)$$

где $\omega_1^2 = \gamma_1/m$; $\omega_2^2 = \gamma_2/m$, ..., $\omega_n^2 = \gamma_n/m$ - квадраты круговых резонансных частот подсистем, $Q_{\text{ш}}$ - добротность за счет внутреннего трения в материале пружины и $f_0 = F_0/(nm)$.

Рассмотрим случай, когда резонансные частоты $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ пружинно-пластинчатых колебательных подсистем распределены равномерно в интервале частот от ω_1 до ω_n . Таким

образом, соотношение $(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n)/n$ в знаменателе уравнения (4) представляет собой среднюю частоту ω_c всех колебательных подсистем, а в данном случае и резонансную частоту всей системы.

При равномерном распределении частот $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ амплитуда колебания x_0 на резонансной частоте ω_c определяется соотношением:

$$x_0 = \frac{f_0}{\sqrt{\left(\frac{\delta\omega_1^2 + \delta\omega_2^2 + \dots + \delta\omega_n^2}{n}\right)^2 + \frac{\omega_c^2}{Q_{\text{ш}}^2}}}, \quad (5)$$

где $\delta\omega_1 = \omega_c - \omega_1, \delta\omega_2 = \omega_c - \omega_2, \dots, \delta\omega_c = 0, \dots, \delta\omega_n = \omega_c - \omega_n$.

Можно показать, что среднее квадратическое отклонение в знаменателе уравнения (5) при бесконечно большом числе подсистем приближается к пределу $(\omega_c - \omega_1)^2/3$.

Таким образом, если пружинно-пластинчатая колебательная система подразделена на бесконечно большое количество подсистем с резонансными частотами в интервале от ω_1 до ω_n , то амплитуда колебаний всей системы определяется соотношением:

$$x_0 = \frac{f_0}{\omega_c^2} \frac{Q_{\text{ш}}}{\sqrt{1 + \frac{Q_{\text{ш}}^2}{g} \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_c}\right)^4}}, \quad (6)$$

где

$$Q = \frac{Q_{\text{ш}}}{\sqrt{1 + \frac{Q_{\text{ш}}^2}{g} \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_c}\right)^4}} \quad (7)$$

представляет собой добротность пружинно-пластинчатой колебательной системы.

При выводе формулы (6) мы предполагали, что резонансные частоты подсистем равномерно распределены внутри частотного интервала от ω_1 до ω_n и расположены симметрично относительно ω_c . Как уже отмечалось, мембрану можно мысленно поделить на бесконечно большое количество натянутых струн, и если общее натяжение мембраны неравномерное, то резонансные частоты струн лежат в интервале от ω_1 до ω_n . При температурном воздействии на ДК из-за теплового расширения конструктивных элементов ДК неоднородность натяжения может измениться, тем самым изменяется и спектр резонансных частот натянутых струн. Так как при тепловом расширении имеем дело с очень малыми перемещениями, то в первом приближении можем считать, что частоты струн распределены симметрично и равномерно около резонансной частоты мембраны и находятся в интервале от ω_1

до ω_n .

Согласно работе [2] можно перейти от эквивалентной пружинно-пластинчатой колебательной системы к мембране. Тогда получаем формулу (3), в которой Q определяется соотношением (7) и $\omega_{рез} = \omega_c$. При этом под $Q_{м}$ нужно теперь понимать добротность за счет внутреннего трения материала мембраны. Таким образом, коэффициент модуляции определяется соотношением:

$$M = \frac{3C_d^2 C_b U_{во, \text{эфф}}^2}{4\pi^2 m c^2 \tau_a^2 \tau_b^2 \omega_{рез}} \frac{Q_{м}}{\sqrt{1 + \frac{Q_{м}^2}{9} \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_{рез}}\right)^2}} \left(1 - \frac{\tau_b^2}{2R_p}\right). \quad (8)$$

Из (8) видно, что чем больше разница частот $\omega_{рез} - \omega_1$, тем меньше добротность колеблющейся мембраны и, следовательно, тем меньше коэффициент модуляции.

Для определения зависимости изменения коэффициента модуляции от изменения граничной частоты продифференцируем соотношение (7) по ω_1 , тогда получим

$$\Delta Q / Q = \eta (\Delta \omega_1 / \omega_1),$$

где

$$\eta = \frac{4Q_{м}^2 \omega_1 \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_{рез}}\right)^3}{9 \omega_{рез} \left[1 + \frac{Q_{м}^2}{9} \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_{рез}}\right)^2\right]}. \quad (9)$$

Из уравнения (9) видно, что η в зависимости от увеличения соотношения частот $\omega_1 / \omega_{рез}$ сперва увеличивается и имеет максимум около $\omega_1 / \omega_{рез} = 0,96 \dots 0,97$, затем резко падает до нуля при $\omega_1 / \omega_{рез} = 1$.

Практика работы с динамическими конденсаторами ДК-79 показывает, что для мембраны из нержавеющей стали добротность $Q_{м}$ не ниже, чем 3500.

Принимая, например, $Q_{м} = 3500$, величина η в зависимости от $\omega_1 / \omega_{рез}$ имеет следующие значения: при $\omega_1 / \omega_{рез} = 0,5$ $\eta = 4$; при $\omega_1 / \omega_{рез} = 0,7$ $\eta = 9$; при $\omega_1 / \omega_{рез} = 0,9$ $\eta = 36$; при $\omega_1 / \omega_{рез} = 0,96$ $\eta = 75$; при $\omega_1 / \omega_{рез} = 0,98$ $\eta = 35$. Таким образом, видно, что малейшее изменение граничной частоты ω_1 вызывает заметное изменение коэффициента модуляции. Этим может быть объяснима и довольно сильная нестабильность коэффициента модуляции динамических конденсаторов ДК-79 в зависимости от температуры. Особенно важно то, что при повторных температурных измерениях коэффициент модуляции устанавливается около определенного уровня, свойственного для данной температуры.

Наконец, отметим, что если нужно учесть трение мембраны о газовую среду, то в соотношениях (6) - (9) добротность Q_m необходимо заменить суммарной добротностью Q_{Σ} , определяемой соотношением:

$$Q_{\Sigma} = \frac{Q_m Q_{\Gamma}}{Q_m + Q_{\Gamma}}, \quad (10)$$

где Q_{Γ} - добротность мембраны о газовую среду.

Из соотношения (10) следует, что с повышением давления газов в корпусе ДК добротность Q_{Γ} , а следовательно, и Q_{Σ} уменьшается. Подставив соотношение (10) в (9), видно, что таким путем можно уменьшить температурное изменение коэффициента модуляции. Одновременно уменьшается и коэффициент модуляции.

Л и т е р а т у р а

1. Сакс О.В., Хяммалов Ю.А., Шор В.Г. Динамический конденсатор с электростатическим возбуждением ДК-79. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 534, Тарту, 1980, с. 37-44.
2. Хяммалов Ю.А. Анализ работы электростатического динамического конденсатора с натянутой мембраной. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 534, Тарту, 1980, с. 21-36.
3. Писаренко Г.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. Киев, 1962.

AN INVESTIGATION INTO THE THERMAL INSTABILITY OF THE MODULATION COEFFICIENT OF THE DYNAMIC CAPACITOR DK-79

J. Hämmalov

S u m m a r y

The paper presents the mean and maximum values of changes in the capacitance, in the resonance vibration frequencies of the membrane and in the modulation coefficients depending on the temperature of nine electrostatically driven dynamic capacitors DK-79 with a taut membrane. The measurements of these parameters have been carried out at temperatures of -20°C , $+50^{\circ}\text{C}$ and at room temperature.

The formula for the modulation coefficient has been derived from a spring-mass model of the vibrating membrane, taking into consideration the nonuniformity of the tautness of the real membrane. It has been shown that the slightest

change in the uniformity of the tautness of the membrane caused by heat expansion and by a change in the mutual position of the elements of the design of the dynamic capacitor, depending on temperature, can give rise to considerable changes in the modulation coefficient.

The results of this investigation can be used in any design of an electrostatically driven dynamic capacitor with the vibration element in the shape of a round taut membrane.

К МЕХАНИЗМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ОБЛАСТИ ПЕРВОЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ

А. А. Жуков

Высокочастотный пробой воздуха исследовался в работах [1-7]. Было обнаружено, что начиная с определенной частоты (первая критическая частота) амплитудное значение напряжения высокочастотного электрического пробоя становится меньше, чем напряжение пробоя постоянным током. Ответственным за это понижение авторы считают положительный объемный заряд, накапливающийся внутри разрядного промежутка, когда амплитуда колебания положительного иона становится меньше расстояния между электродами. Этот заряд может усиливать электрическое поле и создавать благоприятные условия для пробоя. Такое объяснение дал Беккер [8]. Фейтченд [9] экспериментально обнаружил положительный объемный заряд, выдувая воздух из разрядного промежутка.

Нами были продолжены опыты по измерению объемного заряда [10-11] методом, предложенным Фейтчендом. Этот метод был усовершенствован так, что можно было определять количество ионов, образовавшихся в разрядном промежутке, как функцию приложенного напряжения. При частотах, несколько меньших критической, экспериментально было обнаружено накопление положительного объемного заряда, но при этом напряжение пробоя не уменьшалось, а даже возрастало по отношению к напряжению пробоя постоянным током на 1-2% [11]. Таким образом, объяснение понижения напряжения пробоя в области первой критической частоты требует уточнения. В настоящей работе делается попытка такого уточнения с привлечением для объяснения понижения напряжения вторичных процессов на временном катоде, который может испустить электрон в момент амплитуды напряжения (рис. 1а). Этот электрон создает лавину, пересекающую разрядный промежуток за время, малое по сравнению с периодом, так что электроны успевают поглотиться временным анодом, а в головке лавины остаются положительные ионы, отрицательные ионы, а также возбужденные ионы, атомы и молекулы газа. Часть из них возбуждена до метастабильных состояний. На важное значение метастабилей указывается в работе [12].

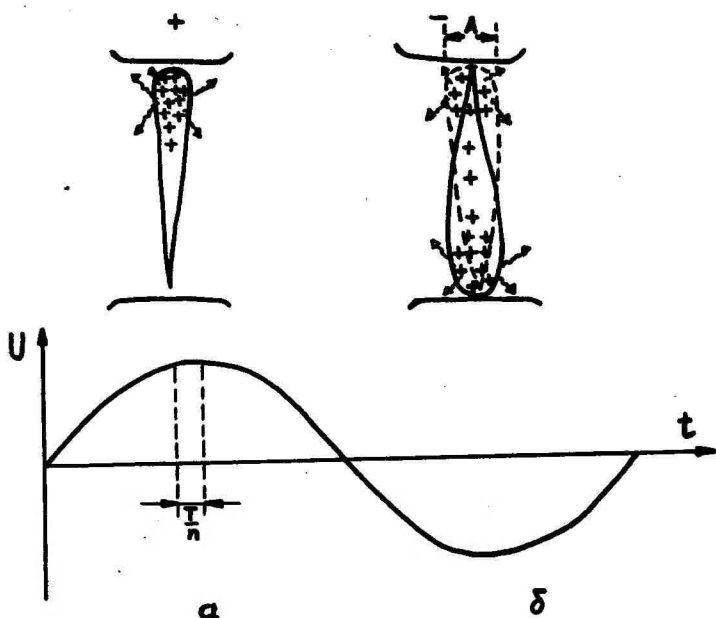


Рис. I.

Через полпериода полярность напряжения меняется (рис. Iв). Положительные ионы отодвигаются на некоторое расстояние вглубь разрядного промежутка в течение четверти периода, а потом снова придвигаются к электроду. Незаряженные метастабильные остаются на месте головки первичной лавины и оказываются непосредственно перед временным катодом. Имеется вероятность выхода вторичного электрона, наибольшая для того места катода, которое находится под головкой первичной лавины через полпериода. Вторичный электрон может появиться при облучении электрода ультрафиолетовым квантом, испущенным метастабильным атомом или ионом. Возможно также попадание метастабильного атома на электрод вследствие диффузии (для нейтрального атома) или притяжения (для положительного иона). При этом также может произойти испускание вторичного электрона. Если вторичный электрон появился, то он даст начало вторичной лавине, которая пойдет по пути первичной лавины. Далее процесс будет развиваться от одного полупериода к другому, пока не образуется ниточка плазмы по пути первичной

лавны и произойдет перекрытие (замыкание) разрядного промежутка.

Сформулированное условие пробоя может быть представлено математически. Предположим, что число метастабилей пропорционально числу положительных ионов и уменьшается со временем по экспоненциальному закону со средним временем жизни, равным τ , и что количество вторичных электронов, испущенных катодом вследствие совокупности всех процессов, приблизительно пропорционально числу поглощенных катодом метастабильных положительных ионов за время активной части периода T/n . Описанные элементарные процессы учитываются коэффициентом γ Таунсенда [13]. Тогда

$$\gamma \left\{ \exp(\alpha d - T/2\tau) - \exp[\alpha(d - k^+ET/n) - T/2n] \right\} = 1 \quad (1)$$

условие пробоя в области первой критической частоты. Здесь α - первый коэффициент Таунсенда, d - расстояние между электродами, k^+ - подвижность положительного иона, E - амплитудное значение напряженности поля около временного катода. Если $\alpha k^+ET/n \ll 1$, то условие упрощается:

$$\gamma \alpha E k^+ T/n \exp(\alpha d - T/2\tau) = 1. \quad (2)$$

На рис. 2 и 3 показаны результаты вычисления напряжения пробоя в области первой критической частоты по формуле (2). В сравнении с экспериментальными данными работ [1] и [6] на частотах 0,1 МГц и 0,46 МГц. Кривая (1) вычислена. Точки - экспериментальные данные. Кривая (2) соответствует пробоям на постоянном напряжении. Были приняты следующие значения коэффициентов: $\gamma = 10^{-2}$, $\tau = 10^{-6}$ с, $k^+ = 1,37$ см²В⁻¹с⁻¹, $n = 12$ (за время T/n амплитудное значение синусоид изменяется примерно на 3%).

Легко видеть, что при уменьшении частоты условие (1) дает увеличение напряжения пробоя. Критическая частота получается, когда αd , вычисленное из условия (1), станет равным значению αd для пробоя постоянным током. Условие (1) предсказывает также увеличение напряжения пробоя с ростом частоты, что вызвано уменьшением времени активной части периода. Однако при увеличении частоты механизм пробоя снова изменяется. Электроны первичной лавины не успевают теперь полностью поглотиться за четверть периода и являются инициаторами вторичных лавин, идущих по пути первичной. Этот "электронный пробой" исследовал Пим [14] и не описывается формулой (1). Условие (1) справедливо в небольшом диапазоне час-

тот, превышающих в 2-3 раза первую критическую частоту для

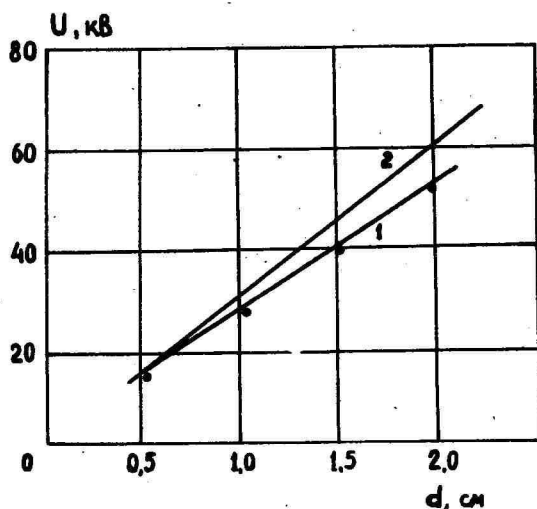


Рис. 2.

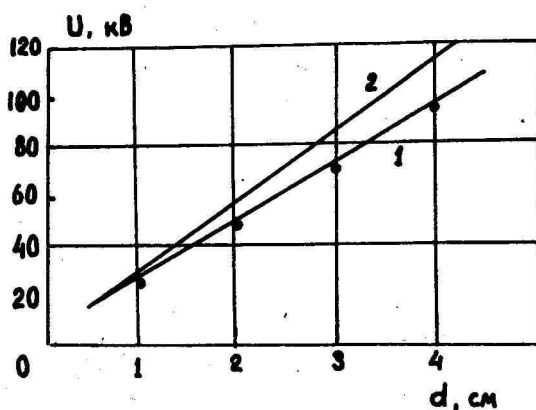


Рис. 3.

промежутка данной ширины.

В заключение автор выражает благодарность доценту К.Ф. Куду - руководителю лаборатории газового разряда Тартуского университета и сотрудникам этой лаборатории за интерес к работе и обсуждение результатов.

Л и т е р а т у р а

1. Reukema L.E. Trans. Am. IEE, 47, p. 38, 1929.
2. Kampschulte J., Arch. Elektrotechn., 24, S. 525, 1930.
3. Lassen H., Arch. Elektrotechn., 25, S. 322, 1931.
4. Miseré F., Arch. Elektrotechn., 26, S. 123, 1932.
5. Müller F., Arch. Elektrotechn., 28, S. 341, 1934.
6. Luft H., Arch. Elektrotechn., 31, S. 93, 1937.
7. Bright A.W., Brit. Electr. and Applied Ind. Res. Assoc. Rep. Reference L/T 229, 1950.
8. Böcker H., Arch. Elektrotechn., 31, S. 166, 1937.
9. Fatechand R.R.T., Proc. IEE, C 104, p. 489, 1957.
10. Жуков А.А., ЭТФ, 35, с. 151, 1965.
11. Жуков А.А., ЭТФ, 37, с. 710, 1967.
12. Hartmann G., Gallimberti I. J. Phys. D: Appl. Phys., 8, p. 670, 1975.
13. Лёб Л., основные процессы электрических разрядов в газах. М., 1950.
14. Pim J.A., Proc. IEE, 96, p. 117, 1949.

ON THE MECHANISM OF ELECTRIC BREAKDOWN IN THE REGION OF THE FIRST CRITICAL FREQUENCY

A. A. Zhukov

S u m m a r y

An attempt is made to specify the mechanism of electric breakdown in the region of the first critical frequency. To explain the decrease of the breakdown voltage, the following secondary processes on the virtual cathode are taken into account : 1) emission of electrons by the neutralisation of metastable excited positive ions, 2) emission of electrons by the uv light quanta irradiated by metastable ions or atoms of gas. The breakdown criterion is presented for the region of the first critical frequency, which is in satisfactory agreement with the experimental data of other investigators.

ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРА ПОДВИЖНОСТИ ЛЕГКИХ АЭРОИОНОВ ОТ ИХ ВОЗРАСТА

Х.Р. Ихер, Я.И. Сальм

Исследование спектра подвижности легких аэроионов в различных физических и химических условиях с помощью спектрометра высокой разрешающей способности может дать дополнительную информацию о природе этих ионов в тропосфере. В настоящей работе в обычном лабораторном воздухе сняты спектры отрицательных и положительных легких аэроионов, возраст τ которых можно варьировать в пределах от 0,2 до 1,2 с. Ионизацию осуществляли либо коронным ионизатором (напряжение 1,85 кВ; сила тока $3 \cdot 10^{-8}$ А), либо источником альфа-излучения.

Спектрометр аэроионов аналогичен описанному в литературе [1], однако он усовершенствован с целью повышения разрешающей способности по опубликованным соображениям [2]. Таким образом, увеличением напряжения, расхода воздуха и размеров, а также оптимальной конструкцией разрешающая способность заметно повышена. Измерительный конденсатор вместе с электрофильтром в реальных пропорциях показаны на рис.1.

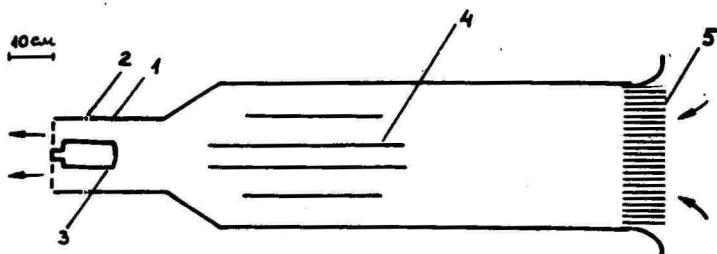


Рис. 1. Устройство измерительного конденсатора с электрофильтром.

Внешняя обкладка измерительного конденсатора I имеет радиус 80 мм. В качестве собирающей обкладки 2 используется хорошо изолированная узкая кольцеобразная секция внешней об-

кладки. Действующая емкость измерительного конденсатора 4,0 пФ. На внутреннюю обкладку 3 подается экспоненциально убывающее напряжение с начальным значением 2030 В. Расход воздуха 85 л/с. В цикле измерения предельная подвижность изменяется в течение 64 с от 0,9 до 4,6 см²/(В·с). Аэроионы беспрепятственно проходят только через заземленную внутреннюю трубу 4 электрофильтра, а вылавливаются из окружающей кольцевой зоны (с предельной подвижностью 0,4 см²/(В·с)). Таким образом реализован дифференциальный аспирационный спектрометр второго порядка.

Сигнал с собирающей обкладки усиливается электрометром и регистрируется двухкоординатным самопишущим прибором ENDIM 2200/I (ГДР) в виде спектральной функции проводимости от подвижности в логарифмической шкале.

Для подавления турбулентности и действия внешних возмущений воздуха полезным оказалось размещение хонейкомба 5 на входе в электрофильтр. Хонейкомб был изготовлен из медной фольги толщиной 0,1 мм в виде шестигранных трубок, с площадью сечения 150 мм² и длиной 85 мм. Для иллюстрации влияния хонейкомба на разрешающую способность спектрометра на рис. 2 приведены спектры отрицательных легких ионов без

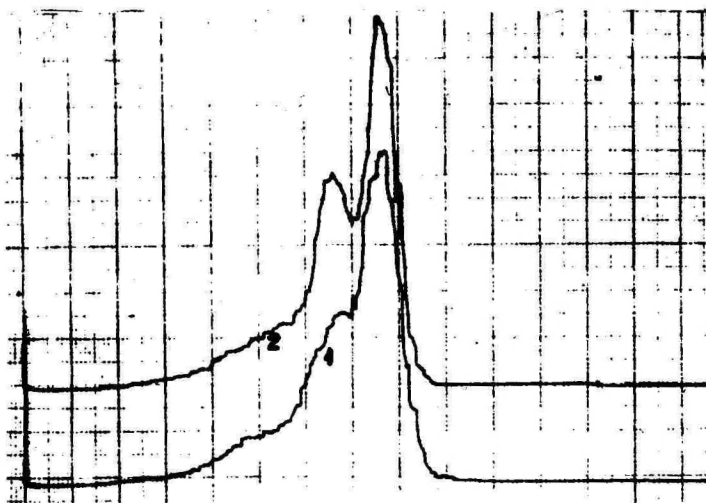


Рис. 2. Влияние хонейкомба на разрешающую способность спектрометра.

хoneyкомба (1) и с хoneyкомбом (2) при $\tau = 0,6$ с. Для лучшего различения спектры сдвинуты по вертикали.

Возраст аэроионов изменяли перемещением ионизатора вдоль оси электрофильтра. При самых малых возрастах ионизатор был расположен внутри трубы 4, при самых больших - вне электрофильтра (перед хoneyкомбом). В случае коронного ионизатора возраст был определен непосредственно подачей импульса высокого напряжения на коронный ионизатор и регистрацией сигнала электрометра быстрого действия с помощью самопишущим прибором Н327/3, а в случае альфа-ионизатора расчетом, исходя из скорости потока воздуха.

Типичные результаты представлены на рис. 3...5. Кривые минимально сглажены по сравнению с рис. 2.

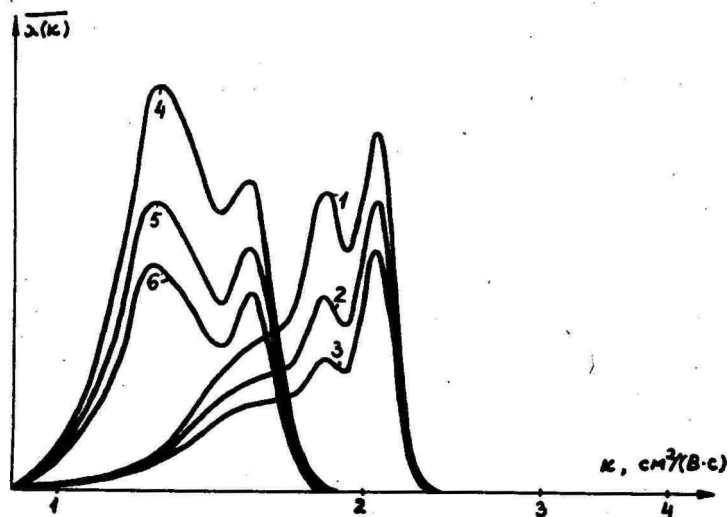


Рис. 3. Зависимость спектра подвижности отрицательных (кривые 1, 2, 3) и положительных (кривые 4, 5, 6) ионов от их возраста τ . Коронный ионизатор, температура, давление и относительная влажность воздуха соответственно $t = 27^{\circ}\text{C}$, $p = 1024$ гПа, $\varphi = 51\%$. Кривые 1, 4 - $\tau = 0,38$ с, кривые 2, 5 - $\tau = 0,47$ с, кривые 3, 6 - $\tau = 0,55$ с.

Как видно, нет значительной разницы между спектрами подвижности аэроионов, созданных коронным разрядом и альфа-излучением.

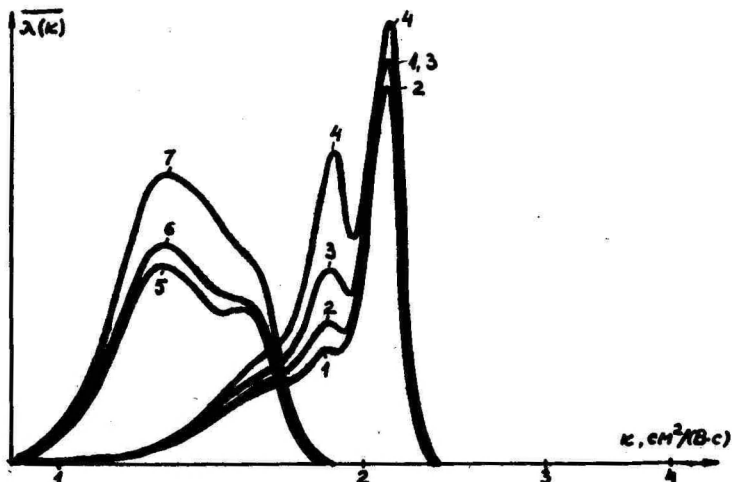


Рис. 4. Зависимость спектра подвижности отрицательных (кривые 1, 2, 3, 4) и положительных (кривые 5, 6, 7) ионов от их возраста τ . Альфа-ионизатор, $t = 27^{\circ}\text{C}$, $p = 1024$ гПа, $\tau = 51\%$. Кривые 1, 5 - $\tau = 0,49$ с, кривая 2 - $\tau = 0,38$ с, кривая 3 - $\tau = 0,28$ с, кривая 4, 7 - $\tau = 0,17$ с, кривая 6 - $\tau = 0,33$ с.

Вид спектра положительных ионов в большинстве случаев существенно не зависел от возраста ионов. От расстояния ионизатора зависит, разумеется, суммарная концентрация ионов.

В спектре отрицательных ионов в общем можно выделить три пика, из которых самый низкий (условно - третий) имеет наименьшую подвижность. Два относительно высоких пика (при большей подвижности) сильно зависят от возраста ионов, причем с увеличением возраста убывает высота менее подвижного (второго) и растет относительная высота наиболее подвижного (первого) пика (например, рис. 5).

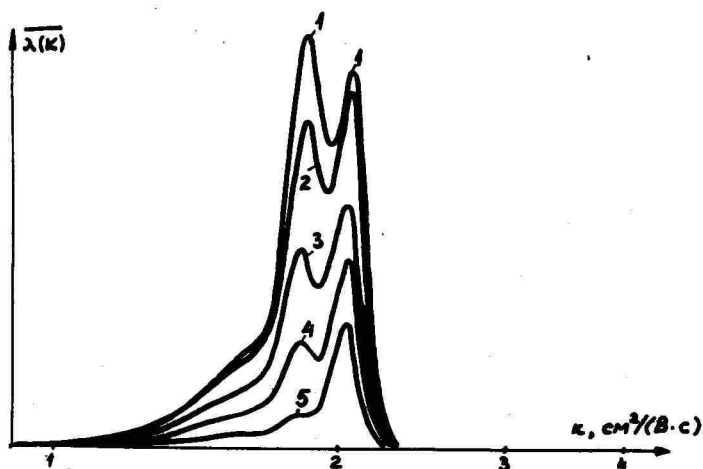


Рис. 5. Зависимость спектра подвижности отрицательных ионов от их возраста τ . Коронный ионизатор, $t = 21^{\circ}\text{C}$, $p = 1002$ гПа, $\varphi = 84\%$. Кривая 1 - $\tau = 0,37$ с; 2 - $\tau = 0,41$ с; 3 - $\tau = 0,6$ с; 4 - $\tau = 0,8$ с; 5 - $\tau = 1,2$ с.

Качественно такие же закономерности получены нами во всех опытах (число которых около 25), проведенных летом и ранней осенью 1980 г. Температура, давление и относительная влажность находились в пределах $16...27^{\circ}\text{C}$, $985...1024$ гПа, $47...84\%$. Существенной зависимости спектра от последних величин не наблюдалось. Вид спектра все же в какой-то мере оказался непостоянным, что, вероятно, зависит от неконтролируемых микропримесей в воздухе.

На данном этапе работы затруднительно объяснить поведение спектра отрицательных ионов. Можно предполагать, что при малом возрасте подвижность (второго пика) определяется соединением, имеющимся в атмосфере в большой концентрации (быстро реагирует), например, кислородом, а с увеличением возраста начинают влиять примеси, которые в атмосфере в малой концентрации, но зато имеют большее сродство к электрону, например, окиси азота.

До сих пор проведено немного исследований спектра легких ионов в зависимости от возраста в указанном диапазоне. В работе Томсона и Ирибарна возраст ионов, полученных испарением заряженных капель, варьировал ориентировочно от 0,04 до 0,4 с [3]. Спектр отрицательных ионов, измеренный времяпролетным спектрометром, имеет сходство с нашими результатами в том смысле, что имеется лишь два пика в диапазоне от 1 до 2 см²/(В·с), относительная интенсивность которых изменяется с возрастом. Упоминается стабильность спектра положительных ионов.

Курта и др. измеряли спектры подвижности ионов, созданных бета-излучением трития, используя дрейфовую трубку с ионными затворами [4]. Приведены спектры при возрастах ионов 0,05; 0,1 и 1 с. Результаты не полностью согласуются с нашими (виды спектра положительных ионов при 0,1 и 1 с значительно различаются, зависимость спектра отрицательных ионов от возраста другая, подвижности отрицательных ионов завышены), однако имеются и общие черты (примерный размах подвижностей, количество пиков в спектрах).

Брикар и др. использовали альфа-ионизатор и времяпролетный метод измерения спектра [5]. Возраст ионов изменялся от 1 до 500 мс. Спектр в виде отдельных значений подвижности указывает на постоянное исчезновение больших подвижностей и появление малых с увеличением возраста.

Таким образом, хорошего согласия между данными разных авторов по рассматриваемому явлению до сих пор нет. Внимания заслуживает стабильность закономерностей, которые мы наблюдали.

Л и т е р а т у р а

1. Таммет Х.Ф. и др. Спектр аэроионов для обнаружения некоторых примесей воздуха. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 409, Тарту, 1977, с. 84-88.
2. Сальм Я.И. О повышении разрешающей способности спектрометра легких аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 479, Тарту, 1979, с. 10-13.
3. Thomson V.A., Iribarne J.V. Positive and negative ion mobility spectra of spray-produced ions. In: Electrical Processes in Atmospheres, Steinkopff Verlag, Darmstadt, 1977, p. 18-23.

4. Huertas M.L. et al. Measurement of mobility and mass of atmospheric ions. - Aerosol Sci., 1971, 2, p. 145-150.
5. Bricard J. et al. Spectre de mobilité des petits ion de l'air. - J. rech. atmosph. 1970, 4, n. 3, p. 107-113.

DEPENDENCE OF THE SMALL ION MOBILITY SPECTRUM
ON THE AGE OF IONS

H. Iher and J. Salm

S u m m a r y

Small ions in the atmosphere were produced by corona discharges or by α -rays. The mobility spectra of ions in laboratory air were measured by an aspiration spectrometer with an increased resolving power. The age of air-ions was changed from 0.2 s to 1.2 s by moving the ionizer along the axis of the spectrometer. The shape of the mobility spectrum of positive air-ions did not change essentially. The spectrum of negative air-ions had two dominant peaks. In the case of a shorter age the peak of ions with a smaller mobility was relatively higher than in the case of ions with a greater mobility. For ions with a longer age the reverse was the case.

М.У. Арольд, Р.Л. Матизен, М.А. Рейварт, Я.Р. Ээвель

Необходимость в проведении фоновых атмосферно-электрических измерений связана со все растущим антропогенным аэрозольным загрязнением атмосферы, накоплением в атмосфере радиоактивных выбросов атомных электростанций - криптона-85 [1].

Атмосферно-электрические наблюдения в густонаселенных районах дают информацию о локальных источниках загрязнения. Возможности интерпретации этой информации весьма ограничены. Фоновые данные об атмосферном электричестве в удалении от локальных источников загрязнений обычно отсутствуют. Выбранное авторами место для фоновых наблюдений, остров Вилсанди, является самым западным населенным островом Монзундского архипелага. Этот остров расположен в 6 км западнее острова Сааремаа, малонаселен (постоянное население составляет около 20 человек), общая площадь порядка 10 км². На острове работают маяк и метеостанция, ряд метеонаблюдений которой превышает 100 лет. Остров обеспечивается электроэнергией через высоковольтную воздушную линию. Обсуждается вопрос о переводе всех хозяйств острова на электрическое отопление. Весь остров вместе с прилегающими островами, общая численность которых около ста, входят в состав Вилсандиского заповедника, который был основан на базе орнитологического заповедника "Вайкаские острова" и является старейшим заповедником Советского Союза, которому в 1980 году исполнилось 70 лет [2].

С запада и севера на о. Вилсанди поступают морские воздушные массы. Воздушные массы с восточных направлений идут через острова Муху и Сааремаа с материковой части Эстонии.

Промышленность западной Эстонии и особенно островов из-за природных и социально-экономических условий малоразвита. Все это дает основания предполагать, что о. Вилсанди и в настоящее время, и в будущем будет одним из подходящих мест для проведения фоновых атмосферно-электрических наблю-

дений, характеризующих северо-западный район СССР [3, 4].

На основании накопленного опыта при проведении атмосферно-электрических измерений в полевых условиях для получения достоверной и неискаженной информации необходим специальный павильон для размещения аппаратуры. Это вызвано тем, что во многих приборах для атмосферно-электрических измерений используются чувствительные к влажности электрометрические устройства и надежность аппаратуры гарантируется только при условии соответствия микроклимата лабораторным условиям.

С другой стороны, исследуемый воздух, проходящий через измерительные тракты самих приборов, не должен быть подвергнут воздействиям, изменяющим его электрические характеристики.

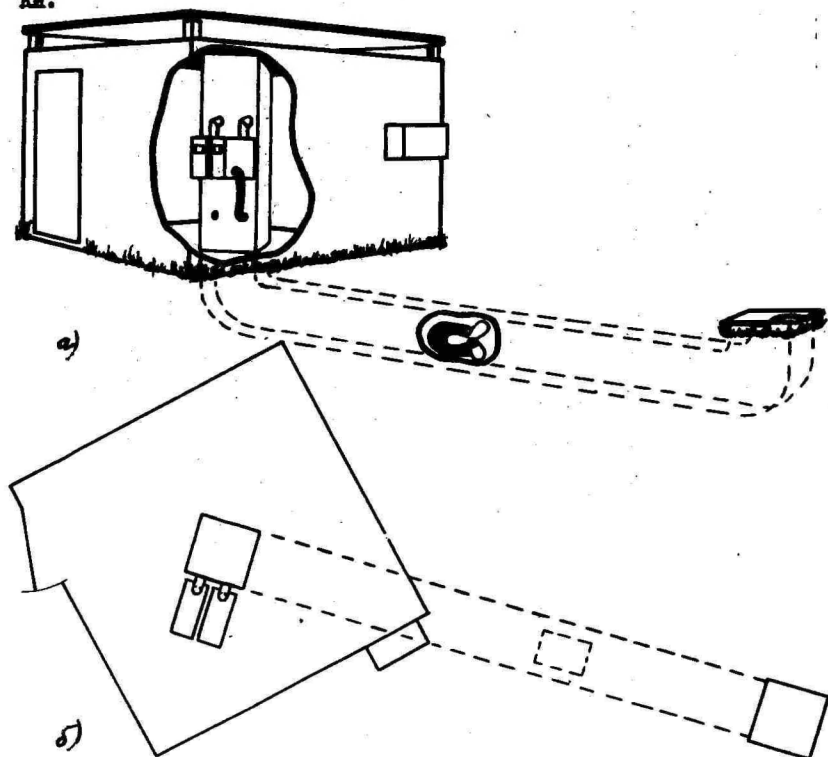


Рис. 1. Павильон для атмосферно-электрических наблюдений

а - общий вид; б - вид сверху.

На рис. 1а приведен общий вид, а на рис. 1б вид сверху специального измерительного павильона (конструкция предложена Х.Ф. Тамметом). Павильон построен из листового алюминия на деревянном каркасе. Заземленная поверхность павильона исключает искажающее влияние электрического поля поверхностных зарядов на электрическое состояние исследуемого воздуха. Размеры павильона 2,5х2,5 м. Центр промежутка шириной 0,2 м между двумя крышами, служащего для забора исследуемого воздуха, находится в соответствии с международным метеорологическим стандартом на высоте 2 м от поверхности земли. В центре павильона установлен вертикальный воздушный канал сечением 0,5 х 0,5 м, верхний конец которого соединен через нижнюю крышу с промежутком между крышами. Нижний конец вертикального канала соединен с подземным горизонтальным каналом, в котором находится вентилятор, создающий принудительное течение воздуха со скоростью около 2,5 м/с.

Выход из горизонтального воздушного канала находится на подветренной стороне относительно преобладающего направления ветра на расстоянии 5 м от стены павильона и имеет воздухо-рассеивающий экран.

Для более эффективного использования внутripавильонного пространства стенки вертикального канала повернуты вокруг вертикальной оси на 45° относительно стен павильона (расстояние от стен павильона до циферблатов приборов наибольшее). Сами приборы размещены на полках, не показанных на рисунках.

Забор воздуха в измерительные конденсаторы приборов осуществляется в зависимости от конструкции либо через входные патрубки, расположенные в верхней части приборов, либо непосредственно через отверстие в стенке вертикального воздушного канала (см. рис. 1). Выход измеренного воздуха из приборов происходит через гибкие гофрированные шланги в нижнюю часть вертикального канала. Это, с одной стороны, исключает попадание воздуха извне в павильон и нарушение его микроклимата. С другой стороны, что еще важнее, соединение входа и выхода воздушных трактов измерительных приборов с воздушным каналом павильона позволяет избежать изменения расхода воздуха через измерительные конденсаторы счетчиков аэроионов из-за разности давлений на входе и выходе их воздушных трактов (статическое давление в воздушном канале меньше, чем в павильоне). Для уменьшения относительной влажности в павильоне используется бытовой кондиционер БК-1500.

В холодную погоду кондиционер находится целиком в павильоне, а в теплую кондиционер частично выдвинут из павильона (на рис. 1а прямоугольный выступ на правой стене павильона) и нагретый воздух выбрасывается наружу. Вывод скопированной влаги из кондиционера производится в обоих случаях за пределы павильона через специальный шланг.

Специальный эксперимент был поставлен для изучения искажающего влияния павильона на получаемые данные. В пределах погрешностей измерительных приборов результаты измерений, проведенных в павильоне и приблизительно в 250 м от павильона с наветренной стороны, совпадают. С помощью непосредственных измерений установлено также, что искажающее влияние на результаты измерений из-за возможного попадания воздуха с выхода воздушного канала повторно в измерительный тракт отсутствует.

Комплекс аппаратуры, использованный на о. Вилсанди, состоял из аспирационного счетчика положительных и отрицательных легких аэроионов и четырех аспирационных счетчиков положительных и отрицательных легких и тяжелых аэроионов типа УТ-7003. Из них два счетчика находились в резерве. Кроме того, были приборы для измерения метеорологических параметров: скорости и направления ветра, температуры и влажности. Для регистрации показаний приборов служила подвергнутая некоторым переделкам информационно-измерительная система К-200, записывающая данные на перфоленту с интервалом в 5 минут для дальнейшей обработки на ЭВМ.

Измерительный павильон установлен в середине ровного поля с размерами 300x1000 м. К северу от павильона на расстоянии около 250, 500 и 700 м расположены хутора. Период измерений на Вилсанди в 1979 году длился с 1 июля по 31 августа.

На рис. 2 представлена круговая диаграмма распределения направлений ветра в период измерений по странам света. Цифрами указана продолжительность направлений ветра в часах.

На рис. 3 приведены круговые диаграммы зависимости условной концентрации легких положительных аэроионов n_+ ($n_+ = 2 \text{ см}^{-3} \text{ В}^{-1} \text{ С}^{-1}$) от направления ветра для разных выборок из массива экспериментальных данных. (Легкими обычно называются аэроионы с подвижностью $k \geq 0,5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ С}^{-1}$). Цифры у кривых показывают суммарную длительность измерений в часах. Времена измерений для разных выборок частично перекрываются. В случае однотипной погоды совпадение кривых было бы выше.

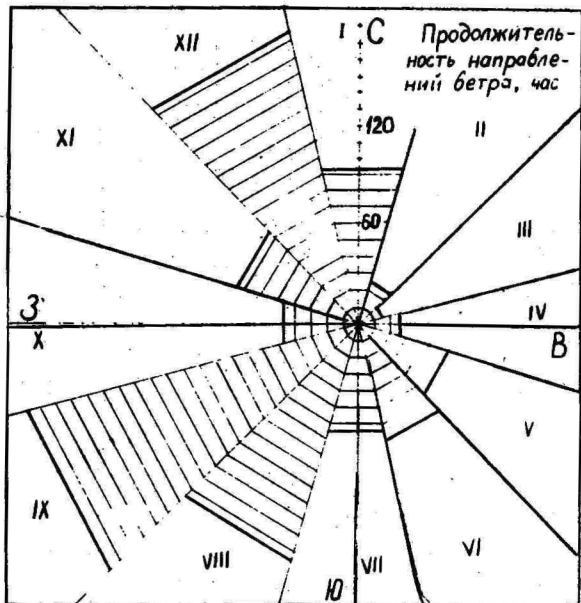


Рис. 2. Суммарное распределение направления и скорости ветра по странам света.

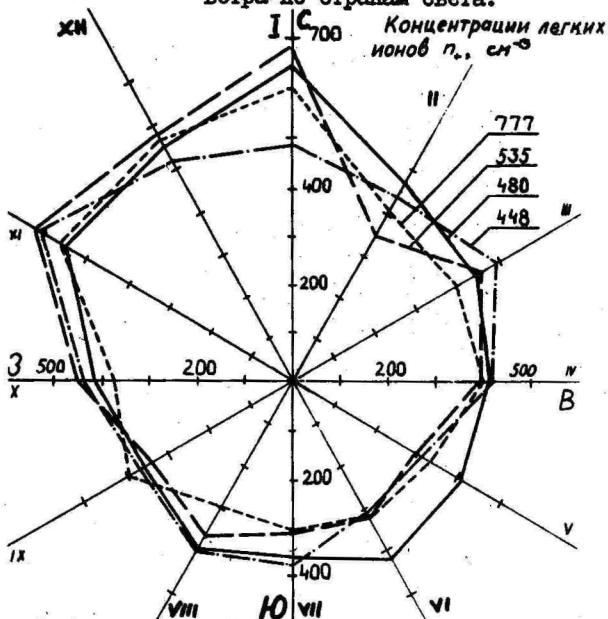


Рис. 3. Зависимость концентрации легких положительных аэроионов от направления ветра.

На рис. 4 приведена круговая диаграмма зависимости отношения концентраций легких n и тяжелых N ($n_0 = 10^{-3} \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$) аэрозолей от направления ветра, которая характеризует аэрозольное загрязнение воздуха. Наиболее загрязнен воздух, идущий с северо-запада (прямое расстояние до Стокгольма 220 км). Поскольку авторы собираются произвести измерения в другой точке, расположенной примерно в 600 м западнее, то новые измерения должны объяснить полученные результаты и обеспечить возможность идентифицировать локальные источники загрязнений. Перевод всех хозяйств острова на электроотопление позволил бы значительно снизить локальное антропогенное загрязнение.

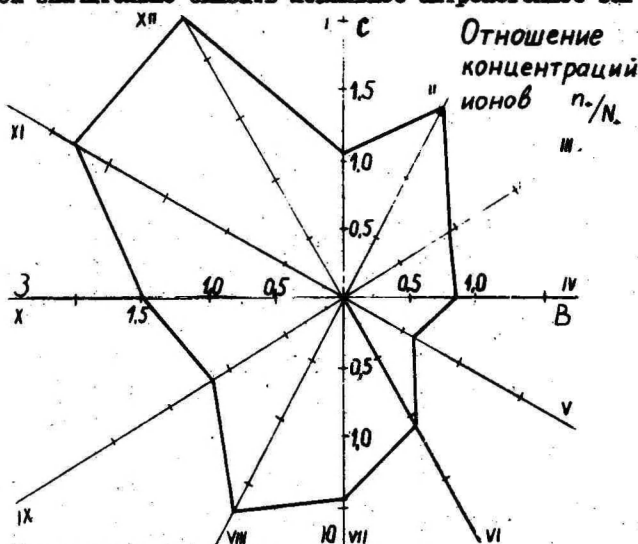


Рис. 4. Зависимость отношения n/N от направления ветра.

В табл. I представлены усредненные медианные среднечасовые результаты измерений.

Концентрации тяжелых аэрозолей по техническим причинам измерены при относительно высокой предельной подвижности. Если нижний предел подвижности тяжелых аэрозолей считать равным $0,0005 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, то соответствующие концентрации в два раза превышали бы приведенные в табл. I результаты измерения. В табл. 2 дана специальная матрица корреляции. Числа 95, 99 и 99,9 указывают в процентах достоверность опровержения гипотезы о независимости соответствующих величин. Знак " - " означает отрицательную корреляцию. Достоверность ниже 95% заменена символом x .

Таблица 2

Специальная матрица корреляции

Величина	I	2	3	4	5	6	7	8	9	
Время	1									
Температура воздуха	2	99,9								
Градиент температуры	3	99,9	99,9							
Влажность воздуха	4	-99,9	-99,9	-99,9						
Направление ветра	5	95	-99,9	99,9	-99,9					
Скорость ветра	6	x	-99,9	-95	-99,9	99				
n ₊	7	95	-99,9	99,9	-99,9	99,9	-99,9			
n ₋	8	x	-99,9	x	95	99,9	-99	99,9		
N ₋	9	x	99,9	x	x	-99,9	x	-99,9	-99,9	
N ₊	10	-99,9	99	-99,9	x	-99,9	x	-99,9	-99,9	99,9

Таблица I

Медианные среднечасовые результаты измерений

Величина	Среднее значение	Стандартное отклонение	Объем данных
Температура воздуха, °C	15,8	1,8	1010
Градиент температуры, К/м	1,3	2,5	1009
Влажность воздуха, %	81,4	9,7	1010
Скорость ветра, м/с	5,5	2,8	1009
Концентрация аэрозонов, см ⁻³			
n_+ ($k_0 = 2 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$)	427	184	941
n_- ($k_0 = 2 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$)	377	158	687
N_+ ($k_0 = 0,001 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$)	308	200	584
N_- ($k_0 = 0,001 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$)	241	176	714

Как средние концентрации аэрозонов, так и корреляционные связи характерны для местности, не подвергнутой локальным антропогенным воздействиям. Это говорит в пользу предположения авторов о том, что остров Вилсанди подходит для региональных фоновых атмосферно-электрических наблюдений.

Л и т е р а т у р а

1. Смирнов В.В. Атмосферные ионы. Труды ИЭМ, вып. 24, М., 1980, с. 3-28.
2. Looduskaitse. Koostas E. Kumari, Tallinn, "Valgus", 1973, 835 lk. (на эст. яз.).
3. Arold M., Zaitsev A., Monitoring ja õhuelekter. Eesti Loodus, nr. 5, 1978, lk. 310-313 (на эст. яз.).
4. Arold M. Vilsandi teadusesaareks. Eesti Loodus, nr. 5, 1979, lk. 288-289 (на эст. яз.).

ABOUT THE OBSERVATIONS OF THE PHENOMENA OF
ATMOSPHERIC ELECTRICITY ON VILSANDI ISLAND

M. Arold, R. Matisen, M. Reinart and J. Öövel

S u m m a r y

The paper presents justification for the selection of Vilsandi Island for a seat of long-term background observations. The design of the pavilion for the measurement of atmospheric electricity is described. Data are presented on the measurements carried out in the summer period of 1979 and their interpretation is offered.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СПЕКТРОМЕТРА ЛЕГКИХ ИОНОВ

Р.М. Тутаев

В последнее время уделяется большое внимание изучению спектра подвижностей легких ионов в зависимости от микропримесей воздуха с помощью аспирационного метода [1, 2]. Также в ряде работ [3-5] развивается метод обнаружения микропримесей с помощью плазменного хроматографа, основу которого составляет спектрометр легких ионов, обычно называемый дрейфовой трубкой [6], или ионно-дрейфовым спектрометром.

Исследовать ионно-дрейфовый спектрометр можно различными способами, но наиболее точным и экономичным является способ математического моделирования. После того, как сформулировано математическое описание (модель) системы любого рода, в наших руках оказывается хороший инструмент для исследования разнообразных процессов, которые могут происходить в этой системе, а также для конструирования самой системы.

Именно поэтому в книгах [6, 7] большое внимание уделено математическому описанию процессов в ионно-дрейфовых спектрометрах. В [6] наряду с обширной библиографией по данному вопросу приведен пример построения математической модели и анализа пространственно-временной эволюции сгустка ионов, участвующих в диффузии и в реакциях с молекулами во время дрейфа. Модель построена в предположении, что можно пренебречь полем пространственного заряда и взаимным расталкиванием ионов. Подобные предположения справедливы лишь при малых концентрациях ионов, в случае же достаточно больших концентраций модель может оказаться некорректной.

В работе [8] сделана попытка учесть взаимное расталкивание ионов вдоль оси дрейфа и его влияния на уширение ионного пика на выходе ионно-дрейфового спектрометра. Хотя в данной работе авторы и не пренебрегли влиянием взаимного расталкивания ионов, эти результаты можно использовать только для предварительных расчетов.

В [7] описан анализ влияния пространственного заряда на расходимость потока электронов. Математическая модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, для решения которой был разработан

метод приближенного анализа. Использование его в практических целях является весьма сложным и трудоемким. Также необходимо отметить, что эта модель позволяет оценить ушрение "облака" заряженных частиц только в поперечном направлении.

Основная трудность, сдерживавшая создание моделей, более точно описывающих процессы в дрейфовых трубках, заключалась в сложности, а подчас и невозможности анализа подобных математических моделей. В настоящее время, в связи с разработкой теоретических методов и повышением быстродействия вычислительных машин, появилась возможность анализировать математические модели достаточной сложности численными методами.

Рассмотрим основные предпосылки и уравнения модели, описывающей процессы, происходящие в ионно-дрейфовом спектрометре. Ограничим задачу следующими предположениями: 1) электрическое поле не настолько сильно, чтобы заметно нарушить состояние термодинамического равновесия ионов с молекулами газа; 2) давление газа таково, что средняя длина свободного пробега ионов много меньше характерных размеров установки; 3) ионы поступают в спектрометр только извне, имеют одинаковый знак и являются только однозарядными; 4) дрейф ионов происходит под действием внешнего постоянного и однородного электрического поля; 5) во время дрейфа ионы участвуют в диффузии и ион-ионных взаимодействиях (взаимном расталкивании); 6) на электродах не происходит ни эмиссии, ни отражения - ионы исчезают на поверхности электродов.

Количество ионов, протекающих в единицу времени через единичную площадку, будет состоять из суммы потока от градиента потенциала и потока от градиента концентрации:

$$\vec{J} = -(nk \text{ grad } \varphi + D \text{ grad } n), \quad (1)$$

где \vec{J} - поток, n - концентрация, k - подвижность ионов, D - коэффициент диффузии и φ - потенциал. Если учесть потери данного сорта ионов за счет химических реакций с константой скорости α , то уравнение неразрывности для потока ионов можно записать в виде:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div } \vec{J} + \alpha n = 0 \quad (2)$$

Для учета влияния объемного заряда уравнения (1) и (2) необходимо дополнить уравнением Пуассона

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = -\frac{e}{\varepsilon_0} n, \quad (3)$$

где e - элементарный заряд, ε_0 - электрическая постоянная. Подставив уравнения (1) и (3) в (2), получим:

$$\frac{\partial n}{\partial t} - D \operatorname{div} \operatorname{grad} n - k \operatorname{grad} n \cdot \operatorname{grad} \varphi + k \frac{e}{\varepsilon_0} n^2 + \alpha n = 0, \quad (4)$$

квазилинейное уравнение параболического типа.

Математической моделью является система уравнений, описывающих изучаемые процессы переноса (основные уравнения), и уравнений, описывающих краевые и начальные условия. То есть уравнения (3) и (4) необходимо дополнить начальными и краевыми условиями. Так как ионно-дрейфовый спектрометр имеет цилиндрическую симметрию, то для удобства расчетов естественно перейти к цилиндрическим координатам с осью z , совпадающей с осью симметрии устройства и началом в плоскости входа ионов в дрейфовое пространство.

Будем рассматривать первую краевую задачу для уравнения (4) в области $P = (0 < \rho < R, 0 < z < H, 0 < t \leq T)$, а для уравнения (3) в области $Q = (0 < \rho < R, 0 < z < H)$, где R - радиус дрейфовой трубки, H - длина дрейфового промежутка, T - максимальное время наблюдения. Тогда математическую модель можно сформулировать следующим образом: требуется найти непрерывное в P решение $n = n(\rho, z, t)$ уравнения

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} - D \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial n}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} \right] - \\ - k \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \frac{\partial n}{\partial \rho} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial n}{\partial z} \right) + k \frac{e}{\varepsilon_0} n^2 + \alpha n = 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 < \rho < R, \quad 0 < z < H, \quad 0 < t \leq T, \\ n(\rho, z, 0) = n_0(\rho, z), \quad \text{при } 0 < \rho < R, \quad 0 < z < H, \\ n(\rho, 0, t) = n_1(\rho, t), \quad \text{при } 0 < t < \tau, \\ n(\rho, 0, t) = n_1'(\rho, t), \quad \text{при } t > \tau, \\ n(\rho, H, t) = n_2(\rho, t), \\ n(R, z, t) = n_3(z, t), \quad \text{при } 0 < t \leq T, \end{aligned} \right\}$$

где φ - непрерывное в Q решение следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} &= -\frac{e}{\varepsilon_0} n, \\ 0 < \rho < R, \quad 0 < z < H, \\ \varphi(\rho, 0) &= \varphi_1(\rho), \\ \varphi(\rho, H) &= \varphi_2(\rho), \\ \varphi(R, z) &= \varphi_3(z). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь $n_0(\rho, z)$ - начальное условие, $n_1(\rho, t)$ - граничные условия в плоскости входа ионов в дрейфовую трубку, τ - время, в течение которого ионы поступают в дрейфовую область, $n_1'(\rho, t)$ - граничные условия в плоскости входа в оставшееся время наблюдения, $n_2(\rho, t)$ и $n_3(z, t)$ - граничные условия в плоскости регистрации ионов и на границе цилиндрических электродов соответственно, а $\varphi_1(\rho)$, $\varphi_2(\rho)$ и $\varphi_3(\rho)$ - граничные условия для потенциала на поверхностях дрейфовой трубки.

Для решения подобной задачи фактически единственным возможным методом является численный метод. В отличие от аналитических методов, где зачастую для каждой задачи разрабатываются свои самостоятельные приемы решения, численные методы отличаются большой универсальностью и применимы для исследования широкого класса задач. К численным методам относят прежде всего метод конечных разностей [9], который и положен в основу решения данной задачи.

Метод конечных разностей состоит в том, что область непрерывного изменения аргументов заменяется конечным (дискретным) множеством точек (узлов), называемых сеткой. Вместо функций непрерывного аргумента рассматриваются функции дискретного аргумента, определяемые в узлах сетки. Производные, входящие в дифференциальные уравнения, аппроксимируются с помощью соответствующих разностных соотношений. Начальное и граничные условия тоже заменяются разностными для сеточных функций.

Тогда для решения уравнений (5) и (6) можно предложить следующую схему. Составляются разностные задачи для каждого из этих уравнений. Так как уравнение (5) теперь является дискретным во времени, то уравнение (6) решается на каждом шаге по времени и полученные значения подставляются в уравнение (5). То есть при заданных значениях концентрации n

из уравнения Пуассона находится функция $\varphi = \varphi(\rho, z)$. Затем, предполагая, что функция φ не меняется в течение шага по времени, из уравнения (5) находится значение концентрации $n = n(\rho, z, t)$ в следующий момент времени (на верхнем слое), и процесс вычисления повторяется до достижения времени T .

Поставим в соответствие задачам (5) и (6) разностную задачу. Для этого воспользуемся методом баланса [9]. Введем обозначение

$$f(n) = k \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} n^2 + \alpha n \quad (7)$$

и рассмотрим параболическое уравнение

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial n}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} \right] + k \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \frac{\partial n}{\partial \rho} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial n}{\partial z} \right) - f(n). \quad (8)$$

Выберем в области $[0 \leq \rho \leq R, 0 \leq z \leq H]$ равномерную сетку

$$\bar{\omega} = \{ \rho_j = (j-0,5)h_\rho, j=1,2,\dots,N_1+1, z_i = ih_z, i=0,1,\dots,N_2 \}$$

с шагом по осям h_ρ и h_z (рис.). Напишем уравнение баланса частиц для элементарного объема

$$\begin{aligned} & [(j-1)h_\rho \leq \rho \leq jh_\rho, (i-0,5)h_z \leq z \leq (i+0,5)h_z, t \leq \bar{t} \leq \hat{t}]: \\ & \int\limits_g (\hat{n}-n) \rho d\rho dz = \int\limits_{t \in C}^{\hat{t}} (W_\rho dz + W_z \rho d\rho) dt + \int\limits_{t \in g}^{\hat{t}} \int\limits_g f(n) \rho d\rho dz dt, \end{aligned} \quad (9)$$

где $g = [(j-1)h_\rho \leq \rho \leq jh_\rho, (i-0,5)h_z \leq z \leq (i+0,5)h_z]$ - прямоугольник, а C - его граница; \hat{n} - значение концентрации на верхнем слое; $\bar{t} = t + h_t$, $\hat{t} = \bar{t} + h_t$, где h_t - шаг по времени.

Поток W_ρ в направлении оси ρ есть сумма двух потоков: \bar{W}_ρ - диффузионного и \tilde{W}_ρ - от взаимного расталкивания. Аналогично и в направлении оси z - \bar{W}_z и \tilde{W}_z .

Чтобы получить разностное уравнение, заменим интегралы и W разностными выражениями. Возьмем простейшую аппроксимацию (для оси ρ : $n = const = n^j$; для оси z : $n = const = n_i$ в g):

$$\int\limits_g (\hat{n}-n) \rho d\rho dz = (\hat{n}_i^j - n_i^j) \rho^{j-\frac{1}{2}} h_\rho h_z, \quad (10)$$

$$\int_t^t \int_g^g f(n) \varrho d\varrho dz dt = \psi(n_i^j) \varrho^{j-\frac{1}{2}} h_\varrho h_z h_t. \quad (\text{II})$$

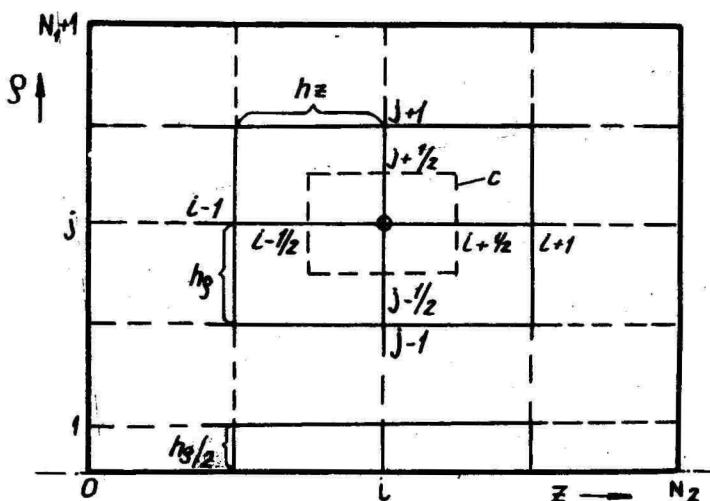


Рис. Сетка, на которой аппроксимируются дифференциальные уравнения.

Выражение для диффузионного потока частиц по оси g имеет вид $\bar{W}_g = -D\varrho \partial n / \partial g$, а поток от взаимного расталкивания — $\bar{W}_g = -kn\varrho \partial \varphi / \partial g$. Для оси z : $\bar{W} = -D \partial n / \partial z$, $\bar{W}_z = -kn \partial \varphi / \partial z$.

Принтегрируем выражения для потоков в предположении, что $W_g = \text{const}$ при $(j - 1,5)h_g \leq g \leq (j - 0,5)h_g$, а $W_z = \text{const}$ при $(i - 1)h_z \leq z \leq ih_z$:

$$n_i^{j-1} - n_i^j = \int_{\varrho^{j-1,5}}^{\varrho^{j-0,5}} \frac{\bar{W}_g}{D\varrho} d\varrho = \frac{\bar{W}_i^{j-\frac{1}{2}}}{D} \frac{h_g}{\varrho^{j-1}}$$

$$\varphi_i^{j-1} - \varphi_i^j = \int_{\varrho^{j-1,5}}^{\varrho^{j-0,5}} \frac{\bar{W}_g}{kn\varrho} d\varrho = \frac{\bar{W}_i^{j-\frac{1}{2}}}{k} \frac{h_g}{\varrho^{j-1} n_i^{j-\frac{1}{2}}}$$

Проделив то же самое для точек $j + 1/2$ и соответственно по оси z , получим значения потоков на границе C области g :

$$\begin{aligned}
\bar{W}_i^{j-\frac{1}{2}} &= -D g^{j-1} \frac{n_i^{j-1} - n_i^{j-2}}{h_g}, & \tilde{W}_i^{j-\frac{1}{2}} &= -k g^{j-1} n_i^{j-\frac{1}{2}} \frac{\varphi_i^j - \varphi_i^{j-1}}{h_g}, \\
\bar{W}_{i-\frac{1}{2}}^j &= -D \frac{n_i^j - n_{i-1}^{j-1}}{h_z}, & \tilde{W}_{i-\frac{1}{2}}^j &= -k n_{i-\frac{1}{2}}^j \frac{\varphi_i^j - \varphi_{i-1}^j}{h_z}, \\
\bar{W}_i^{j+\frac{1}{2}} &= -D g^j \frac{n_i^{j+1} - n_i^j}{h_g}, & \tilde{W}_i^{j+\frac{1}{2}} &= -k g^j n_i^{j+\frac{1}{2}} \frac{\varphi_i^{j+1} - \varphi_i^j}{h_g}, \\
\bar{W}_{i+\frac{1}{2}}^j &= -D \frac{n_i^{j+1} - n_i^j}{h_z}, & \tilde{W}_{i+\frac{1}{2}}^j &= -k n_{i+\frac{1}{2}}^j \frac{\varphi_{i+1}^j - \varphi_i^j}{h_z}.
\end{aligned} \tag{I2}$$

Аппроксимируем интеграл от потоков следующим образом:

$$\begin{aligned}
&\int_{t^0}^{\hat{t}} \int_{z^0}^{\hat{z}} (W_g dz + W_z g dg) dt = \\
&= \int_{t^0}^{\hat{t}} \int_{g^{j-1}}^{g^j} (\bar{W}_z + \tilde{W}_z) g dg dt + \int_{z_{i-\frac{1}{2}}}^{\hat{z}_{i+\frac{1}{2}}} (\bar{W}_g + \tilde{W}_g) dz dt = \\
&= (\bar{W}_i^{j-\frac{1}{2}} - \bar{W}_i^{j+\frac{1}{2}} + \tilde{W}_i^{j-\frac{1}{2}} - \tilde{W}_i^{j+\frac{1}{2}}) h_z h_t + \\
&+ (\bar{W}_{i-\frac{1}{2}}^j - \bar{W}_{i+\frac{1}{2}}^j + \tilde{W}_{i-\frac{1}{2}}^j - \tilde{W}_{i+\frac{1}{2}}^j) g^{j-\frac{1}{2}} h_g h_t.
\end{aligned} \tag{I3}$$

Подставляя (I2) в (I3) и затем (I0), (II) и (I3) в (9), получим разностное уравнение для внутренних точек области изменения аргумента *.

$$\begin{aligned}
n_t &= \frac{1}{g^{j-\frac{1}{2}}} \left[D(g^{j-1} n_g)_g + k(g^{j-1} n^{j-\frac{1}{2}} \varphi_g)_g \right] + \\
&+ D n_{\bar{z}z} + k(n_{i-\frac{1}{2}} \varphi_z)_z - \psi(n).
\end{aligned} \tag{I4}$$

Это уравнение необходимо дополнить уравнением для границы, лежащей около оси симметрии ($j = 1$). Учитывая, что потоки через ось симметрии отсутствуют ($\bar{W}_i^{1/2} = \tilde{W}_i^{1/2} = 0$), получим

$$n_t = \frac{2}{h_g} (D n_g + k n^{1/2} \varphi_g) + D n_{\bar{z}z} + k(n_{i-\frac{1}{2}} \varphi_z)_z - \psi(n) \tag{I5}$$

* Здесь использованы обозначения, принятые в [9].

Аппроксимируя на той же самой сетке уравнение (6), получим следующее разностное уравнение

$$\frac{1}{\rho^{j-\frac{1}{2}}} (\rho^{j-1} \varphi_{\rho}^j) + \varphi_{zz} = -\frac{e}{\varepsilon_0} n \quad (16)$$

для внутренних точек изменения аргумента, и

$$\frac{2}{h_{\rho}} \varphi_{\rho} + \varphi_{zz} = -\frac{e}{\varepsilon_0} n \quad (17)$$

для граничных точек, находящихся около оси симметрии ($j = 1$).

Чтобы получить разностные схемы для уравнений (5) и (6), необходимо уравнения (14-17) дополнить соответствующими начальными и граничными разностными условиями. Необходимо отметить, что, хотя полученная схема для параболического уравнения и является консервативной, необходима проверка порядка аппроксимации, устойчивости и сходимости схемы.

Автор выражает особую признательность Комарову Н.Н. за постоянное внимание и руководство работами в данном направлении.

Л и т е р а т у р а

1. Таммет Х.Ф. Зависимость спектра подвижностей легких аэроионов от микропримесей воздуха. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 3-15.
2. Таммет Х.Ф. и др. Спектрометр аэроионов для обнаружения некоторых примесей воздуха. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 409, Тарту, 1977, с. 34-38.
3. Karasek F.W. Qualitative studies of trace conditions by plasma chromatography. - "Analytical Chemistry", 1971, v. 43, No. 11, pp. 1441-1447.
4. Keller R.A., Metro M.M. Plasma chromatography. - "Separation and Purification Methods", 1974, v. 3, No. 1, pp. 207-244.
5. Karasek F.W. Plasma chromatography. - "Analytical Chemistry", 1974, v. 46, No.8, pp. 710A-720A.
6. Мак-Даниэль И., Мэзон Э. Подвижность и диффузия ионов в газах. Пер. с англ. под ред. Б.М.Смирнова, М., Мир, 1976.
7. Хаксли Л., Кромтон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. Пер. с англ. под ред. А.А. Иванова, М., Мир, 1977.

8. Spangler G.E., Collins I. Peak shape analysis and plate theory for plasma chromatography. - "Analytical Chemistry", 1975, v. 47, No. 3, p. 403.
9. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М., Наука, 1971.

THE MATHEMATICAL MODEL OF A SMALL-ION SPECTROMETER

R. Tutayev

S u m m a r y

The report presents the motivation and description of a mathematical model of the process of transfer of small ions in an ion-drift spectrometer. The paper takes account of the processes of diffusion, mutual repulsion, loss of ions as a result of chemical reactions and distortion of the electric field by the space charge.

О СРАВНЕНИИ ПОКАЗАНИЙ СЧЕТЧИКОВ АЭРОИОНОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ПРИНЦИПАХ ЗАРЯЖЕНИЯ И РАЗРЯЖЕНИЯ

Я.Ю. Рейнет

В данной работе сравнивают результаты измерения концентрации атмосферных ионов, полученные изготовленными в Тартуском госуниверситете аспирационными счетчиками ионов, работающими на принципах заряжения и разряжения.

Атмосферные ионы имеют различную степень электрической подвижности [1, 2, 3, 4]. Для определения концентрации этих ионов можно использовать аспирационные счетчики двух типов: 1) приборы, работающие на принципе разряжения, и 2) приборы, работающие на принципе заряжения [5].

С помощью двух счетчиков, разработанных Проблемной лабораторией аэроионизации и электроаэрозолей (ПЛАЭ) Тартуского государственного университета, один из которых работал на принципе заряжения [6], а другой на принципе разряжения [7], в Тарту 9 и 10 июля 1980 года измеряли концентрации атмосферных ионов.

Местом измерения было помещение № 307 ПЛАЭ на Ленинградском шоссе, 4. Это помещение находится на третьем этаже, его размеры 7,9 x 6,0 x 3,7 м, окна обращены на юг. Под окнами в парке растут высокие березы, которые экранируют пыль с улицы, проходящей примерно в 50 м от дома.

Счетчики располагались рядом друг с другом на подоконнике напротив форточки (50x40 см). Ионизацию атмосферного воздуха замеряли при открытой форточке, а ионизацию комнатного воздуха при закрытой форточке.

Константы обоих счетчиков проверял и сравнивал перед измерением концентрации ионов инженер Я.Х. Маасепп.

Ионизацию атмосферного воздуха измеряли 9 июля с 14.00 до 14.30*. Погода была солнечная, с переменной облачностью, давление, температура и относительная влажность воздуха составляли 1005 Па, 27°C и 59%, а концентрация пыли в воздухе

* В работе используется среднее местное время.

Таблица I

№ измерений	Предельная подвижность ($\kappa_0, \text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$)	Концентрации отрицательных (-) и положительных (+) ионов (N, n , эл.зар.см $^{-3}$)		Разница в показаниях счетчиков, %	Коэффициенты униполярности $N^+/N^-, n^+/n^-$	Примечания
		(P)	(З)	$\frac{(P) - (З)}{(P)}$	(P)	
1.	0,001	$N^- 2000$	1750	13	$N^+/N^- = 1,2$	В атмосферном воздухе (09.07.80 с 14.00 до 14.30) находится множество средних ионов ($n_2 - n_4$) [9].
2.	0,01	$n_2^- 1300$	1150	12	$n_2^+/n_2^- = 1,2$	Если в течение измерений 0,5 часа ионизация атмосферы существенно не изменяется, то по концентрациям ионов, измеренным счетчиком, работающим по принципу разряда, можно вычислять и спектральное распределение ионов (например, ($n_1 - n$) - промежуточные ионы, ($n_2 - n_4$) - средние ионы, ($N - n_4$) - средние и полутяжелые ионы, ($N - n_2$) - полутяжелые ионы). Тяжелых ионов в пределах подвижностей $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ в данной работе не измеряли.
3.	0,1	$n_1^- 410$	340	17	$n_1^+/n_1^- = 1,0$	
4.	1,0	$n 250$	210	16	$n^+/n^- = 1,4$	
5.	0,001	$N^+ 2300$	2050	11	$N^+/N^- = 1,2$	
6.	0,01	$n_2^+ 1500$	1350	10	$n_2^+/n_2^+ = 1,2$	
7.	0,1	$n_1^+ 420$	350	17	$n_1^+/n_1^+ = 1,0$	
8.	1,0	$n 340$	300	12	$n^+/n^- = 1,4$	

Таблица 2

№ измерения	Предельная подвижность (k_0 , см ² В ⁻¹ с ⁻¹)	Концентрации отрицательных (-) и положительных (+) ионов (N, n, эл.зар.см ⁻³)		Разница в показаниях счетчиков, %	Коэффициенты униполярности N ⁺ /N ⁻ , n ⁺ /n ⁻	Примечания
		(P)	(3)			
1.	0,001	N ⁻ 1800	1500	17	N ⁺ /N ⁻ = 1,2	Утром (10.07.80 с 8.00 до 8.35) в начале рабочего дня воздух в помещении был чистый, полутяжелых ионов (N - n ₂) было мало, а легких ионов (n ₁) и молионов (n) много. При измерении концентраций ионов (k ₀ = 0,001 см ² В ⁻¹ с ⁻¹) показания счетчиков отличаются друг от друга примерно на 23%. Если концентрацию ионов измеряют счетчиком, работающим по принципу разряжения, то в узком интервале спектра ионов можно применять для спектрального распределения ионов метод расчета концентрации ионов по разностям. Но если концентрации ионов измеряют счетчиком, работающим по принципу заряжения, в котором легкие атмосферные ионы отталкиваются из-за краевого эффекта счетчика, то расчет концентрации ионов по разностям приводит к заметным погрешностям.
2.	0,01	n ₂ ⁻ 980	920	6	n ₂ ⁺ /n ₂ ⁻ = 1,2	
3.	0,1	n ₁ ⁻ 500	460	8	n ₁ ⁺ /n ₁ ⁻ = 1,3	
4.	1,0	n ⁻ 390	370	5	n ⁺ /n ⁻ = 1,1	
5.	0,001	N ⁺ 2200	1700	23	(3) N ⁺ /N ⁻ = 1,1	
6.	0,01	n ₂ ⁺ 1200	1000	17	n ₂ ⁺ /n ₂ ⁻ = 1,1	
7.	0,1	n ₁ ⁺ 640	600	6	n ₁ ⁺ /n ₁ ⁻ = 1,3	
8.	1,0	n ⁺ 440	420	5	n ⁺ /n ⁻ = 1,1	

Таблица 3

№ измерения	Предельная подвижность ($K_0, \text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$)	Концентрации отрицательных (-) и положительных (+) ионов ($N, n, \text{эл.зар.см}^{-3}$)		Разница в показаниях счетчиков, %	Коэффициенты униполярности $N^+/N^-, n^+/n^-$	Примечания
		(P)	(З)			
1.	0,001	N^- 2800	2500	II	$N^+/N^- = 1,0$	<p>После обеда (10.07.80 с 14.00 до 15.00), когда в помещении работали в течение дня с 8.00 до 16.00 два человека, концентрации полутяжелых ионов ($N-n_2$) значительно возросли, а концентрации легких ионов (n_1) и молионов (n) уменьшились.</p> <p>Нужно отметить перевес легких положительных ионов в помещении ($n_1^+/n_1^- = 1,7$), что обусловлено, по-видимому, пребыванием в помещении людей.</p>
2.	0,01	n_2^- 760	680	II	$n_2^+/n_2^- = 1,1$	
3.	0,1	n_1^- 260	230	12	$n_1^+/n_1^- = 1,6$	
4.	1,0	n^- 200	180	10	$n^+/n^- = 1,6$	
5.	0,001	N^+ 2700	2200	18	$N^+/N^- = 0,9$	
6.	0,01	n_2^+ 800	740	8	$n_2^+/n_2^- = 1,1$	
7.	0,1	n_1^+ 420	400	5	$n_1^+/n_1^- = 1,7$	
8.	1,0	n^+ 320	310	3	$n^+/n^- = 1,7$	

равнялась $0,18 \text{ мг/м}^3$. Результаты измерений концентрации ионов приведены в табл. 1. Данные, полученные по показаниям счетчика, работающего на принципе заряжения, отмечены буквой З, а данные, полученные по показаниям счетчика, работающего на принципе разряжения, буквой Р.

Концентрацию ионов комнатного воздуха измеряли в первый раз 10 июля с 8.00 до 8.35. Помещение предварительно проветривали, в нем находились два человека, занятых измерениями. Давление, температура и относительная влажность воздуха равнялись 1001 гПа , 21°C и 60% , а концентрация пыли в воздухе $0,12 \text{ мг/м}^3$. Концентрации ионов приведены в табл. 2.

В тот же день с 14.00 до 15.00 концентрации ионов в помещении измеряли вторично. Здесь в течение дня с 8.00 до 16.20 работали два человека. Концентрации ионов приведены в табл. 3.

Как выясняется из представленного материала, счетчики, работающие на принципах разряжения и заряжения, могут показывать различные результаты.

Поскольку краевой эффект приборов, работающих на принципе заряжения, искажает данные измерений концентраций ионов [8], для проведения точных исследований спектра атмосферных ионов рекомендуются приборы, работающие на принципе разряда.

Л и т е р а т у р а

1. Тверской П.Н. Атмосферное электричество, Л., 1949.
2. Israel H. Atmosphärische Elektrizität. Teil I, Leipzig, 1957.
3. Chalmers J.A. Atmospheric Electricity. Oxford, 1949.
4. Смирнов В.В. Атмосферные ионы. Вопросы атмосферного электричества. - Труды Института экспериментальной метеорологии, вып. 24, М., 1980.
5. Имянитов И.М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М., 1957.
6. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 195, Тарту, 1967.
7. Рейнет Я.Ю. Счетчик аэро- и гидроионов. Авт.св. № 120272, бмл. изобр., 1959, № II.
8. Семенов К.А. Наблюдения за концентрацией легких ионов и электропроводностью воздуха. - Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, вып. 401, Л., 1980, с. 130-135.

9. Рейнет Я.Ю. Комбинированный счетчик атмосферных ионов. Приборы и стенды. Институт технико-экономической информации. Тема 4, № ИС-55-409. М., 1955, с. I-I7.

COMPARISON OF THE READINGS OF AIRION COUNTERS
OPERATING ON THE PRINCIPLE OF CHARGE INCREASE
AND CHARGE DECREASE

J. Reinet

S u m m a r y

The paper deals with the study of the ionization of atmospheric air (let into a laboratory room through an open window) carried out on 9th July 1980 and with the study of the ionization of laboratory air performed on 10th July 1980 by means of two types of ion counters.

The measuring of the ion concentrations of atmospheric air on 9th July 1980 showed that it contained large numbers of intermediate ions ($N-n_1$) (see Table 1). The outdoor air also contained particularly numerous positive molions ($n^+/n^- \approx 1.4$). A comparatively large amount of small ions (17%) was repulsed by the edge effect of the counter operating on the principle of charge increase.

The measuring of the ion concentrations of laboratory air was carried out on the morning of 10th July 1980 from 8.00 a.m. to 8.35 a.m. (see Table 2). The counters showed that at the beginning of the working day the laboratory air was clean and it contained comparatively few intermediate ions ($N-n_1$) and relatively many small ions (n_1) and molions^x (n). When concentrations of ions ($k \gg 0.001 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) were measured by the ion counter operating on the principle of charge increase, the edge effect of the counter repulsed large numbers of small ions. As a result, the readings of different counters made at the same time differed from each other up to 23%.

On the afternoon of the same day (between 2 p.m. and 3 p.m.) (see Table 3) when two persons had been working in the laboratory (having measurements of 7.9 x 6.0 x 3.7 m)

x) Mobility $k \gg 1.0 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

throughout the day, the concentrations of intermediate ions $(N-n_1)$ had increased whereas the concentrations of small ions (n_1) and those of molions (n) had decreased. One could notice the preponderance of positive molions $(n^+/n^- \approx 1.7)$.

Since the edge effect of the ion counters working on the principle of charge increase distorts the results of measuring ion concentrations, the counters operating on the principle of charge increase are not suitable for exact measuring of atmospheric ions.

К ВОПРОСУ ОБРАЗОВАНИЯ ОКИСЛЯЮЩИХ ИНГРЕДИЕНТОВ В ПРОЦЕССАХ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА

Р.Э. Приyman

При искусственной ионизации воздуха в зависимости от типа ионизирующего источника и режима ионизации образуются в большей или меньшей мере продукты окисления, преимущественно озон и окислы азота. Количественное определение их концентраций является значимой характеристикой ионизируемой среды.

Установленная предельно допустимая концентрация (ПДК) озона $0,1 \text{ мг/м}^3$, что в 10 раз меньше порога обоняния (1 мг/м^3) [1]. В чистом атмосферном воздухе природный фон озона составляет $0,01 \dots 0,03 \text{ мг/м}^2$, в начале развития грозных процессов концентрация озона в приземных слоях атмосферы возрастает до $0,13 \text{ мг/м}^3$, а затем резко понижается до прежнего уровня [2].

ПДК окислов азота в воздухе рабочей зоны 5 мг/м^3 , а в атмосферном воздухе населенных мест среднесуточная ПДК двуокиси азота составляет $0,085 \text{ мг/м}^3$ [1].

В данной работе приведены результаты исследований по образованию озона и окислов азота в воздухе при работе коронных ионизаторов различных конструкций и экспериментально-го ультрафиолетового излучателя с уменьшенным образованием побочных продуктов.

Объекты исследования.

1. Экспериментальный ионизатор для исследования бактерицидного действия ионизации, изготовленный в Проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей (ПЛАЭ) ТГУ. Его рабочими электродами служат разветвленные зигзагообразные проволоки диаметром $0,5 \text{ мм}$, изолированные друг от друга стеклянными пластинками ($2 \times 25 \times 140 \text{ мм}$). Пакет из 12 пластинок с электродами и вентилятор установлены в трубе диаметром 160 мм .

2. Ионизатор-нейтрализатор статического электричества со сквозным потоком воздуха [3], предназначенный для нейтрализации электростатических зарядов в бумажной промышленности.

3. Высокочастотный электровфлювиальный ионизатор [4].

4. Аэроионизатор Равича [5], используемый в лечебных и профилактических целях.

5. Проволочно-антенный коронный ионизатор, применяемый в экспериментально-исследовательских целях.

6. Экспериментальный ультрафиолетовый излучатель, изготовленный в ПЛАЗ.

Описание последних двух источников ионизации воздуха приведено в этом же сборнике в статье Л.Ю. Виснапуу.

Ионизируемой средой был воздух лабораторного помещения длиной 7,8 м, шириной 5,2 м и высотой 3,7 м. Во время экспериментов в помещении находились три сотрудника.

Методика эксперимента.

Воздух предварительно проветренного помещения ионизировали поочередно выше указанными устройствами. Перед ионизацией дважды определяли концентрацию озона и двуокиси азота. Последние оказались ниже предела чувствительности спектрофотометра и поэтому в последующих экспериментах их фоновое содержание не учитывалось. Так же измеряли полярную объемную плотность заряда, обусловленную естественной ионизацией при предельной подвижности аспирационного счетчика ионов $0,1 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Через две минуты после включения ионизатора с расстояния 1 м от него отбирали пробы на определение озона и окислов азота. Одновременно с того же расстояния измеряли полярную плотность заряда при указанной предельной подвижности. Плотность заряда измеряли счетчиком аэроионов САИ-ТТУ-66 м [5] при объемной скорости аспирации исследуемого воздуха $4500 \text{ см}^3/\text{с}$.

Ионизацию воздуха во время работы проволочно-антенного ионизатора и ультрафиолетового излучателя измеряли счетчиком аэроионов УТ 76-05 в чистом и задымленном табачным дымом воздухе. Описание эксперимента и измерений приведены в статье Л.Ю. Виснапуу в этом же сборнике. Пробы воздуха на определение озона и окислов азота отбирали аналогично предыдущим циклам с того же расстояния и с той же последовательностью.

Пробы воздуха на определение озона отбирали в поглотительные приборы с пористым стеклянным фильтром со скоростью аспирации воздуха 1 л/мин в течение 10 мин. Пробы на определение окислов азота отбирали в поглотительные приборы Зайцева в течение 20 мин. Искусственные источники ионизации воздуха работали в течение всего времени отбора проб.

Стабильный расход аспирируемого воздуха обеспечивали либо электроаспиратором либо компрессором с ротаметром.

Растворами, поглощающими озон и двуокись азота, были соответственно 1%-ный и 8%-ный водные растворы йодистого калия.

Озон определяли либо колориметрически, либо спектрофотометрически по взаимодействию выделившегося иода под действием озона в поглотительном растворе с диметил- γ -фенилендиаминном [6]. Двуокись азота определяли аналогичными методами с реактивом Грисса-Илосвая [7].

В состав окислов азота, кроме двуокиси азота, входят окись азота, незначительное количество закиси азота, причем возможно и наличие некоторых модификаций этих окислов в виде N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5 . Основным составляющим этих окислов является двуокись азота. Окись азота же окисляется в атмосфере до двуокиси, особенно в присутствии озона или других окислителей.

Часто в работах, не требующих четкого разделения этих окислов, ограничиваются определением двуокиси. Применением соответствующего коэффициента пересчета, равного 1,17, находят суммарное количество окислов в виде азотного ангидрида.

Результаты определения оксидантов и их анализ.

Концентрации оксидантов в чистом и загрязненном табачным дымом воздухе приведены в таблице.

Фон естественной полярной плотности заряда при предельной подвижности аспирационного счетчика ионов $0,1 \text{ см}^2/(\text{В.с})$ изменялся в пределах $(1...3) \cdot 10^2$ эл.зар./см³. По сравнению с плотностью заряда ионов, образованных изучаемыми ионизаторами, уровень естественного фона незначителен.

Относительная погрешность измерения плотности заряда составляла 20%, а погрешность определения оксидантов $\pm 0,05 \text{ мг/м}^3$. Концентрация окислов азота дана в пересчете на ангидрид азота.

Значения концентраций оксидантов являются средними 2...4 определений.

Таблица

Содержание озона и окислов азота в воздухе при работе некоторых ионизаторов

Тип и режим работы ионизаторов	Полярная плотность заряда, 10^3 эл.зар./см ³		Концентрация окислов, мг/м ³	
	-	+	озон	окислы азота
Экспериментальный ионизатор (9 кВ)	-	150	0,21	0,42
Нейтрализатор статического электричества				
а) 3 электрода заземлены, 4 под напряжением (9 кВ)	450	170	0,17	0,14
б) все электроды под напряжением (10 кВ)	2,5	220	0,16	0,14
Электрофлювиальный ионизатор	300	-	0,14	0,7
Аэроионизатор Равича	45	-	0,08	0,62
Проволочно-антенный коронный ионизатор (20 кВ)				
а) ионизация в чистом воздухе	350	-	0,12	0,05
б) ионизация в задымленном табачным дымом воздухе	120	-	0,05	-
Ультрафиолетовый излучатель (70 В)				
а) ионизация в чистом воздухе	0,6	0,6	0,05	-
б) ионизация в задымленном табачным дымом воздухе	4	3	-	-

Как видно по таблице, концентрация окислов азота в условиях эксперимента остается на порядок ниже ПДК для рабочей зоны. В то же время их концентрация в помещении, где работают ионизаторы, в 1,6...8,3 раза превышает концентрацию ПДК окислов азота в атмосферном воздухе населенных мест. Исключения составляют концентрации окислов азота, образующиеся при работе проволочно-антенного ионизатора и ультрафиолетового излучателя. В случае последнего окислов азота из-за их ничтожного количества в воздухе не удалось определить. Это объясняется малой плотностью заряда ионов, сопутствующей ультрафиолетовому излучению источника.

Концентрация озона, образующегося в воздухе вблизи ионизаторов, кроме аэроионизатора Равича и ультрафиолетового излучателя, составляет 1...2 ПДК. При работе ультрафиолетового излучателя концентрация озона остается в пределах чувствительности метода (спектрофотометрическое измерение), благодаря конструктивным особенностям излучателя. При работе проволочно-антенного ионизатора озон образуется в концентрациях, незначительно превышающих ПДК.

В задымленном табачном дыме воздухе (5...15 мг/м³) концентрация обоих оксидантов практически не превышает 0,05 мг/м³, что можно объяснить взаимодействием последних с табачным дымом.

Автор выражает благодарность Л.Ю. Виснапу за оказанную научно-техническую помощь и консультацию.

Выводы.

1. Концентрация окислов азота, образующихся в воздухе вблизи работающих ионизаторов, составляет порядка 0,1 ПДК рабочей зоны и 1,6...8,3 ПДК атмосферного воздуха населенных мест.

2. Концентрация озона в этих же условиях составляет 1,6...2,1 ПДК.

3. С целью уменьшения концентрации оксидантов, образующихся при искусственной ионизации, более приемлемым можно считать проволочно-антенный коронный ионизатор.

4. В воздухе, загрязненном табачным дымом, концентрации оксидантов ничтожны (обнаруживаются лишь в следовых количествах).

Л и т е р а т у р а

1. Перегуд Е.А. Санитарно-химический контроль воздушной среды. Л., Химия, 1978, 331 с.
2. Пшежецкий С.Я., Дмитриев М.Т. Радиационные физико-химические процессы в воздушной среде. М., Атомиздат, 1978, 181 с.
3. Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю., Ютс Э.Ю. Коронный ионизатор со сквозным потоком воздуха. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1970, вып. 340, с. 243-251.
4. Приллер П.К., Рейнет Я.Ю., Кийс В.Ю. Высоочастотный электроэффлювиальный ионизатор. Передовой научно-технический и производственный опыт. Тема 34, № П-57-24/6. М., 1957, с. 3-9.
5. Портнов Ф.Г. Электроаэрозольтерапия. Рига, Зинатне, 1976, 198 с.
6. Перегуд Е.А., Гернет Е.В. Химический анализ воздуха промышленных предприятий. Л., Химия, 1973, 439 с.
7. Полежаев Н.Г., Гринина В.В. Гигиена и санитария, 1949, № II, с. 26-29.

FORMATION OF OXIDIZABLE INGREDIENTS DURING THE PROCESSES OF ARTIFICIAL IONIZATION OF THE AIR

R. Priiman

S u m m a r y

The formation of ozone and nitrogen oxides has been studied in the working zone of several coronal ionizers used for practical and scientific purposes.

It has been shown that the average concentration of nitrogen oxides at a distance of one metre from the ion source of the air increases up to the concentration which is by an order smaller than the permissible limit of tolerance of the concentration established for the working zone, but during the working time of the ultra-violet radiator and of the coronal antenna-ionizer their concentration is smaller than 0.05 mg/m^3 , or below the detection limit. The concentration of ozone depends on the type of the ionizer and it may vary from 0.5 to 2.1 of the permissible limit of tolerance of the concentration.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОКИСЛОВ АЗОТА В ВОЗДУХЕ

Л.Э. Дангус

В чистом воздухе количество окислов азота (NO_x) незначительное: концентрация двуокиси азота (NO_2) варьирует в пределах $0,002 \dots 0,009 \text{ мг/м}^3$, окиси азота (NO) — $0,002 \text{ мг/м}^3$ [1]. Предельно допустимая концентрация (ПДК) для окислов азота составляет в атмосферном воздухе населенных мест $0,085 \text{ мг/м}^3$, а в рабочей зоне 5 мг/м^3 [2].

Рост объема сжигаемого топлива и тяжелой промышленности обуславливает выброс окислов азота в атмосферу в количествах, намного превышающих природный фон этих веществ. Некоторое количество окислов азота образуется при искусственной ионизации воздуха, в частности коронным ионизаторами.

В соответствующих работах по искусственной ионизации вопросы образования продуктов окисления воздуха, в том числе азота, почти не освещены или о их наличии судят полуэмпирически. В какой-то мере это можно объяснить тем, что подобные исследования проводят специалисты, не всегда осведомленные о возможностях определения тех или иных химических соединений, образовавшихся при физических процессах.

В данной работе приведен обзор в целях ознакомления с методами определения окислов азота в воздухе как наиболее сложными в силу специфического строения их молекул. Надо отметить, что вместо раздельного определения NO и NO_2 часто находят их суммарное количество NO_x лишь по концентрации NO_2 , как основного загрязняющего ингредиента воздуха.

Из различных методов анализа окислов азота самыми старыми являются химические методы, о которых дан охватывающий обзор в статье Вольберга и соавт. [1].

Химическое определение этих соединений осуществляют по нитрит-ионам, образующимся после поглощения двуокиси азота раствором реагента — поглотителя. Более применяемым является метод Полежаева и Гириной, согласно которому пробы воздуха всасывают в поглотительные приборы через 8%-ный раствор йодистого калия. Концентрацию NO_2 определяют либо колориметрически, либо спектрофотометрически (520...570 нм) по

количеству образовавшегося азокрасителя с реактивом Грисса (раствор сульфаниловой кислоты и α -нафтиламина в 10%-ном растворе уксусной кислоты). Определяемая концентрация NO_2 составляет 0,01...10 мг/м³. Этот же метод мы применяли для определения NO_2 в воздухе при работе различных коронных ионизаторов. Методика проведения эксперимента и соответствующие результаты приведены в статье Р.Э. Прийман в этом же сборнике. Химические методы для оперативного определения окислов азота мало пригодны, т.к. требуют больших затрат времени и труда, а часто и наличия дефицитных реактивов.

В последние десятилетия разработан ряд чувствительных физико-химических методов анализа NO_x [3-5].

Эффективным методом является хемилуминесцентный, принцип которого заключается в фотометрировании хемилуминесценции, возникающей в результате реакции окиси азота хемилуминесцентными индикаторами. Хемилуминесцентный газоанализатор позволяет определять NO в концентрациях 0,01...66 мг/м³ в воздухе, но дефицит соответствующей аппаратуры не позволяет широко применять этот метод.

Одним из перспективных методов определения NO и NO_2 является лазерный. По данным Гельбуочс, Такер и др. на основе резонансной флуоресценции, возбуждаемой излучением Ar^+ -ионного лазера при длине волны 488 нм, была достигнута чувствительность обнаружения в несколько млрд⁻¹ окислов азота [6].

Технически одними из более доступных инструментальных определений окислов азота в воздухе остаются газохроматографические методы [7]. Остановимся более подробно на этих методах, а также на затруднениях, связанных с их применением.

По данным некоторых авторов затруднения определения окислов азота обуславливаются своеобразным строением их молекул [7], по другим данным - химическим равновесием между окислами [8]: $\text{NO} + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_3$ (азотистый ангидрид).

Ряд авторов считает, что при нормальных условиях существует равновесие NO_2 и NO_4 , которое повышением температуры перемещается в сторону образования NO_2 . При 140°C в системе существует только NO_2 . Дальнейшее повышение температуры приводит его к распаду до NO и O_2 . Полная конверсия NO_2 достигается при температуре около 600°C [9].

Ранее предполагали, что NO быстро превращается в NO_2 , но Боденштайн и др. доказали, что низкий уровень концентрации NO может быть в воздухе устойчивым длительное время [10].

NO_2 может реагировать с водяным паром, превращаться на пористых сорбентах в NO , которая в свою очередь может взаимодействовать с кислородом, образуя обратно NO_2 [II-13]. Окислы азота могут безвозвратно адсорбироваться на сорбентах колонки; например, NO_2 адсорбируется на молекулярном сите 5A $7,2 \cdot 10^6$ моль/г, окиси алюминия $4 \cdot 10^5$ моль/г, силикагеле $3 \cdot 10^5$ моль/г [8].

Для определения окиси азота испытаны сорбенты порapak N, S, T [7, 10, 11, 14, 15], силихром [14], молекулярные сита 5A [7, 11, 12, 16, 17, 18, 19] и I3X [15, 20], силикагель [12, 14, 20], полисорб-I [14, 20], хромсорб-102 и 104 [11, 21], газохром RZ с диметилсульфоксидом [15], активированный уголь СКТ [14, 20], активированный уголь СКТ с сульфатом никеля [7, 20, 22, 23].

Для определения двуокиси азота испытаны сорбенты порapak Q [8, 14], силихром [14], силикагель [8, 14, 17, 24, 25], полисорб-I [14, 20], фторopak-80 с SF-96 [16, 26], тefлекс [8], молекулярные сита 5A [8, 17, 27] и I3X [8], окись алюминия [8], пористое стекло [8], активированный уголь СКТ [14], активированный уголь СКТ с NiSO_4 [20, 22] древесный уголь со скваланом [12, 15, 28], диатомитовый носитель ТНД с диэтилфталатом [29], хромсорб P или W [12].

Многочисленная номенклатура применяемых сорбентов и различных их модификаций не всегда полностью обеспечивает четное разделение окислов азота.

Иванова и Франгулян [14] разделяли окислы азота на порapakе Q, Петрая и Зотова [22] на активированном угле СКТ, импрегнированном сульфатом никеля. Детектирование проводили по теплопроводности при $130 \dots 150^\circ\text{C}$. По этой методике Петрая и Зотова, а также Бескова и Филиппов [22, 23] успешно разделяли не только NO и NO_2 , но и N_2O (закись азота). Мусатовой и Андреевой [20] в этих же условиях NO и NO_2 разделить не удалось. Они определяли суммарное содержание NO_x на силикагеле АСК. Данные разных авторов по применению импрегнированного угля не согласуются. Применение этого сорбента не дало пока удовлетворительных результатов и для нас.

По материалам обзора можно заключить, что для газохроматографического разделения окислов азота лучшими являются порapak Q и молекулярное сито 5A. Для непосредственного детектирования окислов азота самым пригодным является детектор по теплопроводности или при низких концентрациях окислов

азота детектор электронного захвата, требующий предварительной обработки определяемых ингредиентов, сорбента или модифицирования самого детектора.

Несмотря на кажущуюся легкость, газохроматографический метод определения окислов азота, помимо сказанного выше, имеет еще одно существенное затруднение: приготовление эталонных газовых смесей, требующее специальной аппаратуры и навыков. При наличии эталонных образцов с определенной концентрацией окислов азота, их газохроматографическое определение в воздухе существенно облегчается.

Кажется, что наиболее перспективными совершенными методами определения окислов азота являются хемилуминесцентный и лазерный, но из-за недоступности аппаратуры газохроматографические методы определения не утрачивают своей значимости.

Автор выражает благодарность к.х.н. Р.Приyman за оказанную помощь.

Л и т е р а т у р а

1. Вольберг Н.Т., Егорова Е.Д., Павленко А.А. - В кн.: Методы определения газообразных загрязнений в атмосфере . М., Наука , 1979, с. 5-24.
2. Перегуд Е.А. Санитарно-химический контроль воздушной среды. Л., Химия , 1978, 331 с.
3. Альперин В.З., Хамракулов Т.К.-В кн.: Методы определения газообразных загрязнений в атмосфере . М., Наука , 1979, с. 229-235.
4. Субботин В.П., Божевольнов Е.А., Рылов В.А., Степанова А.Г.-В кн.: Методы определения газообразных загрязнений в атмосфере . М., Наука , 1979, с. 172-184.
5. Дмитриев М.Т.-В кн.: Методы определения газообразных загрязнений в атмосфере . М., Наука , 1979, с. 75-99.
6. Лазерный контроль атмосферы. М., Мир , 1979, 416 с.
7. Дмитриев М.Т., Мегалин О.И., Китросский Н.А., Панчиный В.И., Альтман Л.В., Масленковский Л.Г. Гигиена и санитария, 1979, № 7, с. 57-59.
8. Döring C.E., Geyer R., Röske P. Acta chimica Academiae Scientiarum Hungaricae, 1972, v. 73, No.4, p. 339-410.
9. Краткая химическая энциклопедия. М., Советская энциклопедия , 1961, т. I, 1262 с.

10. Leithe W. *The Analysis of Air Pollutants. USA, Ann Arbor, 1971, 303 p.*
11. Киселев А.В., Яшин Я.И. Адсорбционная газовая и жидкостная хроматография. М., Химия, 1979, с. 162-163.
12. Guiochon G., Pommer C. *Gas Chromatography in Inorganics and Organometallics. Michigan, 1973, p. 96-99.*
13. Березкин В.Г., Гавригев В.С. Заводская лаборатория, 1971, № 8, с. 901-902.
14. Иванова Н.Т., Франгулян Л.А. Газохроматографический анализ нестабильных и реакционноспособных соединений. М., Химия, 1979, 232 с.
15. Leibrand R.J. *Journal of Gas Chromatography, 1967, v.5, No. 10, p. 518-524.*
16. Хроматографический анализ окружающей среды. М., Химия, 1979, 605 с.
17. Marvillet L., Tranchant M. *Chemical Abstracts, 1966, v. 64, No. 13, p. 18377.*
18. McAllister W.A., Southerland W.V. *Analytical Chemistry, 1971, v. 43, No. 11, p. 1536.*
19. Dietz R.N. *Analytical Chemistry, 1968, v. 40, No. 10, p. 1576-1572.*
20. Мусатова Ю.Г., Андреева И.Г. в сб. Тр. Ленинградского государственного научно-исследовательского и проектного института основной химической промышленности. Л., 1975, вып. 17, с. 66-71.
21. Funazo K., Tanaka M., Shono T. *Analytical Letters, 1978, v. 11, No. 8, p. 661-666.*
22. Петрая Н.В., Зотова Л.Г. Изв. АН Груз.ССР, сер. хим., 1978, т. 4, № 4, с. 372-375.
23. Бескова Г.С., Филиппов В.С. Заводская лаборатория, 1972, № 2, с. 154-155.
24. Щирская В.А. Гигиена и санитария, 1954, № 8, с. 41-43.
25. Greene S.A., Pust H. *Analytical Chemistry, 1958, v. 30, No. 6, p. 1039-1040.*
26. Morrison M.E., Corcoran W.H. *Analytical Chemistry, 1967, v. 39, No. 2, p. 255-258.*
27. Бортникова Р.Н., Бортников Г.Н., Курочкин Н.И. В сб.: Газовая хроматография, М., НИИТЭХИМ, 1969, вып. II, с. 78.
28. Bethea R.M., Adams F.S. *Journal of Chromatography, 1963, v. 10, No. 1, p. 1-8.*

29. Справочник по физико-химическим методам исследования объектов окружающей среды. Л., Судостроение, 1979, 646 с.
30. Сакодинский К.И., Панина Л.И. Полимерные сорбенты для молекулярной хроматографии. М., Наука, 1977, 166 с.

DETERMINATION OF NITROGEN OXIDES IN THE AIR

L. Langus

S u m m a r y

This paper presents a short review of the chemical and physicochemical methods used for the determination and separation of nitrogen oxides in the last 20 years. The methods of gaschromatography have been dealt with in more detail, difficulties and the optimum variants of analysis connected with the application of this method have been pointed out.

РАССЕЯНИЕ ТАБАЧНОГО ДЫМА В ИОНИЗИРОВАННОМ И НЕИОНИЗИРОВАННОМ ВОЗДУХЕ

Л. Ю. Виснапу

Искусственную ионизацию воздуха применяют во многих отраслях народного хозяйства и в медицине в целях улучшения ионного состава среды [1-3]. В связи с тем, что зачастую воздух ионизируют, не углубляясь в особенности процесса ионизации, целесообразно дать некоторые количественные оценки, характеризующие ионизацию чистого и загрязненного воздуха. С этой целью в данной работе приведены результаты исследований среды вблизи работающих коронного ионизатора воздуха, ультрафиолетового излучателя и источника водного электроаэрозоля.

Объекты исследования и методика проведения эксперимента.

Средой исследования был воздух лабораторного помещения длиной 7,8 м, шириной 5,2 м и высотой 3,7 м, в котором находились столы высотой 0,8 м. Коронным ионизатором служили две параллельные антенны из тонкой проволоки диаметром 0,05 мм, натянутые на изоляторах вдоль помещения на расстоянии 2,8 м друг от друга, 1,6 м от потолка и 1,2 м от боковой стены. На антенны при ионизации подавали постоянное напряжение 20 кВ отрицательной полярности. В качестве ультрафиолетового излучателя использовали ртутную лампу ДРК-120, питаемую напряжением 70 В. Источником электроаэрозоля служил пневматический распылитель с индуцирующим электродом [4], питаемый сжатым воздухом с избыточным давлением 0,2 МПа. При ионизации воздуха полярную плотность заряда измеряли счетчиком аэроионов УТ 76-05, разработанным и изготовленным в Проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей Тартуского госуниверситета доц. Я. Ю. Рейнетом и инж. Я. Х. Маасешом. Все измерения проводили при одной и той же объемной скорости аспирации воздуха, равной 80 см³/с. Погрешность измерений составляла не более 20%.

Измерение массовой концентрации дисперсной фазы аэрозоля с размерами частиц 0,1...10 мкм осуществлялось электронно-индукционным пылемером типа ЭИП. Погрешность измерений

нылемером не более 20%.

Измерения плотности заряда и концентрации аэрозоля проводили на расстоянии 1 м от одной из антенн или от источника электроаэрозоля.

Ультрафиолетовый излучатель был на таком же расстоянии от этой антенны и счетчика ионов.

Параметры воздуха предварительно проветренного помещения были следующие: температура $17 \pm 3^\circ\text{C}$, атмосферное давление 1008 ± 2 гПа, относительная влажность $85 \pm 5\%$, концентрация дисперсной фазы аэрозоля $0,13 \pm 0,03$ мг/м³, уровень ионизации показан в таблице.

Перед созданием в помещении дыма через минуту после включения источника искусственной ионизации измеряли уровень ионизации в чистом воздухе. При этом коронный ионизатор и ультрафиолетовый излучатель работали непрерывно, а источник электроаэрозоля в течение 3 мин при производительности по распыленной воде 1 г/с и по заряду 3...4 мкА. Отметим, что при работе генератора водного электроаэрозоля в чистом воздухе за указанный промежуток времени концентрация дисперсной фазы аэрозоля заметно не изменилась. Это объясняется полным испарением образованных генератором капель распыла. Один из циклов измерений проводили при одновременной работе коронного ионизатора и ультрафиолетового излучателя. После каждого цикла измерений помещение проветривали в течение 15...20 мин. Измерения проводили в присутствии трех сотрудников, окна и двери помещения были закрыты. Далее в помещении при помощи специально изготовленного устройства создавали дым от одновременного сжигания пяти сигарет. Это устройство представляло собой цилиндрическую камеру с ячейками для сигарет, в которую от компрессора подавали сжатый воздух. Последний проходил через вставленные в ячейки сигареты в направлении от зажженных концов к негорящим. Перед измерениями образующийся дым рассеивали равномерно по всему помещению принудительной вентиляцией.

В задымленном помещении измеряли концентрацию дисперсной фазы аэрозоля и полярную плотность заряда. Перед каждым новым циклом измерений создавали новый дымовой фон с концентрацией дисперсной фазы 14 мг/м³. За рассеиванием дисперсной фазы аэрозоля следили 30 мин. При этом полярную плотность заряда измеряли при уменьшении концентрации дисперсной фазы аэрозоля от 6 до 3 мг/м³.

Для получения более достоверных данных измерения повторяли 3...4 раза. Средние значения измеренных величин приведены в таблице и на рисунке. Для оценки скорости рассеяния дыма введена относительная концентрация дисперсной фазы аэрозоля, равная отношению концентраций в рассматриваемый и начальный моменты времени.

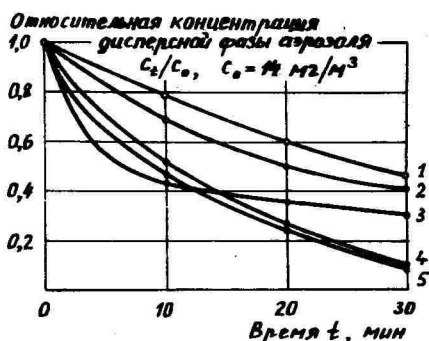


Рис. Уменьшение относительной концентрации дисперсной фазы аэрозоля при различных способах ионизации воздуха.

1 - естественная ионизация, 2 - ультрафиолетовое излучение, 3 - электроаэрозоль, 4 - коронный разряд с ультрафиолетовым излучением, 5 - коронный разряд.

Обсуждение результатов.

Для оценки загрязненности воздуха по электрическим параметрам воспользуемся коэффициентом загрязнения [5]

$$C = (P_- + P_+) : (\varphi_- + \varphi_+),$$

где P и φ - показания счетчика ионов при предельных подвижностях соответственно 10^{-3} и $10^{-1} \text{ см}^2/(\text{В.с})$, причем индексы показывают полярность заряда.

При естественной ионизации чистого воздуха (концентрация дисперсной фазы аэрозоля $0,13 \pm 0,03 \text{ мг/м}^3$) этот коэффициент $c = 6,4$. Наличие дисперсной фазы табачного дыма ($3...6 \text{ мг/м}^3$) обуславливает увеличение коэффициента загрязнения до 44. Иными словами, увеличение концентрации дисперсной фазы аэрозоля за счет табачного дыма примерно в 35 раз сопровождается возрастанием коэффициента загрязнения в 7 раз.

Коэффициент загрязнения при искусственной ионизации, согласно данным таблицы, ультрафиолетовым излучением равен 14 для чистого воздуха и 18 для задымленного воздуха, коронным разрядом соответственно 1,8 и 6,7, коронным разрядом вместе с ультрафиолетовым излучением 2,3 и 8,0, а электро-

Таблица

Уровни полярной плотности заряда в чистом и задымленном воздухе
при различных способах ионизации

Способ ионизации	Полярная плотность заряда, 10^3 эл.зар./см ³ в чистом воздухе (без скобок), в задымленном воздухе (в скобках)					
	Предельная подвижность, см ² /(В.с)					
	10^{-1}		10^{-2}		10^{-3}	
	-	+	-	+	-	+
Естественная ионизация	0,25 (0,7)	0,30 (0,1)	0,50 (5,0)	0,55(1,1)	1,50 (24)	2,00 (11)
Ультрафиолетовое излучение	0,6 (3,5)	0,6 (1,0)	3,0 (11)	1,6 (4,0)	10 (40)	7,0 (40)
Коронный разряд	350 (120)	- (-)	440 (260)	- (-)	620 (800)	- (-)
Коронный разряд вместе с ультра- фиолетовым излучением	300 (100)	- (1,0)	460 (180)	- (1,5)	700 (800)	- (1,7)
Электроаэрозоль	1000 (...)*)	- (...)	1200 (...)	- (...)	1500 (...)	17 (...)

*) (...) - не определяли

аэрозолем I,5. Как видно, при искусственной ионизации рассматриваемыми способами коэффициент загрязнения приобретает тем меньшие значения, чем больше степень ионизации. Эту зависимость, обусловленную изменением спектра ионов по подвижностям, следует учитывать, когда для оценки загрязненности воздуха используют коэффициент загрязнения.

По графикам рисунка можно заключить следующее. В естественных условиях концентрация дисперсной фазы аэрозоля (табачного дыма) снижается до половины от начальной примерно за 30 мин. При искусственной ионизации воздуха такое же понижение концентрации достигается ультрафиолетовым излучением за 20 мин, коронным разрядом вместе с ультрафиолетовым излучением за 10 мин, только коронным разрядом за 9 мин и электроаэрозолем за 6 мин. Отметим, что генератор электроаэрозоля работал лишь в течение первых 3 мин, поэтому дальнейшая скорость убывания концентрации дисперсной фазы аэрозоля понижена. Таким образом, создание водного электроаэрозоля является из рассмотренных способов подавления дыма наиболее эффективным. Использование ультрафиолетового излучения совместно с коронным разрядом нецелесообразно, т.к. оно несколько снижает эффективность коронного разряда. Это, в частности, объясняется биполярной ионизацией при ультрафиолетовом излучении, приводящей к уменьшению суммарной плотности объемного заряда и вместе с тем к падению скорости электростатического рассеяния.

Выводы.

Используемый для оценки загрязненности воздуха коэффициент загрязнения, равный отношению сумм абсолютных значений полярных объемных плотностей зарядов тяжелых и легких ионов, зависит от уровня ионизации исследуемой среды.

По сравнению с коэффициентом загрязнения чистого воздуха в помещении, равным 6,4, наличие табачного дыма в концентрации 3...6 мг/м³ обуславливает увеличенное в 7 раз значение этого коэффициента.

Для подавления дыма наиболее эффективным из исследованных способов искусственной ионизации воздуха является создание водного электроаэрозоля.

Автор выражает искреннюю признательность Р.Э. Прийман и Н.М. Белову, оказавшим помощь в проведении опытов и обобщении полученных результатов измерений.

Л и т е р а т у р а

1. Тетеревников В.Н. О совершенствовании нормативов микроклимата производственных помещений. - Водоснабжение и санитарная техника, № 9, 1973.
2. Рогинский М. Проблемы улучшения санитарно-гигиенических условий труда в сварочном производстве. М., НИИМат., 1975, 42 с.
3. Адоньев С.М., Филиппев О.В. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии. М., Металлургия, 1979, 192 с.
4. Виснапуу Л.Ю. Пневматический распылитель с индуцирующим электродом. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973, с. 209-216.
5. Приллер П.К. Исследование спектра атмосферных ионов, гигиеническое и биометеорологическое значение ионизации атмосферы по данным измерений в г. Тарту. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 240, Тарту, 1970, с. 61-139.

SCATTERING OF TOBACCO-SMOKE IN IONIZED AND
UNIONIZED AIR

L. Visnapuu

S u m m a r y

The scattering dynamics of the dispersed phase of aerosols and the changes in the polar charge density have been studied on the basis of tobacco-smoke at the initial concentration of 14 mg/m^3 . The changes in the polar charge density have been measured at a limiting mobility of $10^{-3} \dots 10^{-1} \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ under natural conditions and in various kinds of artificial ionization. The speed of the scattering of tobacco-smoke under artificial ionization has been established as a result of several tests. The relative mass concentrations of the dispersed phase of aerosol diminished in thirty minutes to:

- 0.42 under ultraviolet radiation,
- 0.30 under aqueous electroaerosols,
- 0.11 under a corona discharge combined
with ultraviolet radiation,
- 0.09 under a corona discharge.

At the same time under natural radiation this value was reduced to 0.49.

ЭЛЕКТРОГРАНУЛОМЕТР АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ С ШИРОКИМ ПРЕДЕЛОМ ИЗМЕРЕНИЯ

А.А.Мирме, Э.И.Тамм, Х.Ф.Таммет

Введение

Электрическая спектрометрия (гранулометрия) аэрозольных частиц означает определение распределения концентрации частиц по размерам путем измерения распределения по электрической подвижности заряженных в определенных условиях частиц и использования связи между этими двумя распределениями. В большинстве известных электрогранулометров используют зарядку частиц в атмосфере униполярных легких ионов [1-5], хотя известны и попытки использования в электрогранулометре равновесного (Больцмана) распределения зарядов на частицах, возникающего в биполярной атмосфере легких ионов [6, 7]. Физические особенности процесса униполярной зарядки частиц (см. ниже) ограничивают предел измерения электрогранулометра снизу (~ 10 нм по диаметру) и позволяют до сих пор реализовывать этот метод только отдельно для мелких ($d \approx 10$ нм...1 мкм) и крупных ($d \gg 200$ нм) частиц. В настоящей статье описывается попытка построить широкопредельный электрогранулометр ($d \approx 10$ нм...10 мкм).

Физические и технические принципы работы широкополосного электрогранулометра

Всякий электрогранулометр аэрозольных частиц неизбежно содержит три основных функциональных узла: зарядник частиц, анализатор подвижностей для измерения спектра частиц по подвижностям и вычислительное устройство для расчета спектра по размерам (в частном случае - человек).

Зависимость подвижности частицы k от ее диаметра d при униполярной зарядке, рассчитанная по модели Мирзабекяна для некоторых значений напряженности поля E и параметра зарядки α [8], приведена на рис. 1. Кривая 1 соответствует преимущественно диффузионной зарядке; кривая 2 - преимущественно ударной зарядке [8].

Из рис. 1 легко понять причины ограниченности предела измерения гранулометра как в случае диффузионного, так и

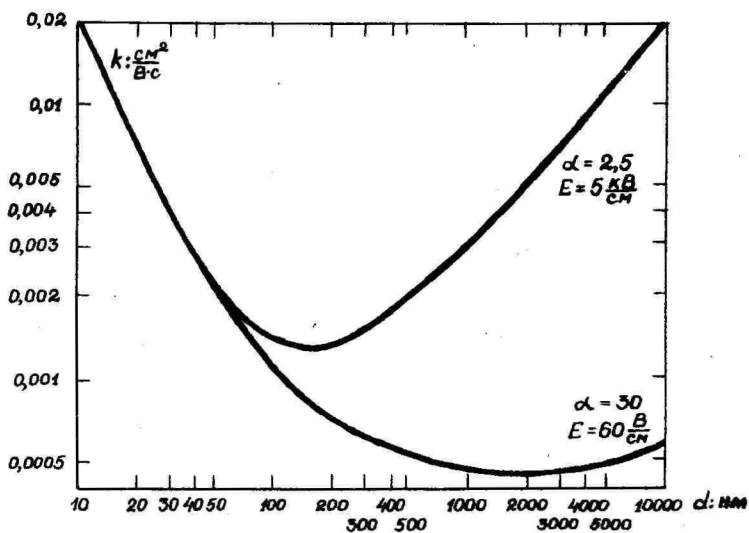


Рис. 1. Зависимость $k = k(d)$.

ударного зарядника (при $d < 10$ нм резко падает вероятность заряжения частиц). Вблизи критического размера d_c гранулометр теряет разрешающую способность. Единственным способом расширения предела измерения электрогранулометра является параллельное применение обоих типов зарядников частиц [8]. В описываемом гранулометре выбран вариант с двумя анализаторами подвижностей и с двумя различными зарядниками к ним. Ложный сигнал, создаваемый мелкими частицами в анализаторе с ударным зарядником, исключается при обработке информации.

Во всех известных электрогранулометрах анализатором подвижностей является аспирационный измерительный конденсатор. Лучшую разрешающую способность имеют дифференциальные конденсаторы второго порядка [9], в которых аэрозоль входит только через часть входного отверстия, через остальную часть входит чистый воздух, а регистрации подлежат частицы, дошедшие до некоторого малого отрезка собирающей обкладки конденсатора.

Для измерения всего спектра подвижностей можно применять сканирование напряжением U на измерительном конденсаторе. Из-за конечной разрешающей способности всякий спектральный прибор способен выдавать спектр только в виде набора конечного числа фракций, поэтому U следует изменять ступенчато. В таком процессе измерения каждую фракцию изме-

ряют в разное время, что может привести в случае развивающихся аэрозольных систем и при существовании временных и пространственных флуктуаций концентрации частиц к существенным ошибкам. В данном гранулометре применены многоканальные (секционированные) измерительные конденсаторы [6], позволяющие измерять все фракции спектра одновременно.

Для регистрации частиц применен метод измерения тока, переносимого осаждающимися частицами на каждую секцию измерительных конденсаторов, как самый удобный в случае заряженных частиц. Во избежание существенных помех, создаваемых электрическим коммутатором [6], каждая секция снабжена своим электрометром. Электрометры описаны в статье [10].

Для устранения влияния дрейфа нуля электрометров, а также подавления и оценки аддитивных шумов применен модуляционный метод измерения с синхронным детектированием сигнала. Сигнал модулируется переключением полярности зарядника — частицы обратной полярности не осаждаются на измерительных обкладках конденсатора. Синхронное детектирование осуществляется лишь на стадии обработки данных [8]. Период модуляции выбирается в пределах от 20 с до 2 мин.

В зарядниках заряжающиеся частицы испытывают дрейф под влиянием электрического поля, и спектр частиц части аэрозоля, проходящего ближе к источнику ионов зарядника, искажается. В данном гранулометре часть аэрозоля с искаженным спектром отсасывается и не попадает в анализатор подвижностей. В роли чистого (неактивного) воздуха используют воздух, прошедший измерительный конденсатор как электрофильтр.

Зарядники

На рис. 2 ударный зарядник (Е-зарядник) показан вместе с анализатором и системой протягивания воздуха, а диффузионный зарядник (Д-зарядник) отдельно в кружке. Источником ионов является коронирующее острие $I(I')$ в виде платиновой проволоки диаметром 0,025 мм. Зона зарядки частиц в Е-заряднике образуется кожухом 2 зарядника, в котором имеется щель для выхода ионов, и цилиндрическим токоизмерительным электродом 3. Подачей напряжения на кожух 2 в зоне зарядки создается электрическое поле с напряженностью порядка 5 кВ/см, обеспечивающее необходимое условие преимущественно ударной зарядки и высокую степень однородности параметра зарядки α по всей ширине зоны зарядки. Среднее значение этого параметра, выбранное равным 2,5, регулируется значением напряжения

на коронирующем острии.

В Д-заряднике требуется большое значение параметра зарядки ($\alpha \approx 30$), а для увеличения значения критического диаметра (рис. 1) напряженность поля должна быть минимальна. Этим требованиям отвечает зарядник открытой конструкции, с кожухом (2^о) без крышки. Расчет параметров такого зарядника выполняют весьма приближенно, поэтому напряженке на коронирующем острии, обеспечивающее необходимое значение параметра α , выбирают экспериментально в ходе испытания гранулометра по результатам измерения эталонных монодисперсных аэрозолей.

Токоизмерительные электроды 3(3^о) служат стенками зоны зарядки и коллекторами сигнала обратной связи для стабилизации коронного тока.

Анализаторы подвижности

Способ разделения предела измерения гранулометра на фракции заимствован у Уитби с сотрудниками [4]. Промежуток диаметров частиц от 10 нм до 10 мкм разделяется логарифмически равномерно на 12 фракций, множитель деления равен $\sqrt{10}$. Для повышения надежности прибора суммарное число каналов анализаторов выбрано примерно вдвое больше (26 шт.). Для согласования границ каналов с границами фракций необходимо сделать каждую секцию собирающей обкладки индивидуальной длины. По техническим причинам секции выполнены только двух различных длин (30 и 50 мм), а внутренний электрод сделан переменного диаметра; таким образом достигнута приближенная согласованность упомянутых границ.

Оба измерительных конденсатора одинаковы, они содержат внутреннюю отталкивающую обкладку 4 и внешнюю собирающую обкладку из 15-ти секций 5-19 (рис. 2). Изоляторы 20 секций собирающей обкладки отлиты из полипропилена [11]. Токоснимающие устройства 21 служат и пробоотборниками частиц для электронной микроскопии.

Соосным расположением зарядников и анализаторов и выбором внешней обкладки в роли собирающей обкладки достигнут фокусирующий эффект [8]. Величина этого эффекта выясняется только в ходе испытаний прибора.

Система протягивания воздуха

Аэрозоль (расход $\Phi = 400 \text{ см}^3/\text{с}$) входит через защитно-экранирующую сетку 22 в зону зарядки. Половина всего расхода (Φ_1) идет в анализатор, вторую половину (Φ_2) отсасывает че-

рез внутреннюю обкладку 4 и штуцер 25. Неактивный воздух (расход $\Phi_2 = 600 \text{ см}^3/\text{с}$) поступает через кольцеобразный канал 23 и сетку 24 для подавления турбулентности. Воздух из измерительного конденсатора отсасывают через узкую кольцеобразную щель на дне камеры отсоса 26. Все потоки создаются вентилятором 30; расходы устанавливают выбором отверстий дросселей 27 и 28, распределителем 29 и задвижкой 31. Для отfiltrации частиц, попавших в вентилятор из потока Φ_3 , установлен электрофильтр 32.

Электрическая блок-схема

В состав гранулометра входят блок управления, измерительный блок, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), электронные часы, перфоратор и может входить также аналоговый дисплей. Из них АЦП, перфоратор и часы промышленного изготовления. К часам добавлен цифровой выход.

Взаимодействие основных элементов показано на рис. 3.

Схема управления осуществляет общую синхронизацию. По сигналам часов она определяет длительность периода модуляции, вырабатывает сигналы полярности зарядки, включает электрометры, запускает схему записи на перфоленту и управляет дисплеем. Схема записи по сигналу схемы управления сначала выводит на перфорирование признак начала массива, признак полярности зарядки (режима) и текущее время. Одновременно она включает через коммутатор каналов выход первого электрометра к АЦП. Процесс записи жестко синхронизирован с работой перфоратора. По окончании записи времени запускается АЦП, его выходной код передается на перфорирование и через коммутатор включается второй канал и т.д. К коду сигнала каждого канала добавляется признак состояния схемы защиты соответствующего канала.

После перфорирования сигналов последнего канала схема формирует протяжку перфоленты на 4...6 см и переходит в ожидание следующего запуска от схемы управления.

Схема защиты служит для аварийного выключения любого из электрометров, если его выходное напряжение превысит заданный уровень (примерно II В). Она же по запросу сообщает об этом схеме записи. Восстановление нормального режима производится в моменты переключения полярности зарядки по команде схемы управления. Зарядники Б и Д питаются от управляемых преобразователей Пр1,2,3 через электромеханический коммутатор. В случае отсутствия сигналов полярности зарядки

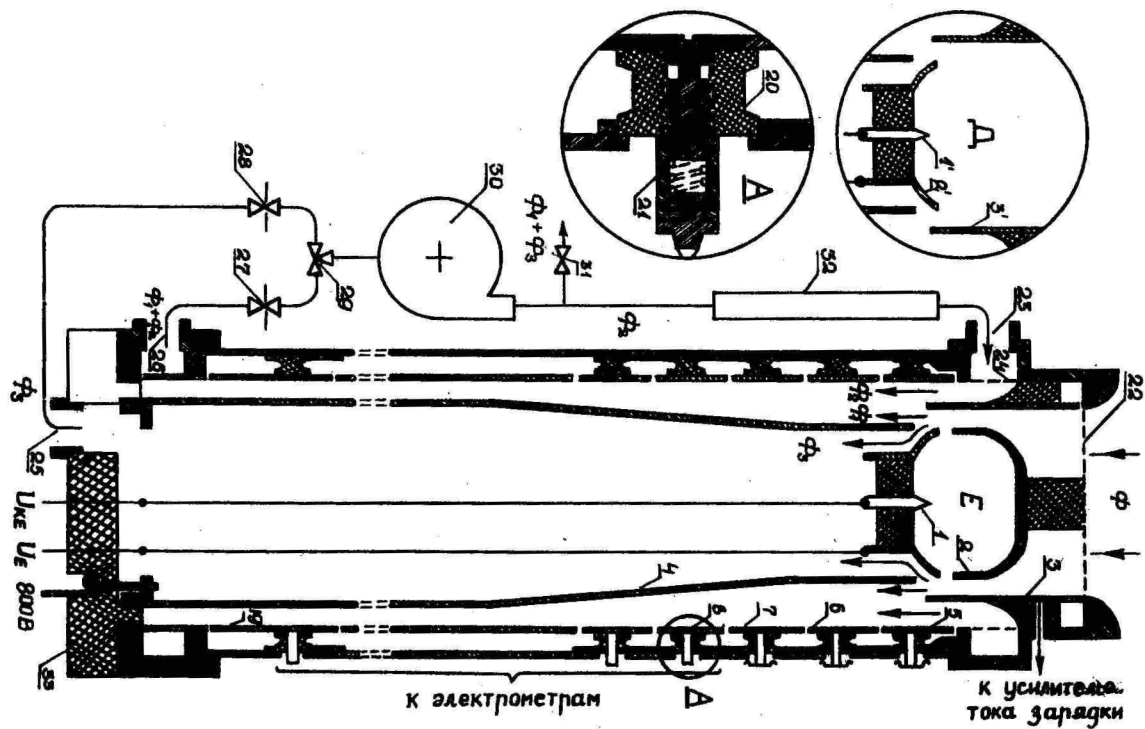


Рис. 2. Измерительный конденсатор с зарядником и воздушным трактом.

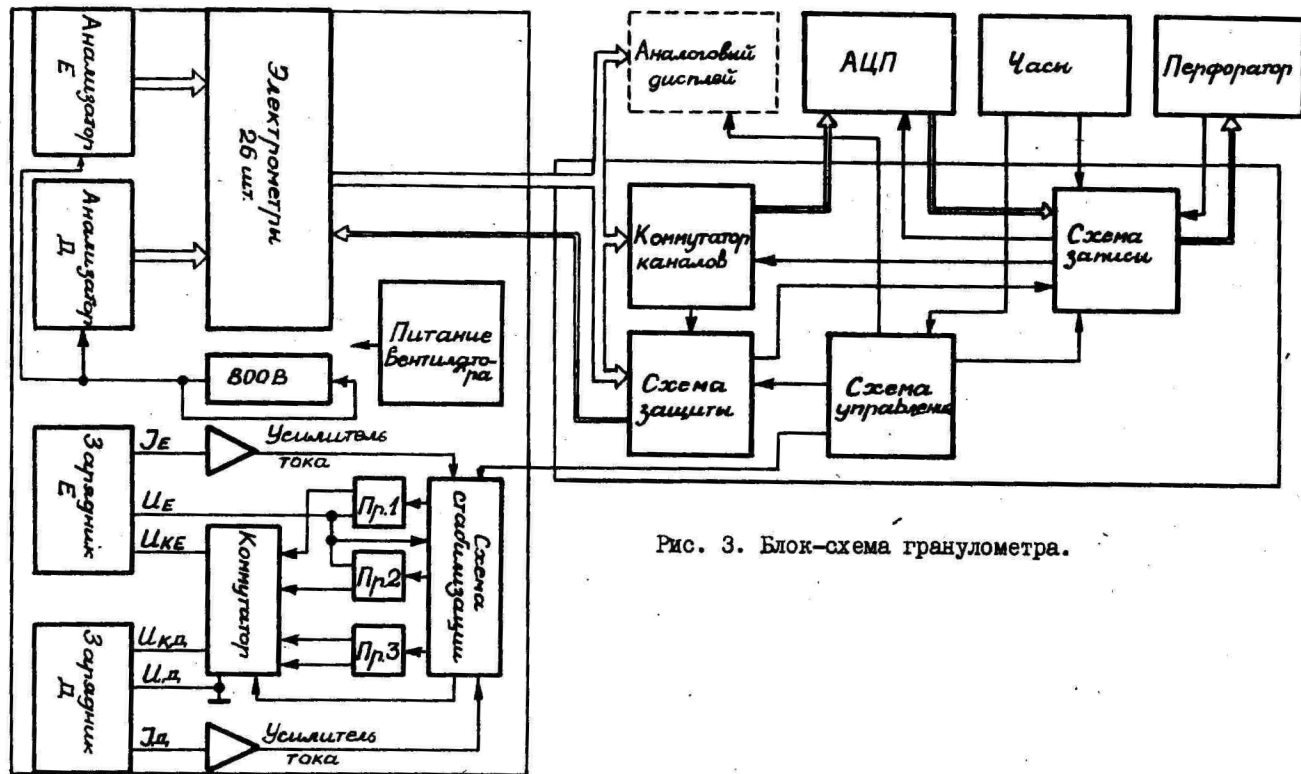


Рис. 3. Блок-схема granulометра.

преобразователи закрыты. При наличии какого-нибудь сигнала полярности соответственно замыкаются цепи обратной связи, коммутатор включается на нужную полярность и схема стабилизации устанавливает заданный режим зарядки, контролируя в Е-заряднике напряженность поля и ток зарядки, а в Д-заряднике — ток зарядки. Источник на 800 В для питания оттапливающих обкладок измерительных конденсаторов должен обладать особой стабильностью. Он выполнен также на основе управляемого преобразователя со схемой обратной связи.

Разработанный для гранулометра аналоговый дисплей с индикацией на линейных газоразрядных индикаторах в принципе проводит ту же обработку сигналов, что ЭВМ должна провести потом, но вследствие несовершенства использованных элементов дает весьма грубое представление о спектре аэрозольных частиц по размерам.

Процедуры градуировки и обработки данных, а также результаты исследования надежности, разрешающей способности и т.п. гранулометра будут опубликованы позже.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллективу сотрудников Проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей и кафедры общей физики ТГУ, принявшему участие в разработке и испытании отдельных узлов гранулометра.

Л и т е р а т у р а

1. Rohman H. Methode zur Messung der Größe von Schwebeteilchen. — Zs. Phys., 1923, 17, S. 253-265.
2. Yosikawa H.H. et al. Electrostatic particle size analyser. — Rev. Sci. Instr., 1956, 27, No, 6, p. 359-362.
3. Langer G. et al. Further development of an electrostatic classifier for submicron airborne particles. — Int. Air Water Pollut., 1964, 8, No. 3/4, p. 167-176.
4. Whitby K.T. Electrical measurement of aerosols. In: Fine particles. Aerosol generation, measurement, sampling and analysis. New-York-San Francisco-London, 1976, p.581-624.
5. Калакутский Л.И. и др. Измерение гранулометрического состава с помощью двухполюсного электропреципитатора. — Сб. Тр. ВНИИНеруд, вып. 37, Тольятти, 1973.
6. Таммет Х.Ф. и др. Многоканальный автоматический спектрометр аэроионов. — Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып.320, Тарту, 1973, с. 27-73.

7. Hoppel W.A. Determination of the aerosol size distribution of the charged fraction of aerosols. - J. Aerosol Sci., 1978, 9, No. 1, p. 41-54.
8. Таммет Х.Ф. К технике электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 534, Тарту, 1980, с. 55-79.
9. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 195, Тарту, 1967, 234 с.
10. Миллер Ф.Г. К разработке электрометров прямого усиления для многоканальных спектрометров аэроионов. - В настоящем сборнике.
- II. Пейль И.А. Исследование изоляционных материалов, применяемых при измерении слабых токов. - В настоящем сборнике.

AN AEROSOL ELECTROGRANULOMETER WITH A WIDE MEASURING RANGE

A. Mirme, E. Tamm and H. Tammet

S u m m a r y

The paper describes a wide-range aerosol electrogranulometer for the determination of the distribution of the particle concentration within a diameter interval of 10 nm to 10 μ m. A wide measuring range is achieved by applying two charging mechanisms - a diffusional and a field charging one simultaneously. The device contains two second-order differential multi-channel mobility analyzers (aspiration condensers) with a total of 26 measuring channels both of which have their own charging devices. The current of each channel is measured by its own electrometer. Modulation of the current is produced by commuting the polarity of the charger, synchronous detection is carried out in the course of data processing. The air which has passed through the mobility analyzers is used in the analyzers in the capacity of clean air; analyzers operate as electric filters.

Measuring and storage of information on punched tape have been completely automated. - The graduation of the device and the procedures of data processing will be published later.

СИСТЕМА ПОЛУЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Ю.Э. Кижас, Т.П. Бернотас

Для определения аппаратной матрицы электрогранулометра аэрозольных частиц $[I]$ необходимо иметь монодисперсные аэрозоли с шириной спектра 5...7% диаметрами частиц 0,01 ... 10 мкм и концентрацией $\geq 10^5 \text{ см}^{-3}$. Для получения частиц больше 0,2 мкм известны разные возможности, удовлетворяющие этим требованиям (генераторы Берглунда и Лиу, Ламера, монодисперсные латексы). В диапазоне размеров 0,01...0,1 мкм, где большинство методов генерирования аэрозоля (термоконденсация, распыление сильно разбавленных растворов, горение в пламени и др.) дает ширину спектра размеров частиц 20...25%, необходимо сузить спектр первоначального аэрозоля.

В данной работе описывается система получения и контроля калибровочных аэрозолей с диаметрами частиц 0,01...1 мкм.

Процесс получения калибровочных аэрозолей содержит четыре этапа: 1) генерирование первоначального конденсационного аэрозоля; 2) нейтрализация зарядов частиц - доведение распределения зарядов частиц до известного (равновесного) распределения; 3) электрическая сепарация частиц, при которой выделяется часть первоначального распределения подвижностей и тем самым уменьшается относительная полуширина спектра [2]; 4) контрольная регистрация среднего размера и концентрации выходящих из сепаратора аэрозольных частиц.

Экспериментальная схема, реализующая этот процесс, изображена на рис. 1.

1. Получение конденсационных аэрозолей. В соответствующих генераторах создавали аэрозоли из иодистого серебра AgI , хлористого натрия NaCl и серы S .

Частицы NaCl получали в одноступенчатом генераторе, в теплообменнике которого происходила спонтанная конденсация паров NaCl .

В генераторе AgI (см. рис. 1) горячие пары AgI проходят через сопло и конденсируются в процессе смешения с чистым холодным воздухом. Размеры частиц регулировали изменением температуры испарения AgI или скорости холодного

воздуха (рис. 2). Однако в этом генераторе концентрация частиц, больших $0,1 \text{ мкм}$, быстро уменьшалась из-за засорения сопла в результате конденсации на его стенках паров AgI .

Генератор для получения частиц S двухступенчатый. В первой ступени NaCl испаряется при температуре $500 \dots 800^\circ\text{C}$ и конденсируется в охлаждаемом теплообменнике. Затем частицы NaCl как ядра конденсации проходят вторую горячую ступень генератора, заполненную парами S при температуре $40 \dots 120^\circ\text{C}$. Частицы растут за счёт конденсации паров S на них. Изменением температуры второй ступени (давления пара S) легко можно регулировать средний размер частиц получаемого аэрозоля. По микрофотографии, снятой в электронном микроскопе, видно, что частицы аэрозоля сильно скоагулированы. Поэтому необходимо разбавление на выходе генератора.

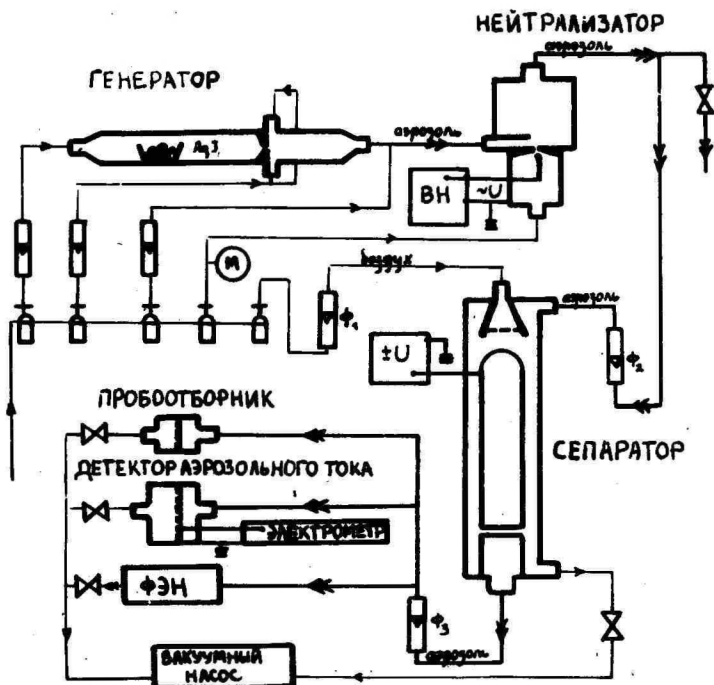


Рис. 1. Экспериментальная схема получения и контроля калибровочных аэрозолей.

При всех описанных генераторах отмечали уменьшение среднего размера частиц во времени при долговременной работе, связанное с уменьшением количества испаряемого вещества. Это показано на рис. 2А. Зависимость 1 получена в течение двух часов после прибавления новой порции AgI . Зависимость 2 получена после долговременной (больше 10 часов) работы генератора. Во втором случае для получения частиц 20...60 мкм потребовалась температура намного выше, чем в первом случае.

Многочисленные опыты показали, что параметры конденсационного аэрозоля воспроизводятся не всегда, несмотря на тщательную стабилизацию всех контролируемых режимов работы генераторов. Скомбинирование термоконденсационного метода с электрической сепарацией устраняет указанные недостатки.

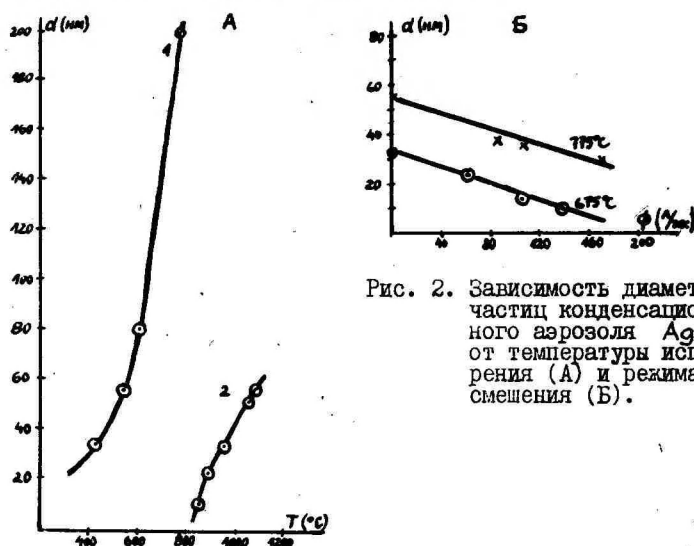


Рис. 2. Зависимость диаметра частиц конденсационного аэрозоля AgI от температуры испарения (А) и режима смешения (Б).

2. Нейтрализация зарядов частиц аэрозоля. Для нейтрализации зарядов используется биполярный коронный нейтрализатор (рис. 1), разработанный А.А. Мирме. На коронирующее острие подается переменное напряжение. Чистый фильтрованный воздух обтекает острие и уносит ионы через сопло в камеру зарядки. В турбулентном потоке положительные и отрицательные ионы перемешиваются с частицами аэрозоля. Режимы работы нейтрализатора выбраны так, чтобы обеспечить значение параметра зарядки $n_0 t$ ($n_0 = \int n dt$ - концентрация ионов, t - время пребывания частицы в камере зарядки) равным $10^6 \text{ см}^{-3} \text{ с}$, доста-

точным для нейтрализации зарядов частиц [3].

Работоспособность описанного нейтрализатора в большой мере зависит от выбора подходящего напряжения на коронирующем острие. Как известно, напряжение пробоя различно для положительной и отрицательной короны. При повышении напряжения сначала появляются отрицательные ионы и частицы аэрозоля заряжаются преимущественно отрицательно. Равновесие заряда достигается только начиная с определенного значения напряжения, которое желательно определить экспериментально. В описываемой экспериментальной системе это легко осуществимо с помощью сепаратора и детектора аэрозольного тока.

Среди частиц с радиусами 0,01 мкм при равновесном распределении заряда одним элементарным зарядом заряжены только 10% от всех частиц, остальные остаются незаряженными. Доля незаряженных частиц, потерянных для электрической сепарации, увеличивается с уменьшением размеров частиц. Чтобы обеспечить нужный выход маленьких частиц из сепаратора, можно нейтрализатор заменить униполярным зарядником, в котором частицы заряжаются выше, чем при равновесном распределении.

3. Аспирационный электрический сепаратор подвижностей (рис. 1), аналогичный описанному в [2], представляет собой коаксиальный цилиндрический конденсатор. Внешняя обкладка его заземлена, на внутреннюю подается напряжение $\pm U$. Аэрозоль с объемной скоростью Φ_2 входит в сепаратор около внешней обкладки через узкую кольцевую щель. Поток аэрозоля разделяется от внутренней обкладки потоком чистого воздуха Φ_1 . Заряженные аэрозольные частицы отклоняются в электрическом поле между обкладками. Частицы, имеющие определенную электрическую подвижность k , попадают в щель во внутренней обкладке и высасываются со скоростью Φ_3 .

Общая теория аспирационного метода развита Х.Ф. Тамметом [4] и конкретизована для сепаратора с высасыванием аэрозоля В.А. Хошпелем [5]. Конструктивные и режимные параметры выбраны по их работам. Наилучшая разрешающая способность сепаратора достигается в режиме $\Phi_2 = \Phi_3$, т.е. когда скорости входящего и высасываемого аэрозолей равны, и когда отношение Φ_1/Φ_2 возможно большое. С другой стороны, при выборе Φ_1/Φ_2 нужно предотвратить слишком большое разбавление аэрозоля в сепараторе, чтобы обеспечить требуемую концентрацию частиц выходящего аэрозоля ($\geq 10^5 \text{ см}^{-3}$). Величи-

на $\Phi_1/\Phi_2 = 12$ в описываемом сепарате обеспечивает относительную полуширину 0,045, $\Phi_1/\Phi_2 = 10$ - полуширину 0,053 и $\Phi_1/\Phi_2 = 8$ - полуширину 0,064.

Поток частиц выходящего аэрозоля (число частиц, проходящих через щель за 1 с) описывается формулой [5]:

$$I(k_1) = \int_{k_3}^{k_1} \left[\frac{k\Phi_1}{k_4} - (\Phi_1 - \Phi_3) \right] f(k) dk + \Phi_2 \int_{k_1}^{k_4} f(k) dk + \int_{k_4}^{k_2} \left[\Phi_1 + \Phi_2 - \frac{k\Phi_1}{k_4} \right] f(k) dk,$$

где $f(k) = dN/dk$ - функция распределения подвижностей частиц входящего аэрозоля,

$$k_1 = \frac{\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3}{4\pi C U}, \quad k_2 = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{4\pi C U},$$

$$k_3 = \frac{\Phi_1 - \Phi_3}{4\pi C U}, \quad k_4 = \frac{\Phi_1}{4\pi C U},$$

C - действующая емкость цилиндрического конденсатора.

Предположив, что распределение $f(k)$ частиц входящего аэрозоля логарифмически нормальное, на ЭВМ "Электроника С50" вычислены характеристики электрического сепаратора, т.е. зависимости средней подвижности частиц выходящего аэрозоля от напряжения сепаратора для разных режимов потоков Φ_1 и $\Phi_2 = \Phi_3$ (рис. 3). Связь между радиусом частицы, заряженной 1 эл.зар., и ее подвижностью определяли по формуле Милликена.

Вычисляли также зависимость потока выходящего аэрозоля от напряжения на сепараторе при разных ширинах спектра входящего аэрозоля (рис. 4). Суммарную концентрацию и среднюю подвижность частиц входящего аэрозоля при этом считали неизменными.

Видно, что значение максимального потока (т.е. число выходящих частиц) и крутизна максимума (т.е. точность определения подвижности по характеристикам рис. 3) в большей мере зависят от ширины распределения частиц конденсационного аэрозоля. Следовательно, работа электрического сепаратора зависит от параметров первоначального входного аэрозоля и сепаратор надо калибровать при одновременном измерении частиц входящего и выходящего аэрозоля.

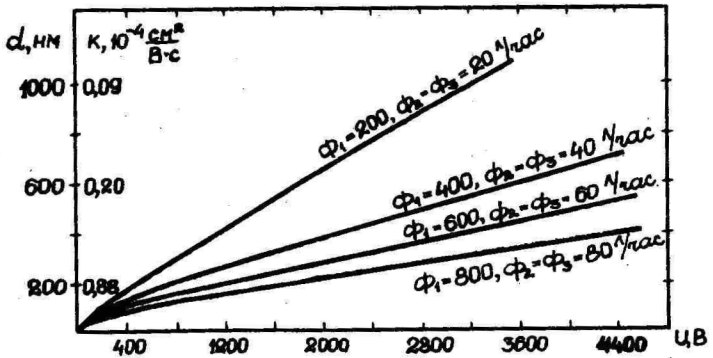
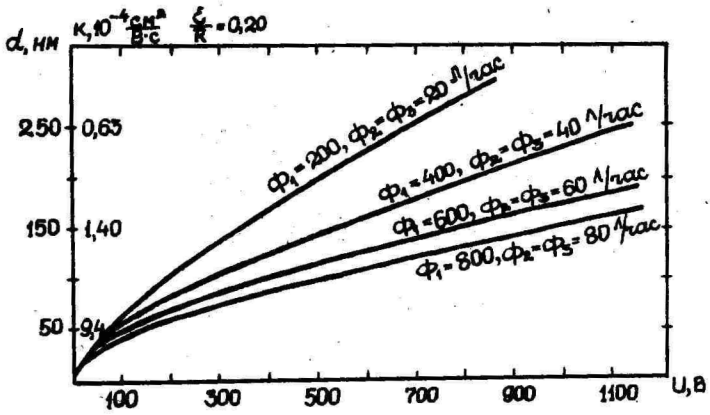


Рис.3. Характеристики электрического сепаратора.

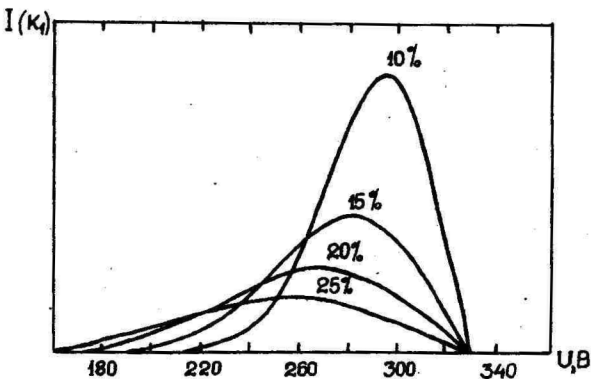


Рис.4. Зависимости выходного потока аэрозоля от напряжения при разных ширинах $f(k)$ входящего аэрозоля.

В описываемой экспериментальной системе электрический сепаратор может играть двойную роль: а) сепаратор является частью комбинированного аэрозольного генератора, его работа согласована с работой предыдущего конденсационного генератора и он выдает аэрозоль с определенными параметрами, б) сепаратор вместе с аэрозольным детектором являются средством быстрого контроля работы любых аэрозольных генераторов или зарядников частиц.

4. Измерение и контроль параметров аэрозоля осуществляли детекторами трех типов:

- а) абсолютным методом служила электронная микроскопия, для которой аэрозольные частицы собирали на ядерные фильтры;
- б) быстрый контроль частиц оптического диапазона проводили фотоэлектрическим нефелометром ФЭН-58. По интенсивности рассеянного света определяли зависимость концентрации выходящего аэрозоля от напряжения на сепараторе. Как и следовало ожидать, эта зависимость бимодальная (рис. 5, А).

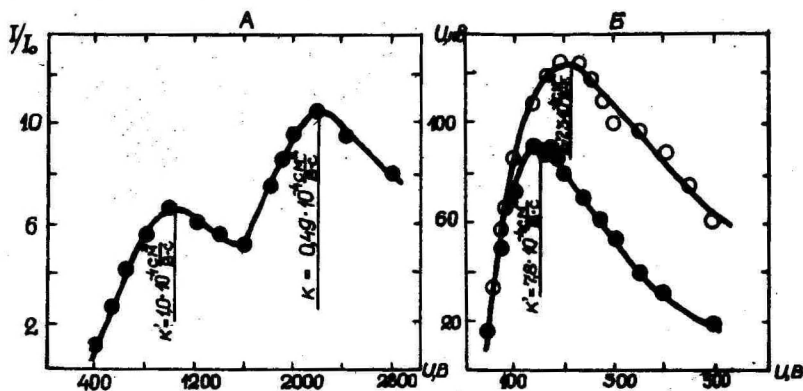


Рис. 5. Зависимости А) интенсивности света, рассеянного в ФЭН; Б) электрического тока фильтра детектора аэрозольных частиц от напряжения сепаратора.

Первый ее максимум соответствует частицам, имеющим радиус r и заряд $2e$, другой — частицам, имеющим такой же радиус r , но заряд e . Соответствующие подвижности определяли по характеристикам рис. 3;

в) параметры оптически невидимых частиц определяли электрически детектором тока аэрозольных частиц. Выходящие из сепаратора заряженные частицы собирали на фильтр. Специальной электрометрической схемой измеряли ток фильтра и по

его значению определяли концентрацию частиц. Пределы измерения детектора от 10^5 до 10^8 однократно заряженных частиц в секунду. По максимуму зависимости тока от напряжения на сепараторе (рис. 5,Б) определяли среднюю подвижность частиц. В отличие от зависимости концентрации зависимость электрического тока от напряжения имеет только один максимум, соответствующий средней подвижности частиц. Определение по этому максимуму среднего размера частиц требует применения поправки, учитывающей распределение заряда частиц аэрозоля. За счет многократно заряженных частиц максимум перемещается в сторону больших подвижностей, так что кажущийся размер частиц будет меньше истинного, а кажущаяся концентрация частиц больше истинной.

Детектором тока можно с удовлетворительной точностью определить параметры частиц входящего потока аэрозоля размерами менее 0,08 мкм при незначительной доле многократно заряженных частиц.

Л и т е р а т у р а

1. Мирме А.А., Тамм Э.И., Таммет Х.Ф. Электрогранулометр аэрозольных частиц с широким пределом измерения. - В настоящем сборнике.
2. Liu B.Y.H., Pui D.Y.H. A submicron aerosol standard and the primary, absolute calibration of the condensation nuclei counter. - J. Colloid and Interface Sci., 47, 161, 1974, pp. 155-171.
3. Liu B.Y.H., Pui D.Y.H. Electrical neutralization of aerosols. - Aerosol Sci., 5, 1974, pp. 465-472.
4. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 195, Тарту, 1967, 232 с.
5. Hoppel W.A. Determination of the aerosol size distribution from the mobility distribution of the charged fraction of aerosol. - J. of Aerosol Sci., 1978, 9, 161, pp. 41-54.

THE SYSTEM OF PRODUCING AND CHECKING
CALIBRATION AEROSOLS

U. Kikas and T. Bernotas

S u m m a r y

This paper deals with the production of calibration aerosols having a diameter range of $0.01 \dots 1 \mu\text{m}$ by electrical separation.

This process involves four stages:

- 1) initial generation of condensation aerosols,
- 2) neutralization of aerosols in a bipolar corona neutralizer,
- 3) electrical separation,
- 4) checking of particle size and concentration by electron-microscopy, by a detector of the aerosol current or by a photoelectrical nephelometer.

The experimental devices used at every stage are described. The output characteristics of the electrical classifier for a log-normal distribution of the condensation aerosol mobilities $f(k)$ have been calculated. An essential dependence of the output aerosol parameters on the width of the distribution $f(k)$ is shown.

СИСТЕМА ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЛАТЕКСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

В.Б. Тамме, В.А. Саммелсельг

Целью данной работы было получение калибровочных аэрозолей с размерами частиц 1...10 мкм (по диаметру) для калибровки электрогранулометра аэрозольных частиц, разработанного Проблемной лабораторией аэроионизации и электроаэрозолей ТГУ [1].

Вопрос калибровки фотоэлектрических аэрозольных приборов при помощи полистироловых (ПС) латексных аэрозолей хорошо изучен [2, 3]. В этих работах использовали сверхмалые счетные концентрации ПС частиц ($10...10^3 \text{ см}^{-3}$) и малые расходы аэрозоля ($20 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$). Чтобы получить достаточно сильный сигнал на выходе электрометров гранулометра, требуется повысить производительность генератора ПС частиц на 3...4 порядка (от 10 до $10^4...10^5 \text{ с}^{-1}$). Следовательно, надо работать с более концентрированными латексными суспензиями (до 10% ПС) или с большими расходами суспензии. Однако при этом в первом случае резко увеличивается концентрация агрегатов (т.е. слипшихся ПС частиц, состоящих из двух или более ПС частиц), а во втором случае "пустых" частиц (т.е. частиц, образованных из различных примесей в суспензии, не содержащих ПС частиц), что приводит к ухудшению монодисперсности аэрозоля. Кроме того, аэрозоль приходится нейтрализовывать в процессе распыления, чтобы привести распределение зарядов на частицах к распределению Больцмана [4].

Для выяснения оптимальных условий генерирования нейтральных латексных аэрозолей из концентрированных латексных суспензий разработана специальная система (рис. 1). Шприц-насос ($1...10 \text{ см}^3$) подает латексную суспензию (1...10% ПС) в распылитель (рис. 2) с постоянной объемной скоростью [5]. Непрерывное перемешивание ПС суспензии в ходе работы осуществляется электромагнитной мешалкой. Суспензию распыливают предварительно ионизированным сухим (относительная влажность 4%) и профильтрованным воздухом с избыточным давлением 0,1...0,2 МПа без преграды для сепарации больших капель распыля [2]. Полученный распыл сушат и нейтрализуют в закры-

том объеме (3000 см^3). Нами модифицированным способом распыления достигается большая экономия ПС суспензии.

Для избавления от агрегатов частиц аэрозоль пропускают через многоструйный импактор (50 отверстий с диаметром 1 мм). Для удаления "пустых" частиц предварительно в импакторе очищенный аэрозоль пропускают через диффузионную батарею (74 канала $0,17 \times 100 \times 360 \text{ мм}$). Принципы работы диффузионной батареи и инерциального импактора довольно подробно освещены в литературе [4, 6]. По этим работам сделаны конструктивные расчеты, а рабочие режимы установлены экспериментально. Далее разбавляют аэрозоль чистым сухим воздухом. Пробоотборник для электронного микроскопа присоединяют после генератора, импактора и диффузионной батареи.

Мы сравнивали аэрозольные частицы, образовавшиеся в результате испарения капель 2%-ного раствора хлористого натрия, диспергированного вышеуказанным распылителем и аэрозольным генератором [7]. Электронные микрофотографии этих частиц приведены соответственно на рис. За и Зб.

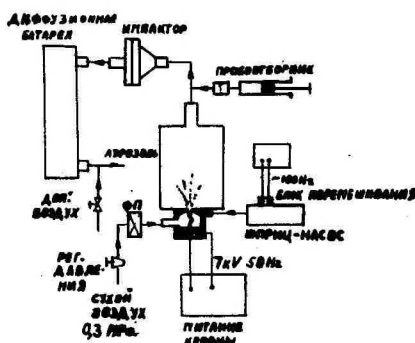


Рис. I. Система для генерирования латексных аэрозолей.

Были вычислены для обоих случаев средний диаметр \bar{d}_n и относительное среднеквадратичное отклонение s_d / \bar{d}_n сухих частиц. Размер капли раствора по размеру сухого остатка растворенного вещества вычислен по формуле:

$$d_k = d_n \sqrt{6 \rho_n \cdot 10^2 / \pi \rho_k c},$$

где d_k - диаметр капли раствора, d_n - диаметр частицы сухого остатка, ρ_n - плотность вещества частиц, ρ_k - плотность раствора, c - концентрация вещества в растворе.

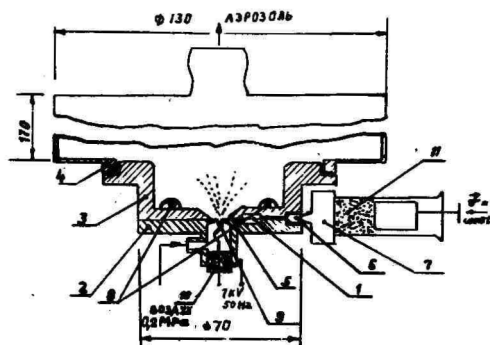
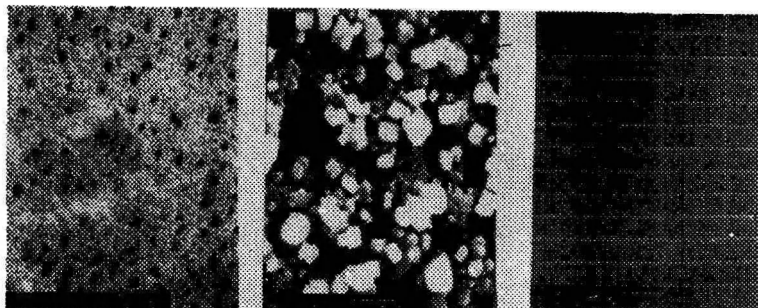


Рис. 2. Распылитель со шприц-насосом.
 I - фильтр, 2, 3 - корпус, 4 - камера
 нейтрализации, 5 - капилляр, 6 - инъекционная
 игла, 7 - шприц, 8 - винты, 9 - коронирующее
 острие. 10 - изолятор, 11 - латексная суспензия.



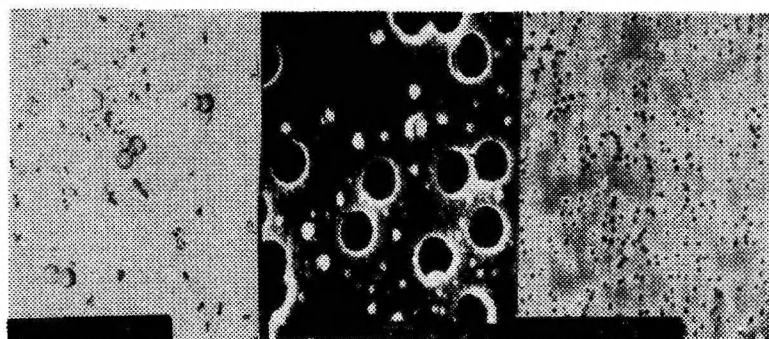
а) Частицы хлористого натрия от распылителя,
 увеличение 900х; б) частицы от аэрозольного ге-
 нератора, увеличение 3000х; в) реплика от диф-
 фракционной решетки, увеличение 5000х.

Основные параметры аэрозольных частиц, полученных от разных источников при избыточном давлении диспергирующего воздуха 0,1 МПа, представлены в таблице.

Таблица
Основные параметры аэрозольных частиц

Источник частиц Параметры	Аэрозольный генератор [7]	Распылитель
Средний диаметр частиц \bar{d}_n , мкм	1,49	3,91
Средний диаметр капель \bar{d}_k , мкм	8,79	23,16
s_d/\bar{d}_n	0,4712	0,1994

На основе этих данных можно сделать вывод: поскольку частицы от распылителя имеют суженный спектр размеров, этот распылитель пригоден для диспергирования более концентрированных латексных суспензий без значительного возрастания числа агрегатов ПС и "пустых" частиц [8, с. 62].



а) б) в)

Рис. 4. а) Латекс фирмы "Доу", увеличение 3000х; б) остатки бицистиллированной воды, большие черные круги на снимке - дырки фильтра, увеличение 50000х; в) латекс № 228, увеличение 1500х.

На рис. 4а приведена электронная микрофотография ПС латексов фирмы "Доу" (США) (в данном случае из агрегатов двух частиц) с диаметром 2,02 мкм. Маленькие частицы на фоне латексных шариков образовались в основном из стабилизатора. На заднем фоне видны дырки нуклеопорного фильтра. Видно, что по размерам "пустые" частицы существенно отличаются от ПС частиц, что дает основу для их отфильтрования при помощи

диффузионной батареей. "Пустых" частиц с размерами того же порядка, что частицы ПС [3], мы не обнаружили. Если использовать суспензию ПС частиц в обдистиллированной воде без стабилизатора, то образуются "пустые" частицы $\bar{d}_n \approx 0,01$ мкм и $s_d/\bar{d}_n = 0,38$ (рис. 4б). Таким образом, целесообразно использовать свежие латексные партии без стабилизатора. В этом случае срок сохранения их не более двух месяцев и требуется непрерывное перемешивание ПС суспензии в процессе распыления. На рис. 4в приведена фотография ПС частиц из партии № 228, изготовленной в Институте синтетического каучука в Ленинграде в 1980 г.); $\bar{d}_n = 2,76$ мкм, $s_d/\bar{d}_n = 0,053$. Частицы в виде кубиков, случайно попавшие на пробу, кристаллы хлористого натрия.

Электронные микрофотографии получены при помощи электронно-зондового микроанализатора типа JXA-50A фирмы "Джеол" (Япония). Пробы собирали на нуклеопорный фильтр с диаметром пор 0,13 мкм при помощи шприца объемом 200 см³ 1...3 раза. Пробы покрывали золотом методом катодного распыления в течение 15 мин. Для проверки увеличения микроскопа и для обработки проб на полуавтоматическом координатометре типа УТ-7410 снята реплика (рис. 3в) с дифракционной решетки с шагом 600 линий на 1 мм.

Фотографии обрабатывали на ЭВМ "Электроника" 63-18А по стандартным программам статистики.

Авторы выражают благодарность доценту кафедры охраны труда ЛИАПа В.И. Турубарову за полезные замечания по генерированию латексных аэрозолей и за любезное предоставление некоторых партий латексов, а также доценту кафедры общей физики ТГУ Э.И. Тамму за тщательное редактирование рукописи данной работы.

Л и т е р а т у р а

1. Мирме А.А., Тамм Э.И., Таммет Х.Ф. Электрический гранулометр аэрозольных частиц с широким пределом измерения. - В настоящем сборнике.
2. Jaenicke R. Comments on the generation of Polystyrene bead aerosols. - Aerosol sci., 1971, Vol. 2, pp. 401-404.
3. Fuchs N.A. Latex aerosols - caution! - Aerosol sci., 1973, Vol. 4, pp. 405-410.
4. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955, 351 с.

5. Liu B.Y.H., Lee K.W. An aerosol generator of high stability. - American Ind. Hyg. Ass. J., 36, 1975, No. 12.
6. Fuchs N.A. Aerosol impactors (a Review). Fundamentals of Aerosol Sci., 1978, pp. 83.
7. Виснапу Д.Ю., Талалай М.Л., Бердичевский Д.М. Аэрозольный генератор. Авт.св. СССР № 735257. Бюл. изобр., 1980, № 19, с. 16.
8. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли - пыли, дымы и туманы. Л., Химия, 1969, 426 с.

THE SYSTEM OF PRODUCING LATEX AEROSOLS

V. Tamme and V. Sammelselg

S u m m a r y

The authors have developed an aerosol generator which produces monodisperse polystyrene bead aerosols. To provide a constant flow of liquid feed to the atomizer, a syringe pump has been used. It appeared from the results of the experiments that the coefficient of variation of the syringe pump atomizer is 0.2 and that of the pneumatic sprayer with the separation of large droplets is 0.5. It made the syringe pump atomizer more suitable for the spraying of latex suspensions containing 10 per cent polystyrene beads. The neutralization of the electrical charges on aerosol particles has been performed by a corona-neutralizer. The values of particle diameters have been measured with an electronic-probe X-ray microanalyzer of the type JXA-50A.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЕННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СЛАБЫХ ТОКОВ

И. А. Цейль

1. Введение

Во многих областях науки все чаще встречается задача измерения слабых электрических токов порядка 10^{-8} А и ниже. При таких измерениях имеет особое значение проблема изоляции входных цепей измерительных устройств и выходных цепей источников измеряемых токов, т.к. изоляторы сами являются источниками электрических помех.

В литературе мало опубликовано результатов систематического исследования изоляционных материалов с точки зрения применения их в электрометрии в различных условиях и диапазонах измеряемого тока. Некоторые данные о свойствах более доступных изоляционных материалов опубликованы в статьях [1, 2].

Целью настоящей работы являлось комплексное исследование доступных и легко обрабатываемых изоляционных материалов применительно к измерению токов до 10^{-15} А в неблагоприятных условиях. Конкретной целью ставилось выяснение наиболее подходящего материала для изолирования собирающих обкладок измерительного конденсатора электрогранулометра аэрозольных частиц [4, 5]. Приведенные ниже результаты подробно описаны в работе [6].

2. Обзор основных свойств изоляционных материалов с точки зрения применения их в электрометрии

Основные требования, предъявляемые к изоляционному материалу, следующие: большое удельное сопротивление, низкий уровень генерируемых токов помех (шумов) и стойкость к климатическим воздействиям.

Кроме случайных шумов, изоляторы могут генерировать токи поляризации и деполяризации, возникающие при воздействии на изоляционный материал электрического поля или при механическом деформировании его.

На основе монографии Брауна [3] можно показать, что в общем случае зависимость плотности поляризационного тока от времени следующая:

$$j = \frac{\chi_2 E}{\tau} \int_0^{\infty} e^{-t/\tau} f(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\chi_2 E$ - максимальное (равновесное) значение поляризации в поле E , χ_2 - восприимчивость диэлектрика, τ - время релаксации, $f(\tau)$ - вероятность того, что произойдет процесс поляризации, время релаксации которого находится в промежутке $(\tau, \tau + d\tau)$.

Процессы, исследуемые в нашей работе, удалось довольно хорошо описать функцией

$$j = a_1 e^{-t/\tau_1} + a_2 e^{-t/\tau_2} + C. \quad (2)$$

Здесь C - ток проводимости, возникающий в изоляторе под действием электрического поля.

При исчезновении электрического поля происходит процесс депольризации, описываемый следующим образом:

$$j = -a'_1 e^{-t/\tau'_1} - a'_2 e^{-t/\tau'_2}, \quad (3)$$

где $a'_1 = a_1$, $a'_2 = a_2$, $\tau'_1 = \tau_1$, $\tau'_2 = \tau_2$.

Подобные процессы происходят в диэлектриках и при механическом деформировании (пьезоэффект).

Чем меньше величины a_1 , a_2 , τ_1 и τ_2 , тем меньше мешает поляризация изоляторов измерению. Отсюда вытекает еще одно требование к изоляционному материалу - малость этих величин.

3. Методика исследования

Исследования были проведены на кольцеобразных образцах из изоляционного материала, подходящего для применения в электрогранулометре, разработанном Проблемной лабораторией аэроионизации и электроаэрозолей (ПЛАЭ) ТГУ. Были исследованы следующие материалы (в скобках приведены употребляемые в дальнейшем условные обозначения):

качественно отлитый полипропилен	(К Ш)
плохо отлитый, с пузырьковыми включениями полипропилен	(П Ш)
термически обработанный полипропилен	(Т Ш)
дифлон	(ДШЛ)
термически обработанный дифлон	(Т ДШЛ)
прозрачный полистирол	(ПС)
ударопрочный полистирол	(УП ПС)
полиэтилен низкого давления	(ПЭ НД)
полиэтилен высокого давления	(ПЭ ВД)

Термическая обработка включала двухчасовую выдержку образцов в воздушном термостате при 100°C и медленное охлаждение их до комнатной температуры. Каждый кольцевой изолятор был смонтирован между двумя трубчатыми электродами. Деформацию в изоляторах вызывали падающим на внешний электрод грузом.



Рис. 1. Блок-схема измерительного комплекса.

Блок-схема измерительного комплекса изображена на рис.1. Частями комплекса являются электрометр (тип VA-J-5I.I, производство ГДР), программное устройство (ПУ), цифровой вольтметр (тип ВК7-10А), транскриптор (тип Ф5033), печатающее устройство (тип ЭУМ-23), перфоратор (тип ПД-80) и устройства для создания деформации изоляторов и приготовления влажного воздуха.

Цикл измерения происходит следующим образом. По сигналу ПУ открывается вход электрометра и начинается накопление заряда на емкости. Через определенное время, по сигналу ПУ, вольтметр измеряет сигнал на выходе электрометра, после чего вход последнего закорачивается. Кодированный сигнал с выхода вольтметра поступает в транскриптор, который перекодирует его для печатающего устройства и перфоратора и выдает команды последним для записи информации. После записи начинается новый цикл. В цикле измерения регистрируют заряд и в начале промежутка времени накопления заряда. Для того, чтобы отличать начальное показание от конечного, первое печатается красным, а второе черным цветом. Коды красного и черного

цветов перфорируются и перед соответствующими числами на перфоленту.

У изоляционных материалов измерены 1) зависимость генерируемого шумового тока от влажности воздуха; 2) зависимость тока поляризации в электрическом поле, тока деполяризации и тока поляризации при механическом деформировании от времени; 3) удельное сопротивление. Вся информация записывалась на перфоленту, обработка информации производилась на ЭВМ "Наири-К".

В первом случае был многократно измерен заряд, генерируемый изолятором за 7 с. Потом вычисляли арифметическое среднее и среднеквадратическое значения шумовых зарядов. Доверительные границы среднеквадратических значений были вычислены по критерию χ^2 .

Во втором случае регистрировали временной ход тока поляризации или деполяризации и вычисляли параметры a_1 , a_2 , τ_1 и τ_2 .

4. Результаты измерения

По данным, полученным при исследовании зависимости тока поляризации, деполяризации и пьезоэффекта от времени, составлена сводная таблица (табл. 1), в которую внесены амплитуды a_1 и a_2 экспоненциальных функций в формулах (2) и (3) и соответствующие времена релаксации τ_1 и τ_2 .

Зависимость среднеквадратического шума от относительной влажности воздуха для всех десяти материалов представлена в табл. 2.

Удельные сопротивления материалов, вычисленные по значениям параметра C функции (2), приведены в табл. 3.

5. Обсуждение результатов

На основании данных табл. 1...3 составлен ряд по степени преимущества изоляционных материалов с точки зрения применения их при измерении слабых токов.

Материалы по каждому промеренному свойству оценивали по десятибальной системе, оценки перемножали на весовые коэффициенты, и затем суммировали все оценки для каждого материала. Были выбраны следующие весовые коэффициенты: для влагостойкости - 3, для всех релаксационных процессов - 2, для удельного сопротивления - 1. Таким образом получен следующий ряд:

К ШИ	69,5	Т ДИФЛ	39
ПЭ ВД	65	ФТ-4	36
ПЭ НД	63	ДИФЛ	31

Таблица I

Параметры релаксационных процессов

Материал	Поляризация				Деполяризация				Пьезоэффект			
	$a_1, 10^{-15} \text{ A}$	$a_2, 10^{-15} \text{ A}$	$\tau_1, \text{ c}$	$\tau_2, \text{ c}$	$a_1, 10^{-15} \text{ A}$	$a_2, 10^{-15} \text{ A}$	$\tau_1, \text{ c}$	$\tau_2, \text{ c}$	$a_1, 10^{-15} \text{ A}$	$a_2, 10^{-15} \text{ A}$	$\tau_1, \text{ c}$	$\tau_2, \text{ c}$
П Ш	3,71	3,71	31,3	283	-3,36	-3,36	26,8	241	185	151	6,46	38,0
К Ш	1,36	1,67	13,9	125	-3,69	-3,69	12,8	117	94,4	94,4	5,40	10,1
Т Ш	3,72	3,72	14,2	311	-2,58	-2,58	32,2	184	59,1	72,3	6,55	36,5
ДИФЛ	13,0	13,0	46,0	415	-14,9	-14,9	43,9	394	93,2	140	10,2	95,0
Т ДИФЛ	11,6	11,6	43,1	244	-10,7	-10,7	37,1	214	91,9	61,2	12,7	73,1
УП ПС	10,6	8,70	15,2	288	-7,61	-7,61	13,3	121	588	481	9,13	27,9
ПС	25,3	25,3	29,7	168	-20,5	-20,5	25,7	148	95,2	95,2	10,1	95,0
ПЭ ВД	1,17	1,43	7,20	54,3	-3,15	-3,15	5,50	104	144	176	2,76	25,0
ПЭ НД	2,36	2,89	9,30	83,9	-2,43	-2,43	5,80	32	140	140	7,54	7,54
ФТ-4	4,67	4,67	33,6	302	-4,84	-4,84	24,7	227	133	133	5,28	20,9

Таблица 2

Влияние влажности на шумы

Влажность, %	55	70	80	90	100
Материал	Ток шумов, * 10^{-17} А				
П Ш	52,0	253	489	1101	1427
К Ш	57,8	73,8	88,3	276	326
Т Ш	70,0	135	238	299	386
ДИФЛ	82,8	93,4	148	247	837
Т ДИФЛ	62,8	198	276	452	488
УП ПС	70,6	78,7	102	242	289
ПЭ ВД	66,4	85,8	106	174	244
ПЭ НД	49,5	81,4	195	204	221
ФТ-4	77,8	174	426	523	1277

* Токи шумов с доверительным уровнем 95% находятся в пределах, определяемых умножением приведенных значений на 0,84 и 1,24.

Таблица 3

Удельные сопротивления изоляционных материалов

Материал	ρ , Ом · м	Материал	ρ , Ом · м
П Ш	6×10^{15}	УП ПС	3×10^{15}
К Ш	4×10^{16}	ПС	4×10^{15}
Т Ш	10^{16}	ПЭ ВД	7×10^{15}
ДИФЛ	3×10^{15}	ПЭ НД	2×10^{16}
Т ДИФЛ	5×10^{15}	ФТ-4	10^{16}

Т III	55	ПС	26,5
УП ПС	40	П III	26.

Наилучшим изоляционным материалом для электрогранулометров оказался качественно отлитый полипропилен без дополнительной термической обработки. Подходит и ПЭ НД. ПЭ ВД негоден из-за плохих механических свойств (мягкость). Широко применяемый ПС оказался негодным, в основном из-за хрупкости. В изоляторе появились трещины, ухудшающие свойства его поверхности. Поверхности ФТ-4 и П III тоже низкого качества, потому что фторопластовый изолятор был не отлитый, а изготовлен на токарном станке, а у полипропилена на поверхности оказались следы лопнувших пузырьков.

Оказалось, что термообработка в некоторой мере улучшает механо-электрические свойства некоторых материалов (например, ДИОЛ), но без специального исследования ее применять не следует (свойства ПIII не улучшились).

К сожалению, невозможно было исследовать такие материалы как, например, сапфир и янтарь. Для входных цепей электрометров они применяются часто. Но это дефицитные, драгоценные и труднообрабатываемые материалы. Так как собирающие обкладки и изоляторы измерительных конденсаторов электрогранулометра большие по размерам, применение сапфира и янтаря неэкономично. Кроме того, всем известны большой трибоэлектрический эффект и хрупкость янтаря.

По приведенным здесь результатам исследования материалов для изолирования собирающих обкладок измерительного конденсатора электрогранулометра аэрозольных частиц был выбран полипропилен.

Л и т е р а т у р а

1. Miles R. Supersensitive measurement demands critical input design. - "Electronics", 1979, vol. 52, No. 20, p. 145-149.
2. Щуклин К.С. Опыт создания специальных элементов и узлов для входных цепей электрометров. - Труды ВНИИЭТРИ, вып. I(3I), М., 1970, с. 166-196.
3. Браун В. Диэлектрики. М., изд-во иностранной литературы, 1961, 326 с.
4. Таммет Х.Ф. Об электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 30-33.
5. Таммет Х.Ф. К технике электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 534, Тарту,

1980, с. 55-79.

6. Пейль И.А. Сравнительное исследование изоляционных материалов с точки зрения применения их при измерении слабых токов (конкурсная работа). ТГУ, кафедра общей физики, Проблемная лаборатория аэроионизации и электроаэрозоль. Тарту, 1980, 80 с. (рукопись).

THE STUDY OF INSULATING MATERIALS TO BE APPLIED
FOR MEASURING LOW-LEVEL CURRENTS

I. Peil

S u m m a r y

The author of the present paper has studied a number of insulating materials which are commercially available and can be easily processed from the point of view of their applicability to the measurement of low-level currents. The particular aim of the study was to establish the most suitable material for insulators of charge-collecting electrodes of the measuring condenser of the electric granulometer of aerosol particles. The subjects of study were ten different polymers or differently processed polymers. In all of them were measured: 1) dependence on the air humidity of the noises generated (Table 1); 2) dependence of polarisation and depolarisation currents on time after mechanical deformation and after being influenced by an electric field (the parameters of the approximation function of these processes are given in Table 2); 3) specific resistance (Table 3).

The insulating materials were arranged according to their applicability to the measuring of low-level currents on the basis of the results of measurements. The most suitable insulating material was properly cast polypropylene without additional thermal processing; the worst insulating material included polypropylene with air-bubbles.

О ВЫБОРЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ И ЕЕ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МАЛЫХ ТОКОВ

М.Х. Ансо

При анализе быстродействия электрометрических измерителей малых токов (электрометров) в [1] было сделано допущение, что модуль коэффициента усиления электрометрического усилителя $|K(j\omega)|$ стремится к бесконечности ($K(j\omega) \rightarrow \infty$) на всех частотах ω ($\omega \in (0, \infty)$). Оказалось, что возможности повышения быстродействия электрометров с упрощенной таким образом функцией передачи методами частотнозависимой обратной связи (ЧОС) и умножения операторных чувствительностей (УОЧ) одинаковы. Было показано, что главной причиной, обуславливающей динамические погрешности электрометров, является несоответствие характеристик коррекционного звена с характеристиками импеданса в цепи обратной связи. При более точном совпадении этих характеристик в [1] динамическую погрешность электрометра удалось значительно уменьшить. Однако в то же время более важную роль в общей динамической погрешности $|\delta\varphi|$ стала играть составляющая, обусловленная реальным усилителем $|\delta\varphi_y|$, что в [1] не подвергалось анализу.

Попытаемся проделать это здесь.

На рис. 1 изображена блок-схема электрометра, в которой последовательно электрометрическому усилителю (ЭУ) включен операционный усилитель (ОУ). Оба усилителя охвачены отрицательной обратной связью с коэффициентами обратной связи соответственно β и α . Функция передачи φ этого электрометра имеет вид:

$$\varphi = \frac{z_1}{\alpha\beta} \cdot \frac{K_y\beta}{1 + K_y\beta}, \quad (1)$$

где

$$y = \frac{z_2}{z_1 + z_2}, \quad (2)$$

K — коэффициент усиления ЭУ.

Коэффициент усиления ОУ считаем бесконечным на всех частотах.

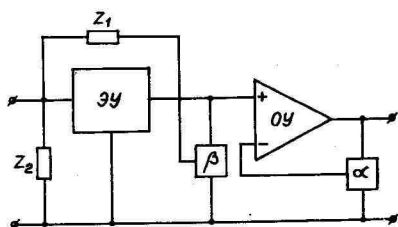


Рис. 1. Блок-схема электрометра с коррекцией динамических характеристик.

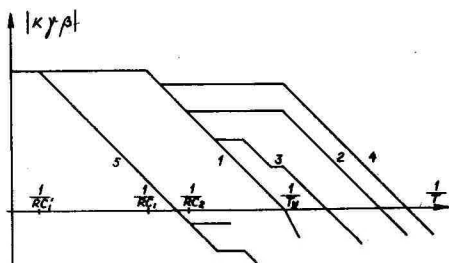


Рис. 2. Диаграммы Бode ЗУ.

Функцию (1) можно разделить на две части: \mathcal{G}_z и \mathcal{G}_y , так что

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}_z \cdot \mathcal{G}_y, \quad (3a)$$

$$\mathcal{G}_z = z_1 / \alpha \beta,$$

$$\mathcal{G}_y = K \gamma \beta / (1 + K \gamma \beta). \quad (3b)$$

Если предположить, что в этих формулах $\beta = 1$, $\alpha = \alpha(j\omega)$, то схема соответствует одной из разновидностей компенсации методом УОЧ; если $\beta = \beta(j\omega)$, $\alpha \neq \alpha(j\omega)$ — получим схему компенсации при помощи ЧОС. В последнем случае ОУ может вообще отсутствовать или выполнять роль масштабного множителя. Возможна также комбинация этих методов таким образом, что $\alpha = \alpha(j\omega)$, $\beta = \beta(j\omega)$.

Под погрешностью $|\delta \mathcal{G}_y|$, обусловленной ЗУ, будем понимать модуль отклонения \mathcal{G}_y от единицы, вернее, в данной работе отклонение единицы от \mathcal{G}_y , что в сущности дела не меняет, но позволит получить результаты более наглядные:

$$|\delta \mathcal{G}_y| = |(1 - \mathcal{G}_y) / \mathcal{G}_y|. \quad (4a)$$

Аналогично $|\delta\varphi_y|$ погрешность $\delta\varphi_z$, обусловленную несоответствием характеристик коррекционных звеньев α , β и импеданса z_1 , в цепи обратной связи можно выразить

$$|\delta\varphi_z| = \left| (1 - \varphi_z) / \varphi_z \right|. \quad (4б)$$

На основе (3б) и (4а) получим

$$|\delta\varphi_y| = 1 / |K\gamma\beta|. \quad (5)$$

$|K\gamma\beta|$ есть не что иное, как модуль коэффициента передачи ЭУ по разомкнутой петле обратной связи, наклон пересечения которого с линией единичного усиления определяет степень устойчивости усилителя. Следовательно, при проектировании электрометра придется найти из класса функций $|K\gamma\beta|$, обеспечивающих устойчивость, ту, что обеспечит также необходимую точность. Как правило, оптимальным считают усилитель, для которого $|\delta\varphi_z| \approx (2 \dots 5) |\delta\varphi_y|$ [2]. В настоящее время вряд ли удастся получить динамическую точность электрометра выше нескольких процентов (отсутствуют также методы и средства для ее более точного определения), поэтому достаточно иметь $|K\gamma\beta|$ порядка нескольких сот во всей рабочей полосе частот электрометра.

Далее предположим, что

$$K = K_0 / (T_y j\omega + 1), \quad (6)$$

$$z_2 = 1 / C_1 j\omega.$$

Считаем также, что $T_y > RC_1$, где R — омическая составляющая импеданса z_1 . Такое соотношение T_y и RC_1 характерно для ЭУ с непосредственной связью между каскадами при измерительных резисторах с сопротивлением порядка $10^9 \dots 10^{12}$ Ом.

Рассчитаем $K\gamma\beta$ для трех видов z_1 . Во-первых, $z_1 = R$. Хотя из-за неизбежных паразитных емкостей в цепи обратной связи z_1 никогда не будет чисто омическим, в ряде практических случаев, как выяснится ниже (C_T большая, коррекция производится при помощи ЧОС), формула для $K\gamma\beta$ в неплохом приближении совпадает с полученной здесь формулой. Во-вторых, $z_1' = R / (RC_2 j\omega + 1)$, где C_2 — емкость, включенная параллельно измерительному резистору. Такой импеданс z_1' реализуется, если емкость C_2 велика и прибегать к более точной эквивалентной схеме [I] резистора нет смысла. В-третьих,

$$z_1'' = R \frac{T_2 j\omega + 1}{(T_1 j\omega + 1)(T_3 j\omega + 1)}.$$

Это выражение для импеданса резистора по [I].

Пусть $\beta = I$, $\alpha = z_1/R$ (коррекция осуществляется методом ЧОЧ). Для приведенных выше z_1 получим соответственно:

$$K\gamma\beta = \frac{R}{RC_1 j\omega + 1} \cdot \frac{K_0}{T_y j\omega + 1}, \quad (7)$$

$$K\gamma\beta = \frac{RK_0(RC_2 j\omega + 1)}{(RC_1 j\omega + 1)(T_y j\omega + 1)}, \quad (8)$$

$$K\gamma\beta = \frac{RK_0(T_2 j\omega + 1)}{(T_1 j\omega + 1)(T_3 j\omega + 1)(T_y j\omega + 1)}. \quad (9)$$

На рис. 2 приведены диаграммы Бode для данных $K\gamma\beta$ (кривые 1, 2, 3 соответственно). Легко заметить, что спад кривых 2 и 3 по сравнению с кривой 1 на высоких частотах более медленный. Согласно (5) в этих случаях и на этих частотах погрешность $|\delta\varphi_y|$ меньше. Увеличение C_2 для второго случая (формула (8)) приведет к еще более медленному росту $|\delta\varphi_y|$ на высоких частотах (кривая 4 на рис. 2). Наоборот, увеличение C_1 приведет к более быстрому уменьшению $|K\gamma\beta|$ (увеличению $|\delta\varphi_y|$) для всех видов z_1 (кривая 5).

Если RC_1 превышает все остальные постоянные времени в выражениях для $K\gamma\beta$ более, чем в K_0 раз, то для расчета погрешности $|\delta\varphi_y|$ и устойчивости электрометра достаточно приближения $z_1 = R$ (как уже было отмечено). Действительно, по кривой 5 видно, что $|K\gamma\beta|$ пересекает линию единичного усиления левее этих значений постоянных времени, что, следовательно, на устойчивость и $|\delta\varphi_y|$ влияет слабо.

При коррекции методом ЧОС считаем, что $\alpha = I$, $\beta = z_1/R$. Формула для $K\gamma\beta$ при $z_1 = R$ явно совпадает с формулой (7). Для второго и третьего случая получим соответственно

$$K\gamma'\beta = \frac{K_0}{(T_y j\omega + 1)[R(C_1 + C_2)j\omega + 1]}, \quad (10)$$

$$K\gamma''\beta = \frac{K_0(T_2 j\omega + 1)}{(T_y j\omega + 1)[(RC_1 T_2 + T_1 T_3)(j\omega)^2 + (RC_1 + T_1 + T_3)j\omega + 1]}. \quad (11)$$

Если $C_2 \ll C_1$, то в формуле (10) можно сделать замену: $C_1 + C_2 \rightarrow C_1$. Аналогично, если в (11) $RC_1 T_2 \gg T_1 > T_2 > T_3$ [I].

то можно заменить $R C_I T_2 + T_I T_3 \rightarrow R C T_2, R C_I + T_I + T_3 \rightarrow R C_I + T_2$.

Эти замены приводят (I0) и (II) к виду (7). Следовательно, коррекция методом ЧОС приведет к увеличению $\delta \varphi_y$.

Резюмируя сделанное, можем сказать, что, с точки зрения погрешности $\delta \varphi_y$, более предпочтительной будет коррекция методом УОЧ. При больших входных емкостях C_I можно уменьшить $\delta \varphi_y$ путем увеличения C_2 . Однако здесь следует иметь в виду, что чрезмерное увеличение C_2 по сравнению с C_I приведет к заметному увеличению шума, а также к увеличению абсолютной неустойчивости C_I . Последнее усложняет коррекцию методом УОЧ.

Для обеспечения устойчивости с $K_y \beta$, вычисленным по формуле (7), постоянные времени $R C_I$ и T_y должны находиться в следующем соотношении:

$$R C_2 \gg T_y K_0. \quad (12)$$

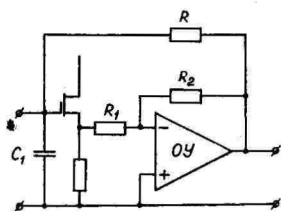


Рис. 3. Схема электрометрического усилителя.

На рис. 3 изображена схема электрометрического усилителя, в котором T_y и K_0 подчиняются в определенной мере контролю путем измерения глубины внутренней обратной связи $\alpha_1 = R_1 / (R_1 + R_2)$. Если полоса пропускания повторителя широкая, то коэффициент определяется коэффициентом передачи ОУ

$$K = K_0 / (T_y j\omega + 1) = K_1 \alpha / (K_1 \alpha T_{cp} j\omega + 1), \quad (13)$$

где K_1 — коэффициент передачи ОУ без обратной связи,
 $1/T_{cp}$ — частота среза ОУ.

Из (13) получим

$$K_0 = K_1 \alpha,$$

$$T_y = K_1 \alpha T_{cp}.$$

Подставляя эти выражения в (12), можем определить α_1 , необходимое для выполнения (12)

$$\alpha = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{RC_1}{T_{cp}}}$$

При $K_{y\beta}$ более сложной формы (формулы (8), (9)) не удается привести столь простого соотношения для выбора α_1 . Тем не менее полезно заметить, что если в формуле (8) $RC_2 = T_y$, то усилитель устойчив при всех C_I . Равенство RC_2 и T_y однако не обязательно будет оптимальным с точки зрения минимальной погрешности $|\delta q_y|$. Оптимизацию $K_{y\beta}$ по (8) и (9) следует провести графоаналитически для каждого случая отдельно.

В данной работе мы предполагали, что K выражается согласно формуле (6). При необходимости можно применять также усилители с иной частотной зависимостью коэффициента усиления (применение частотнозависимой коррекции в усилителе, структурные сочетания нескольких усилителей и т.д.). Общий подход к проблеме уменьшения $|\delta q_y|$ при этом не изменяется, и проблема по-прежнему состоит в соответствующем переформировании $K_{y\beta}$.

На рис. 4 приведены осциллограммы переходных функций $q(t)$ и $q_y(t)$ электрометра, ЭУ которого был собран по структуре, приведенной на рис. 3. В качестве ОУ была применена микросхема К140УД8Б, входная емкость C_I составляла несколько пикофард, $R = 1000 \text{ Ом}$, $\alpha_1 = 0,0001$. $q(t)$ определена на выходе электрометра (на выходе ОУ согласно рис. 1) при подаче на вход электрометра тока ступенчатой формы. $q_y(t)$ определена на выходе ЭУ при подаче напряжения ступенчатой формы в цепь обратной связи электрометра согласно методике, предложенной в [2].

В случае коррекции методом ЧОС (кривые а и б)

$$\begin{cases} \alpha = 1, \\ \beta = \frac{z_1}{R} = \frac{(T_2 j\omega + 1)}{(T_1 j\omega + 1)(T_3 j\omega + 1)}, \end{cases}$$

а в случае коррекции методом УОЧ (кривые в и г)

$$\begin{cases} \alpha = \frac{z_1}{R} = \frac{(T_2 j\omega + 1)}{(T_1 j\omega + 1)(T_3 j\omega + 1)}, \\ \beta = 1. \end{cases}$$

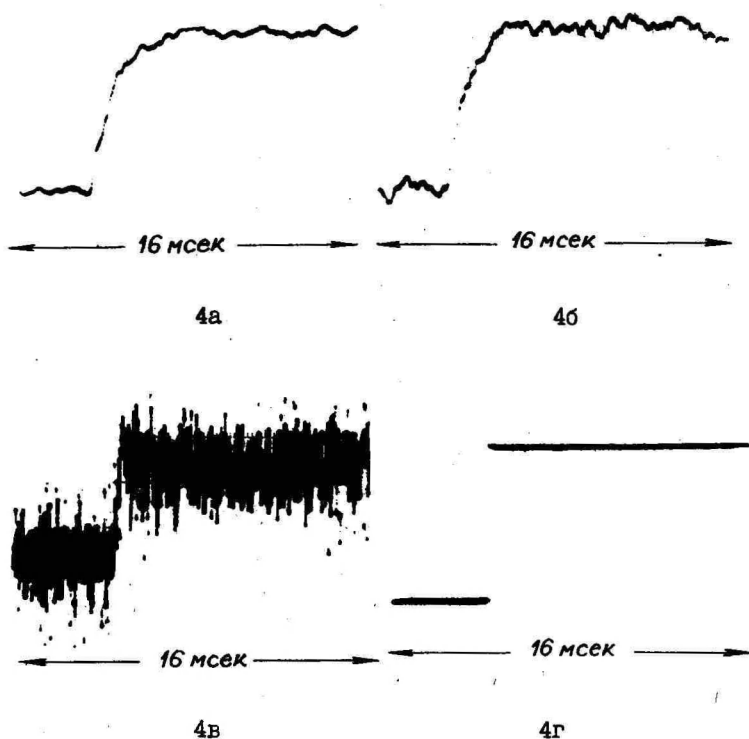


Рис. 4. Экспериментальные кривые реакции электрометра на ступенчатое измерение входного тока (кривые а, в) и ЭУ на ступенчатое изменение напряжения, введенного в цепь обратной связи (кривые б, г), полученные при коррекции методом ЧОС (кривые а, б) и методом УОЧ (кривые в, г).

Видно, что при коррекции методом УОЧ получено значительно большее быстродействие (кривая в), чем при коррекции методом ЧОС (кривая а), хотя \mathcal{S}_Z по формуле (3а) в обоих случаях оставалась неизменной. Обусловлено это меньшей инерционностью собственно ЭУ для метода УОЧ (кривая г) по сравнению с инерционностью собственно ЭУ для метода ЧОС (кривая б), как это выяснилось также из вышеприведенного теоретического анализа.

Л и т е р а т у р а

1. Ансо М.Х. Методы повышения быстродействия электрометрических измерителей малых токов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 534, Тарту, 1980, с. 3-15.
2. Полонников Д.Е. Решающие усилители, М., Энергия, 1973, 246 с.

ON THE CHOICE OF A STRUCTURAL SCHEME AND OF ITS PARAMETERS FOR HIGH-SPEED MICROCURRENT METERS

M. Anso

S u m m a r y

It will be seen from this paper that the transfer function of an electrometer consists of two multipliers. The first multiplier does not depend on the parameters of the amplifier used in the electrometer. The second multiplier describes the dynamics of the electrometer amplifier. An analysis of this multiplier reveals that the transfer function correction by means of the method of multiplying the transfer function of the electrometer and that of a correcting circuit produces a smaller dynamic error of the electrometer than the lagging-feedback method.

Some practical advice and experimental results are presented.

К РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОМЕТРОВ ПРЯМОГО УСИЛИЕНИЯ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ АЭРОИОНОВ

Ф.Г. Миллер

До недавнего времени в счетчиках аэроионов, а также в другой исследовательской аппаратуре для измерения электрических характеристик воздуха, применялись почти исключительно электрометры с динамическими конденсаторами [1, 2]. В последние годы, в связи с появлением транзисторов структуры МОП (КП 305 и др.), имеется возможность в тех случаях, когда измеряемые токи не менее 10^{-15} А, полностью переориентироваться на электрометры прямого усиления, успешно заменяющие динамические электрометры [3...10]. Целью настоящей работы являлось создание компактного, простого в изготовлении и достаточно качественного входного блока электрометра, предназначенного для применения в многоканальном спектрометре аэрозольных частиц. Входные блоки должны обеспечивать измерение тока начиная с 10^{-15} А и выдерживать перегрузки порядка 0,5...1 кВ на входе.

Транзисторы КП 305, применяемые в электрометрических усилителях, отличаются значительным разбросом величины паразитного тока затвора (10^{-17} ... 10^{-11} А). Для выбора транзисторов по току затвора был построен соответствующий измерительный стенд, работающий по принципу накопления заряда на входной емкости транзистора (рис. 1).

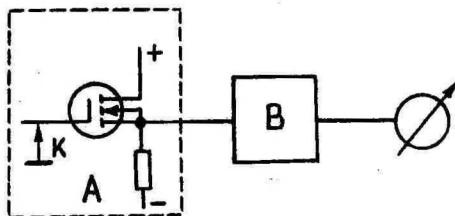


Рис. 1. Блок-схема стенда измерения паразитного тока затвора транзисторов (А - исследуемый транзистор в экране, В - измерительный блок).

С целью уменьшения погрешности измерений гнездо подключения исследуемого транзистора сделано так, что вывод затвора касается только подвижного контакта заземления К (рис. I, при заземлении входа). При измерении тока затвора контакт К размыкается и при помощи блока В регистрируется скорость изменения напряжения на истоке, что позволяет, зная входную емкость, определять ток затвора. Блок В состоит из двухполярного логарифмирующего дифференциатора (логарифмирующий элемент — транзисторы КТ 3102), позволяющего непосредственно по показанию микроамперметра оценить величину и знак тока затвора. Предусмотрена также работа в режиме милливольтметра.

Непосредственно перед работой на выводы транзисторов не должны действовать механические нагрузки, могущие вызвать поляризацию изолятора транзистора. Поэтому выводы транзисторов освобождали от закорачивающих трубочек и выпрямляли их не ранее, чем за 24 часа перед измерением. Не деформируя выводов, транзисторы устанавливали в гнездо стенда при помощи специального пинцета. Некоторое время (обычно не менее 5 мин) до измерения тока затвора транзисторы держали в рабочем режиме для уменьшения влияния на результат различных явлений, обусловленных свойствами транзисторов и появляющихся непосредственно после подачи питающих напряжений и больших входных сигналов (поляризация, так называемый эффект памяти). Для иллюстрации ниже приводится зависимость тока затвора от времени после включения питания двух произвольно выбранных транзисторов КП 305 (рис. 2).

Величина тока затвора транзистора КП 305 в большой степени определяется материалом и технологией изготовления изолятора его корпуса. Наименьший ток затвора (порядка $10^{-17} \dots 10^{-16}$ А) имеют транзисторы с керамическими изоляторами без лакового покрытия. Ток затвора транзисторов, керамические изоляторы которых покрыты лаком, несколько больше (порядка $10^{-16} \dots 10^{-15}$ А). В последнее время выпускаются КП 305 в стандартных корпусах с изоляторами из сплавленного стекла. Ток затвора этих транзисторов значительно больше и может иметь значения, нормируемые техническими условиями, порядка 10^{-12} А.

По имеющимся экспериментальным данным ток затвора мало зависит от конкретного типа транзистора КП 305 (А...Ж), но имеет сильную зависимость от конкретной партии выпуска.

Ниже приведены распределения транзисторов КП 305 Ж с

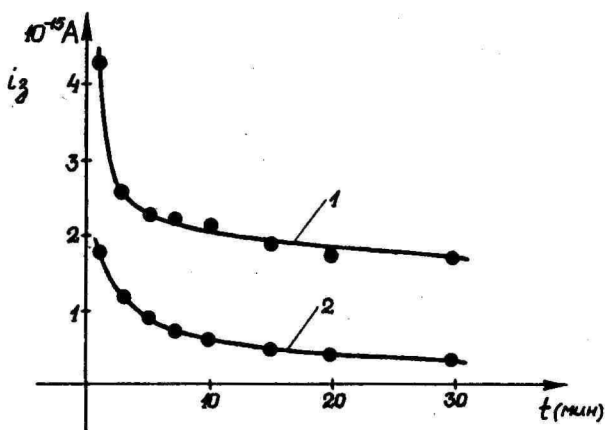


Рис. 2. Зависимость тока затвора от времени после включения питания. 1 - транзистор КП 305 со стеклянным изолятором, 2 - транзистор КП 305 с керамическим изолятором с лаковым покрытием.

керамическими (табл. 1) и стеклянными (табл. 2) изоляторами по токам затвора. Токи измеряли в равных условиях, через 5 мин после подачи напряжений питания. Общее количество экземпляров обоих вариантов изготовления транзисторов - около 50 шт. каждого.

Таблица 1

Распределение транзисторов КП 305 Ж с керамическими изоляторами с лаковым покрытием (выпуска 12.1976 г.) по токам затвора

Ток затвора, А	$< 10^{-16}$	$10^{-16} \dots 10^{-15}$	$10^{-15} \dots 10^{-14}$	$> 10^{-14}$
%	23,5	59	17,6	0

Стабильность нулевого уровня электрометра в значительной степени определяется температурным дрейфом параметров входного каскада. Получить достаточную стабильность нуля удастся при соответствующем подборе термокомпенсирующих элементов схемы, а также термостатированием. Однако использование транзисторов КП 305 в так называемой термостабильной точке позволяет в некоторых случаях отказаться от специальной термокомпенсации. Многочисленные измерения термических параметров КП 305 показали, что применение дифференциального

каскада значительно улучшает термостабильность лишь при подборе входных транзисторов с близкими термическими характеристиками. Применение же случайных экземпляров не всегда оправдано, так как транзисторы из одной заводской упаковки, подобранные по статическим характеристикам, могут иметь даже разные знаки температурных коэффициентов.

В табл. 3 приведены параметры термостабильных точек одиннадцати произвольно (из одной заводской упаковки) выбранных транзисторов КП 305 Е выпуска 06.1977 г., имеющих керамические изоляторы и токи затвора в пределах $(1...5) \cdot 10^{-16}$ А.

Подбирая режим работы входного транзистора вблизи термостабильной точки, можно добиться уменьшения дрейфа нуля усилителя, например, до $(0,5...1) \cdot 10^{-15}$ А за 10 часов работы в комнатных условиях. Для выравнивания температур корпус входного транзистора лучше термически соединить с корпусом операционного усилителя, применяемого в электрометре. В целях уменьшения шума желательно подобрать экземпляр КП 305 с малым значением тока стока термостабильного режима.

В спектрометре аэрозольных частиц применяется циклический режим работы, где дрейф нуля учитывается при цифровой обработке. Поэтому в схеме разработанных электрометрических предусилителей специальных мер по улучшению температурной стабильности не применяли. Ввиду того, что входные блоки изготавливали в довольно больших количествах, была выбрана простейшая схема с минимальным числом деталей (рис. 3).

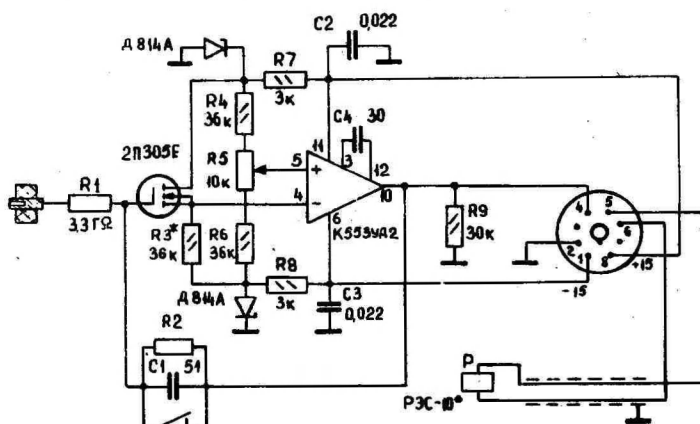


Рис. 3. Принципиальная схема входного блока.

Таблица 2

Распределение транзисторов КТ 305 И со стеклянными изоляторами
(выпуска 03.1980 г.) по токам затвора

Ток затвора, А	$< 10^{-16}$	$10^{-16} \dots 10^{-15}$	$10^{-15} \dots 10^{-14}$	$10^{-14} \dots 10^{-13}$	$> 10^{-13}$
%	0	16	29	32	23

Таблица 3

Значения параметров термостабильного режима транзисторов КТ 305 Е

№ экз.	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
I_C , мА	15,5	11	4,7	5,4	3,6	5,6	6,4	12,2	7,5	14,5	4,5
U_B , В	+1,5	+0,8	-0,3	0	0	+0,3	0	+0,5	+0,15	+1	-0,3

Для защиты входного транзистора от пробоя при возможной перегрузке на входе использованы замедляющая цепь $R_T - C_T$ и реле Р. Контакты реле замыкаются, если сигнал или скорость его роста на выходе операционного усилителя выходит за пределы, определяемые схемой защиты, которая находится в блоке автоматике спектрометра и выполнена на микросхемах 155-ой серии.

В качестве R_T (рис. 3) применены переделанные резисторы КВМ 3,3 Ом, которые для уменьшения габаритов обработаны следующим образом. Сначала осторожно удалили стеклянный корпус, и резистор погружали в лак Ко-815. Далее последовала сушка при 60°C в течение 8...10 часов. Выводы резисторов очищали от лака и окиси меди, не оказывая при этом механических нагрузок на резистор. В результате обработки сопротивление резистора возрастало в среднем на 7,1% и за следующие два года еще около 10%. Однако нестабильность сопротивления не влияет на точность измерения, так как R_T применяется только для защиты транзистора. Время срабатывания защитного реле Р (рис. 3) определяется механическими свойствами реле и у всех собранных блоков находилось между 0,88 и 1,7 мс, среднее значение 1,2 мс. Блоки выдерживают импульсные перегрузки до 500...1500 В, что вызывает лишь поляризацию входного изолятора и некоторое изменение величины сопротивления R_T . Хотя включение R_T последовательно со входом увеличивает входное сопротивление блока, оно необходимо для защиты от перегрузки измерительного резистора R_2 .

Конструкция электрометрических предусилителей, предназначенных для спектрометра, выполнена в виде цилиндра с октальным проколом, имеющим диаметр 32 мм и длину около 100 мм. На одной стороне монтажной платы, находящейся внутри цилиндра, размещены низкоомные (рис. 4), а на другой - высокоомные цепи блока. Медная фольга на стороне электрометрической части служит экраном. Для уменьшения суммарного паразитного тока и вибромодуляционных помех монтаж входных цепей сделан по возможности жестким и применен лишь один изолятор - входной из янтаря. Опорными точками монтажа электрометрической части служат непосредственно детали схемы C_T и R_2 (типа Ю и КВМ соответственно), а изолятором контактов реле Р, замыкающих измерительный резистор, является изолятор входного транзистора КИ 305. К якорю реле РЭС-10, обмотка и магнитопровод которого применены в конструкции, припаявается позолоченный пружинящий контакт (отрезок от вывода транзистора).

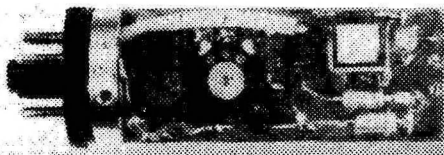


Рис. 4. Монтажная плата электрометрического предусилителя.

Другим контактом реле является вывод затвора транзистора КП 305. Соответствующей регулировкой пружинящего контакта можно обеспечить бездребезговую и самоочищающуюся работу контактов. Суммарная величина помехи, обусловленной набросом заряда при размыкании контактов, и помехи от обмотки реле обычно не превышала $1,5 \cdot 10^{-14}$ Кл.

Суммарные значения паразитных токов входных цепей у большинства из 64 собранных блоков не превышали $(0,3 \dots 1) \cdot 10^{-15}$ А. Дрейф нуля при работе в лабораторных условиях, где температура примерно постоянна, был в среднем не более $0,25 \cdot 10^{-15}$ А/час. Величина шума при сопротивлении измерительного резистора 10^{12} Ом и постоянной времени порядка 50 с колеблется в зависимости от экземпляра блока в пределах $(1 \dots 4) \cdot 10^{-16}$ А (двойная амплитуда). Запись шумов и дрейфа нуля, сделанная при работе в лабораторных условиях, показана на рис. 5.

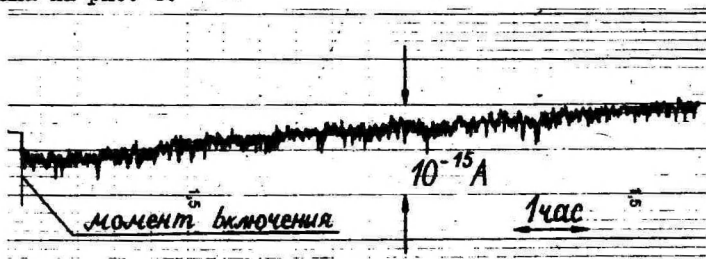


Рис. 5. Диаграмма записи дрейфа и шумов усилителя ($R_{0.c.} = 10^{12}$ Ом, $\tau = 50$ с).

Описанные электрометры на КИ 305, а также приборы, имеющие более совершенные схемы (термокомпенсация при помощи кремниевого диода или термистора, цепи установки и постоянной цепи обратной связи и др.), были разработаны и применяются в различной аппаратуре для измерения электрических свойств воздуха, например, в универсальных счетчиках и

спектрометрах аэроионов, в различных измерителях электропроводности воздуха [II], в измерителе примесей воздуха.

Л и т е р а т у р а

1. Илюкович А.М. Техника электрометрии. М., 1976, 399 с.
2. Саке О.В. Собственные помехи преобразователя с динамическим конденсатором. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 443, Тарту, 1977. с. 99-138.
3. Озеров Л.Н., Пушкина М.А., Слудский М.Е. Чувствительный электрометрический усилитель на МОП-транзисторах. - ПТЭ, 1975, № 1, с. 140-141.
4. Гриценко О.Г., Левенталь Н.Я., Арсланов Р.А. Электрометрический усилитель с непосредственными связями на МОП-транзисторе. - ПТЭ, 1975, № 2, с. 140-141.
5. Берзин Л.Ф. Электрометрический усилитель на полевом транзисторе и интегральной микросхеме. - ПТЭ, 1973, № 5, с. 150-151.
6. Берзин Л.Ф. Электрометрический усилитель с большим динамическим диапазоном. - ПТЭ, 1975, № 4, с. 111-112.
7. Антоновский А.А., Блинов В.Н. Электрометрический усилитель для счетчика аэроионов и электроаэрозольей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 409, Тарту, 1977, с. 154-162.
8. Вейнбергер. Расчет и конструирование специальных электрометрических схем. - "Электроника". Пер. с англ., 1971, № 18, с. 40-46.
9. Шакил. Электрометр с разрешающей способностью 60 электрон/с. - "Электроника". Пер. с англ., 1978, № 25, с. 87-88.
10. Майлс Р. Сверхчувствительные измерительные приборы со специальными входными каскадами. - "Электроника". Пер. с англ., 1979, № 20, с. 60-66.
11. Лешик К.П., Таммет Х.Ф., Миллер Ф.Г., Сальм Я.И. Полевой измеритель проводимости воздуха с модулирующим измерительным конденсатором. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 534, Тарту, 1980, с. 80-83.

ON THE ELABORATION OF ELECTROMETERS OF DIRECT
AMPLIFICATION FOR MULTICHANNEL SPECTROMETERS
OF AIR IONS

F. Miller

S u m m a r y

The paper carries the description of an electrometric input block of direct amplification designed for application in a multichannel aerosol spectrometer. Some peculiarities of the transistors of the type KII 305 important for electrometry (dependence of the input current of the gate on the design of the body of a transistor, distribution of transistors according to gate currents, etc.) are indicated. The diagram is given of a particular preamplifier having an input parasite current $(0.3...1) \cdot 10^{-15}$ A, zero drift in laboratory conditions $0.25 \cdot 10^{-15}$ A per hour, noise level at the time constant of 50 s approximately $2 \cdot 10^{-16}$ A.

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ СПЕКТРЫ ЗАМЕЩЕННЫХ АЦЕТИЛЕНОВ И ВИНИЛАЦЕТИЛЕНОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕМЕНТЫ IV ГРУППЫ

Н.В. Виллем

Фотоионизация атомов и молекул монохроматическим ультрафиолетовым излучением и анализ спектров распределения по кинетическим энергиям освобождаемых при этом электронов лежат в основе метода фотоэлектронной спектроскопии (ФЭС). Закон сохранения энергии для процесса фотоионизации



в пренебрежении тепловой энергии молекулы и малой величины кинетической энергии иона может быть записан следующим образом:

$$E_{h\nu} = \Pi_k + E_{vk} + E_{\text{кин.эл.}},$$

где $E_{h\nu}$ — энергия фотона,

Π_k — адиабатический потенциал ионизации (Π), соответствующий образованию M^+ в k -том электронном состоянии,

E_{vk} — энергия колебательного возбуждения ионов M^+ в электронном состоянии k ,

$E_{\text{кин.эл.}}$ — кинетическая энергия электрона.

Так как $E_{h\nu}$ и Π_k для данной молекулы постоянны, то измеряя распределение электронов по кинетическим энергиям, получаем структурный спектр, в котором каждая полоса соответствует электронному состоянию иона. В рамках теоремы Кушманса [1] Π_k равны энергиям молекулярных орбиталей (МО) с обратным знаком. Таким образом, каждую полосу фотоэлектронного (ФЭ) спектра в орбитальном приближении можно рассматривать как соответствующую удалению электрона с той или иной МО. Такая информация в наиболее полном объеме может быть получена только методом ФЭС.

В данной работе представлены ФЭ-спектры замещенных ацетиленов $(\text{CH}_3)_3\text{Э} = \text{CH}$ и винилацетиленов $(\text{CH}_3)_3\text{Э}-\text{C} \equiv \text{C}-\text{CH} = \text{CH}_2$, где Э соответствует C, Si, Ge. В дальнейшем это соответствие обозначим знаком равенства (рис. 1, 2).

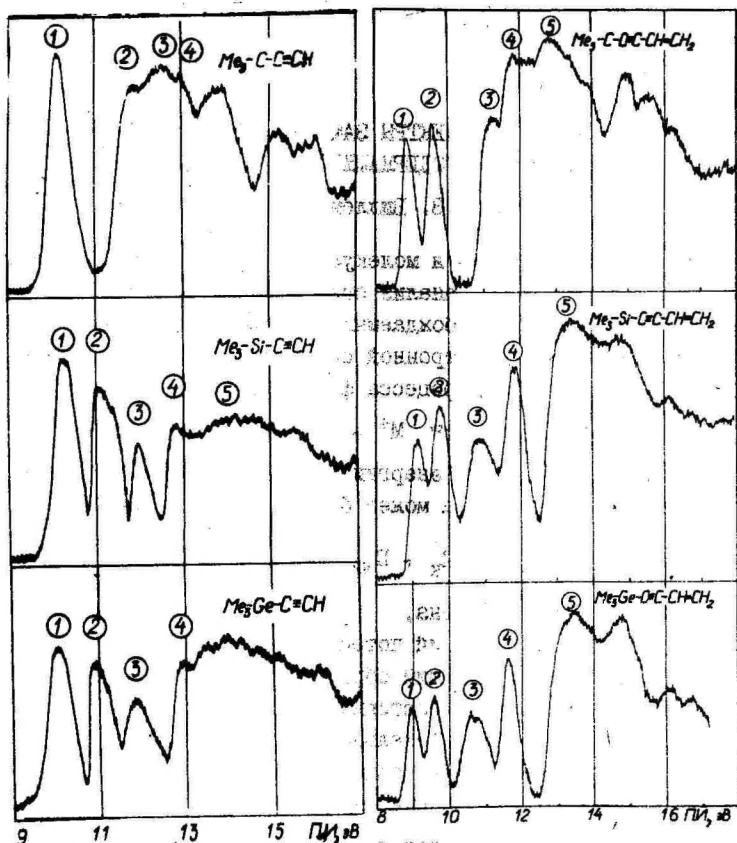


Рис. 1. ФЭС замещенных ацетиленов I-III.

Рис. 2. ФЭС замещенных винилацетиленов IV-VI.

Вертикальные потенциалы ионизации, определяемые по максимумам полос, приведены в табл. 1.

Изучение электронных эффектов элементоорганических соединений, содержащих атомы IV группы (Si, Ge, Sn), методом ФЭС рассмотрено в работах Швайга и Вайднера [2, 3] и Бока с соавторами [4].

Изученные нами соединения I, II, III ($\text{Э} = \text{C}, \text{Si}, \text{Ge}$ соответственно) имеют симметрию C_{3v} . Поэтому МО ϵ -типа в рамках модели линейной комбинации связевых орбиталей (ЛКСО) [5] представляют собой линейные комбинации π -орбиталей ацетиленовой связи и квази π -орбиталей групп $(\text{CH}_3)_3\text{Э}$ -

и, следовательно, вырождение $C \equiv C$ связи сохраняется как и в случае метил- и силилацетиленов [4]. Выбор полос в спектрах соединений I-III сделан на основании сравнения со спектрами $HC \equiv CH$ [6] и $(CH_3)_3SiH$ [7, 8, 9] с учетом взаимного влияния ацетиленовой и третбутильной, триметилсилильной или триметилгермилльной групп.

Первую симметричную, интенсивную и достаточно узкую полосу следует отнести к ионизации орбитали, основной вклад в которую дает ацетиленовая π -связь. Как и следовало ожидать, ПИ $\sigma_{C \equiv C}$ орбитали уменьшился относительно незамещенного ацетилена (II, 40 эВ), причем минимальное изменение наблюдается у кремниевого производного. Различная степень понижения ацетиленового ПИ на 1,32 эВ для C; 1,15 эВ для Si и 1,40 эВ для Ge часто в литературе объясняется участием d -орбиталей кремния [10, 11]. Так, например, Крадок с соавторами [12] для соединений $R(CH_3)_n$ также получили максимальные значения ПИ для кремниевого аналога ($PI_{CH_3} < PI_{SiH_3} > PI_{GeH_3}$) и объяснили такую последовательность разницей между электронно-донорным и противоположно направленным $p\pi-d\pi$ эффектами для групп CH_3 , SiH_3 , GeH_3 . Однако Бок в исследованиях метил- и силилацетиленов с помощью модели ЛКСО [4] указывает, что лучшее воспроизводство дипольных моментов и ПИ получено без участия d -орбиталей Si. В рамках гиперконъюгационной модели различная степень понижения ПИ $\sigma_{C \equiv C}$ объясняется пропорциональностью квадрату параметра взаимодействия β^2 , т.е. зависимостью от длины связи и обратно пропорциональной зависимостью энергетической разницы между кулоновскими параметрами $\Delta\alpha$, т.е. от положения базисных орбиталей.

Таблица I

Вертикальные потенциалы ионизации (эВ)
замещенных ацетиленов I-VI.

№	Соединение	№ ПОЛОСЫ				
		1	2	3	4	5
I	$(CH_3)_3CC \equiv CH$	10,08	11,73	12,6	13,0	13,80
II	$(CH_3)_3SiC \equiv CH$	10,25	11,14	12,10	13,00	13,60
III	$(CH_3)_3GeC \equiv CH$	10,00	10,95	11,84	12,8 -	15,40
IV	$(CH_3)_3CC=C-CH=CH_2$	8,85	9,52	11,30	11,75	12,25
V	$(CH_3)_3SiC \equiv C-CH=CH_2$	9,18	9,80	10,94	11,87	13,43
VI	$(CH_3)_3GeC \equiv C-CH=CH_2$	9,00	9,61	10,62	11,65	

Вторая полоса в третбутилацетилене перекрывается со следующими полосами, что затрудняет интерпретацию спектра. Однако в кремниевом и германиевом аналогах три первые полосы хорошо разрешены. Полоса 2 в этих спектрах по сравнению с полосой I более широкая и асимметричная, что связано с эффектом Ян-Таллера. В таком случае эту полосу 2 следует отнести к ионизации из орбитали, основной вклад в которую дает квази π орбиталь, являющаяся комбинацией связевых орбиталей $(\text{CH}_3)_3$ 3-группы. Величина Π_2 , соответствующего данной орбитали (для I-II, 73 эВ, II-II, 14 эВ и III-IO, 95 эВ), хорошо коррелирует с базисными значениями энергии квази σ^* -орбиталей, взятых из ФЭС $(\text{CH}_3)_3$ 3Н ($\text{C}=\text{C}$: 11,40 эВ, $\text{C}=\text{Si}$: 10,85 эВ и $\text{C}=\text{Ge}$: 10,25 эВ). Интегральные интенсивности первых двух полос практически равны и в два раза больше интенсивности третьей полосы, что также указывает на их принадлежность к дважды вырожденным орбиталям.

В области низких значений Π , кроме полос, соответствующих ионизации из МО σ -типа, должна быть полоса, связанная с ионизацией из a_1 орбитали, основной вклад в которую дает связь $\text{C}-\text{C}$. К этой орбитали следует отнести полосу 3 с $\Pi_3 = 12,61$ эВ (C); 12,10 эВ (Si) и 11,84 эВ (Ge). Изменение Π_3 при переходе от C к Si и Ge соответствует характеру данной орбитали. Область спектра, относящаяся к ионизации орбиталей, локализованных на метильных группах заместителя $(\text{CH}_3)_3\text{C}$. (a_2, e, e, a_1), имеет сильно перекрывающиеся полосы. Поэтому однозначное отнесение и определение точных значений Π отдельных орбиталей затруднены.

Правильность соответствия приписанных полос МО в ряду соединений $(\text{CH}_3)_3\text{C}=\text{C}=\text{N}$, $\text{C}=\text{C}$, Si, Ge подтверждается аналогичной интерпретацией соединения II в работе Хайлброннера с соавторами, в которой наряду с галогензамещенными ацетиленами $(\text{CH}_3)_3\text{SiC} \equiv \text{C}R$, $R = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ изучен триметилсилилацетилен $(\text{CH}_3)_3\text{SiC} \equiv \text{C}H$ с указанием параметризации модели ЛКСО [13].

Присоединение винильной группы к тройной связи (соединения IV, V, VI) приводит к снятию вырождения $\text{C}=\text{C}$ связи. В этом случае в молекуле незамещенного винилацетилена π -орбиталь этиленового фрагмента образует с π -орбиталью ацетиленового фрагмента несвязывающую π_- и связывающую π_+ комбинации, соответствующие первой и третьей полосам в ФЭ-спектре [14]. Вторая полоса обусловлена ионизацией в основном π -ор-

Л и т е р а т у р а

1. Koopmans T. Über die Zuordnung von Wellenfunktionen und Eigenwerten zu den einzelnen Elektronen eines Atoms. - *Physica*, 1934, vol. 1, p. 104-113.
2. Weidner V., Schweig A. The nature of bonding in vinyl and allylsilanes: the effects of σ - π (hyperconjugation) and $p\pi$ - $d\pi$ conjugation in these compounds. - *J. Organometal Chem.*, 1972, vol. 39, p. 261-266.
3. Schweig A., Weidner V. Theory and application of photoelectron spectroscopy. XLIV. A quantitative account of hyperconjugation in allyl and benzyl compounds of elements of group IVB. - *J. Organometal. Chem.*, 1974, vol. 87, p. C4-C7.
4. Ensslin W., Bock H., Becker G. Photoelectron spectra and molecular properties. XXX. π -Interactions in H_3Si - and H_3C -substituted acetylenes. - *I. Amer. Chem. Soc.*, 1974, vol. 96, p. 2757-2762.
5. Hall G.G. The molecular orbital theory of chemical valency VIII. A method of calculating ionization potentials. - *Proc. Roy. Soc.*, 1951, vol. A205, p. 541-552.
6. Baker C., Turner D.W. Molecular PE spectroscopy. Part III. Acetylenes and azaacetylenes. - *Proc. Roy. Soc.*, 1968, vol. 308A, p. 19-37.
7. Murrell J.N., Schmidt W. Photoelectron spectroscopic correlation of the molecular orbitals of methane, ethane, propane, isobutane and neopentane. - *J. Chem. Soc. Faraday Trans. II*, 1972, p. 1709-1718.
8. Szepes L., Naray-Szabo G., Colonna F.P., Distefano G. Photoelectron He(I) spectra of small silanes. - *J. Organometal. Chem.*, 1976, vol. 117, p. 141-148.
9. Drake J.E., Glavinčevski B.M., Gorzelska K. The Photoelectron Spectra of trimethylgermane, chloro- and fluorotrimethylgermane. - *J. Electron. Spectrosc. Rel. Phenom.*, 1979, vol. 16, p. 331-337.

10. Mollere P., Bock H., Becker G., Fritz G. Photoelectron spectra and molecular properties XV. The effects of α - and β -silyl substituents on π -systems. - J. Organometal. Chem. 1972, vol. 46, p. 89-96.
11. Bischof P.K., Dewar M.J.S., Goodman D. W., Jones T.B. Hyperconjugation by p_{π} - d_{π} bonding in the Group IVB Elements. - J. Organometal. Chem., 1974, vol. 82, p.89-98.
12. Cradock S., Whiteford R.A. Photoelectron Spectra of the Methyl, Silyl and Germyl Derivatives of the Group VI Elements. - J. Chem. Soc. Faraday Trans. II, 1972, vol. 68, p. 281-288.
13. Bieri G., Brogli F., Heilbronner E., Kloster-Jensen E. A photoelectron spectroscopic investigation of the electronic structure of trimethylsilylhaloacetylenes. - J. Electron. Spectrosc. Rel. Phenom., 1971/73, vol. 1, p. 67-82.
14. Brogli F., Heilbronner E., Wirtz J., Kloster-Jensen E., Bergman R.G., Vollhardt K.P.C., Ashe III A.J. The Consequences of σ and π Conjugative Interactions in Mono-, Di- and Triacetylenes. A Photoelectron Spectroscopic Investigation. - Helv. Chim. Acta, 1975, vol. 58, p. 2620-2645.
15. Beez M., Bieri G., Bock H., Heilbronner E. 97. The Ionization Potentials of Butadiene, Hexatriene, and their Methyl Derivatives: Evidence for Through Space Interaction between Double Bond π -orbitals and Non-Bonded Pseudo-Orbitals of Methyl Groups? - Helv. Chem. Acta, 1973, vol. 56, p. 1028-1046.

PHOTOELECTRON SPECTRA OF SUBSTITUTED ACETYLENES AND
VINYLACETYLENES CONTAINING GROUP IV ELEMENTS

N. Villem

S u m m a r y

The He I photoelectron spectra of substituted acetylenes $(\text{CH}_3)_3\text{E C}=\text{CH}$ and vinylacetylenes $(\text{CH}_3)_3\text{E C}=\text{C}-\text{CH}=\text{CH}_2$, $\text{E} = \text{C}, \text{Si}, \text{Ge}$ have been measured. Ionization bands in the low-binding energy region of the spectra have been identified and assigned. This assignment is based on a comparison with the spectra of related compounds and LCAO-considerations. The author found that two-centre triple-bond π -orbitals conjugate with double-bond π -orbitals and then split.

Hyperconjugative mixing of acetylene π -bonds with "quasi" π -orbitals of $(\text{CH}_3)_3\text{E}$ -groups does not lead to such splitting.

**СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ И ИЗОБРЕТЕНИЙ СОТРУДНИКОВ
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ПО ТЕМАТИКЕ
ПРОБЛЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ АЭРОИОНИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЕЙ**

Настоящий библиографический список является дополнением и продолжением (до 01.01.81) аналогичных списков, опубликованных в Ученых записках Тартуского гос. университета, вып. 240, 1970 г., вып. 283, 1971 г. и вып. 534, 1980 г.

А в т о р е ф е р а т ы д и с с е р т а ц и й

Лаан М.Р.—Д. Сравнительное исследование импульсов короны постоянного напряжения и начальной стадии высокочастотного разряда. Автореф. дис. на соиск. к.ф.-м.н. Ордена Ленина Физический институт им. П.Н. Лебедева. М., 1980. 12 с.

С т а т ь и и т е з и с ы

Айтс М.Х., Жаворонков В.И., Хальясте А.Я. Индикатор для оптических исследований слабосветящихся объектов. — Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1980, вып. 534, с.106—110.

Ансо М.Х. Исследование быстродействия логарифмического электрометра. — Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф., посвящ. Дню радио. Секция Проблемы измерительного преобразования. Таллин, 1979.

Ансо М.Х. Метод идентификации высокоомного измерительного резистора на ЭВМ. — Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1980, вып. 534, с. 16—28.

Ансо М.Х. О быстродействии линейного измерителя малых токов. — Проблемы конструирования и производства современной измерительной техники. Тезисы докл. науч.-техн. конф., часть I, Минск, 1979.

Ансо М.Х. Методы повышения быстродействия электрометрических измерителей малых токов. — Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1980, вып. 534, с. 3—15.

Арак Э.Х., Йентс А.К., Сийрде Э.К. О действии солбобли- зированного эфирного масла ромашки аптечной при лечении вос- палений верхних дыхательных путей. - Труды науч.-практ. конф. оториноларингологов ЭССР, посвящ. 80-летию основания отори- ноларингологии в ЭССР. Тарту, 1973, с. 149-150.

Арак Э.Х., Йентс А.К., Таммеорг И.К. Препарат для инга- ляции, содержащий эфирное масло ромашки. - Материалы II все- союз. съезда фармацевтов. Рига, 1974, с. 271-272.

Арольд М.У., Матизен Р.Л. Об атмосферном электричестве на Северном Кавказе. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1979, вып. 479, с. 57-61.

Белов М.Н., Виснапуу Л.Ю. Об исследовании генератора электроаэрозолей с несколькими распылителями. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1979, вып. 479, с. 115-127.

Бернотас Т.П., Кивкас Ю.Э., Мирме А.А. Конденсационный генератор высокодисперсных аэрозолей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1979, вып. 479, с. 128-131.

Верецагин А.И., Салихова А.М., Сайткулова Ф.Г., Зверев В.В., Виллем Я.Я. α , α -дихлордиметилловый эфир - физичес- кие свойства, конформация и внутримолекулярные взаимодей- ствия. - Изв. АН СССР. Сер. хим., 1980, № 5, с. 997-1001.

Виллем Н.В., Виллем Я.Я., Сакс О.В., Зверев В.В. Фото- электронные спектры и электронная структура ненасыщенных фосфорильных соединений. - IX нац. конф. молекулярной спек- троскопии с междунар. участием. Тезисы докл. Албена, Болга- рия, 1980.

Виллем Н.В., Виллем Я.Я., Сакс О.В., Племенков В.В. Применение фотоэлектронной спектроскопии (ФЭС) для изучения конформации молекул. - У Всесоюз. симпози. по межмолекулярно- му взаимодействию и конформациям молекул. Тезисы докл. Алма- Ата, изд. "Наука" Казахской ССР, 1980, с. 139.

Виллем Н.В., Ермолаев С.А., Чижов Ю.В., Цигин П.М. Электронная структура и фотоэлектронные спектры фенилизо- цианата и его галогенпроизводных. - Конф. по теории атомов и молекул. Вильнюс, 1979, с. 52.

Виллем Я.Я., Зверев В.В., Бельский В.Е., Китаев Ю.П. Фотоэлектронные спектры фосфорильных соединений. - Изв. АН СССР. Сер. хим., 1979, № 1, с. 84-89.

Виллем Я.Я., Зверев В.В., Ермолаева Л.В. Структура орбиталей непредельных соединений фосфора и нитроолефинов. - Коэф. по теории атомов и молекул. Вильнюс, 1979, с. 53.

Виллем Я.Я., Зверев В.В., Ермолаева Л.В., Лисин А.Ф. Фотоэлектронные спектры и электронное строение непредельных фосфорильных соединений. - Докл. АН СССР, 1979, 246, № 6, 1368-1372.

Виллем Я.Я., Зверев В.В., Исламов Р.Г., Китаев Ю.П. Фотоэлектронный спектр и электронное строение винилдихлорфосфоната. - Журнал общей химии, 1979, 49, № 8, с.1737-1745.

Виснапу Л.Ю. Выбор типа и параметров пневматического распылителя для получения электроаэрозолей. - Межвуз. сб. "Методы и приборы контроля параметров окружающей среды". ЛИАП, Л., 1979, вып. I (136), с. 99-102.

Виснапу Л.Ю. Об эффективности струйных нейтрализаторов статического электричества. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1980, вып. 534, с. 101-105.

Зверев В.В., Виллем Я.Я. Потенциалы ионизации фосфорильных соединений. - Журнал структурной химии, 1980, т.21, № 1, с. 30-34.

Зверев В.В., Виллем Я.Я., Бельский В.Е., Китаев Ю.П. Фотоэлектронные спектры и реакционная способность фосфорильных соединений. - В кн.: Химия и практическое применение кремний- и фосфорорганических соединений. Межвуз. сб. науч. трудов. Л., изд. ЛТИ, 1978.

Зверев В.В., Виллем Я.Я., Бельский В.Е., Китаев Ю.П. Фотоэлектронные спектры и реакционная способность фосфорильных соединений. - Тезисы совещ. по химии и применению фосфорорганических соединений. Л., 1978.

Зверев В.В., Виллем Я.Я., Офицеров Е.Н., Китаев Ю.П. Фотоэлектронные спектры соединений со связью фосфор-сера. - IX Междунар. симпоз. по химии органических соединений серы. Тезисы докл. Рига, 1980, с.198.

Зверев В.В., Ермолаева Л.В., Виллем Я.Я. Фотоэлектронные спектры и электронное строение нитроолефинов. - Журнал структурной химии, 1980, т.21, № 2, с. 193-197.

Губергриц М.Я., Ирка Н.И., Прийман Р.Э. Поверхностно-активные вещества в водоемах Эстонии и их микробное разрушение. - Водные ресурсы, 1980, № 2, с. 192-197.

Ирка Н.И., Прийман Р.Э. К вопросу о биопревращениях анионных СПАВ в природных водах. - Водные ресурсы, 1979, № 4, с. 186-189.

Йентс А.К., Арак Э.Х. Влияние отдельных компонентов ромашки на организм. - В сб.: Актуальные вопросы оториноларингологии. Таллин, 1979, с. 200-202.

Йентс А.К., Арак Э.Х. Использование ромашки при ингаляционной терапии. - В сб.: Современные аспекты оториноларингологии. Рига, 1978, с. 166-167.

Йентс А.К., Арак Э.Х., Таммеорг И.К. Солюбилизированный препарат из эфирного масла ромашки аптечной для ингаляционной терапии. - Медицинский факультет - здравоохранению. Тезисы конференции. Тарту, 1980, с. 219-220.

Йентс А.К., Лойге А.Э. О наличии и лечении озены. - В сб.: Актуальные вопросы оториноларингологии. Таллин, 1979, с. 127-128.

Каазик М., Кирм А. Предотвращение загрязнения природной среды отходами нефтепродуктов и масел. - Вып. Эст. НИИ науч.-техн. информации и технико-экономических исследований. Таллин, 1980. 20 с.

Кони Ю.Я., Сальм Я.И. К вопросу об адсорбции аэрозонов на начальном участке трубы. - Уч. зап. Тартуского гос.ун-та, Тарту, 1979, вып. 479, с. 15-18.

Куду К.Ф. Высокочастотный демонстрационный индикатор излучений. - Успехи физ.наук., 1964, 82, 4, с. 770-771.

Куду К.Ф., Айтс М.Х., Рейнарт М.А. Наблюдения за возникновением световых импульсов ВЧ короны в диапазоне частот 0,2-1,6 МГц. - Докл. на науч. конф. МЭИ. М., 1975, с. 10.

Кууск А.Х., Файнгольд С.И., Прийман Р.Э. Биохимическое разложение диалкил-фенилсульфонатов. - Изв. АН ЭССР. Химия, 1980, т. 29, № 3, с. 227-230.

Лаан М.Р. Распределение свечения вдоль оси разрядного промежутка и фазовые соотношения в начальных стадиях одноэлектродного ВЧ разряда в воздухе. - Докл. на науч. конф. МЭИ. М., 1975, с. 7.

Лангус Л.Э., Рейнет Я.Ю. Об ионизации воздуха в закрытых помещениях при помощи коронных ионизаторов, II. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1979, вып. 479, с. 38-56.

Лешник К.П., Таммет Х.Ф., Миллер Ф.Г., Сальм Я.И. Полевой измеритель проводимости воздуха с модуляционным измерительным конденсатором. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1980, вып. 534, с. 80-83.

Лоог П.К., Пиквер Р.И., Резбен В.А., Сакс О.В. Тераометр. - Науч.-техн. совещ. по измерению малых постоянных токов и напряжений и больших сопротивлений на постоянном токе. Тезисы и аннотации докл. и сообщ. Л., 1964, с. 36.

Мирме А.А., Сальм Я.И., Тамм Э.И., Таммет Х.Ф. Гранулометр субмикронного аэрозоля. - Межвуз. сб.: Методы и приборы контроля параметров окружающей среды. ЛИАП, Л., 1979, вып. I(136), с. 64-67.

Мирме А.А., Таммет Х.Ф., Фишер М.М., Арольд М.У., Тамм Э.И. Полуавтоматический координатометр. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1979, вып. 479, с. 132-138.

Ноппель М.Г., Тамм Э.И. О разрядке униполярно заряженных аэрозольных частиц. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1980, вып. 534, с. 84-94.

Пиквер Р.И. Стабильный генератор тока для тераомметра с линейной шкалой. - Материалы Всесоюз. науч.-техн. совещ. по радио-электронным методам измерений и омических сопротивлений. Таллин, 1965, с. 238-240.

Пиквер Р.И. Стабильный генератор тока для тераомметра с линейной шкалой. - Тезисы докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. по радиоэлектронным методам измерений электрических напряжений и омических сопротивлений. Таллин, 1964, с. 31-32.

Прийман Р.Э. К вопросу о распределении загрязняющих и канцерогенных веществ (детергенты, полициклические арены, фенолы) в Чудско-Псковском озере и прилегающих к нему водостоках. - Тезисы совещ. "Совершенствование системы определения состояния окружающей среды в Эстонской ССР". Таллин, 1979, с. 33-34.

Прокофьев А., Кабардин О., Куду К. Исследование начальных стадий высокочастотного разряда с острия в воздухе при атмосферном давлении. - Изв.АН СССР. Сер. физ., 1959, 23,

с. 1004-1007.

Прюллер П.К. Основание, структура и обзор деятельности Проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1980, вып. 534, с. III-126.

Прюллер П.К. Физики Тартуского университета и Петербургская Академия наук.-В сб.: Петербургская Академия наук и Эстония. Таллин, Валгус, 1978, с. 31-74.

Раудам Э.И., Рейнет Я.Ю. Профилактика и лечение аэрозолями и электроаэрозолями легочных осложнений у очень тяжелых нейрохирургических больных. - Труды объедин. конф. нейрохирургов. Ереван, 1965, с. 425-427.

Рейнет Я.Ю. Новая аппаратура и методика для определения плотностей аэро- и гидроионов в атмосфере. - Второе науч. совещ., посвящ. физиологическому действию и терапевтическому применению аэроионов. Тезисы докл. Рига, АН Латв. ССР, 1957, с. 81-82.

Рейнет Я.Ю. Об ионизации воздуха в закрытых помещениях при помощи коронных ионизаторов, I. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1979, вып. 479, с. 26-37.

Рейнет Я.Ю. Установка для нейтрализации статического электричества. - Тезисы докл. II всесоюз. науч.-техн. конф. "Защита от вредного воздействия статического электричества в народном хозяйстве" (16-18 окт. 1979). Северодонецк, Черкассы, 1979, с. 78-79.

Роос Х.П., Хилпус А.О. О возможностях применения газоразрядного счетчика ионов для индикации малых концентраций примесей галогенов в воздухе. - Докл. на науч. конф. МЭИ. М., 1975, с. 7.

Савихин А.А. Регулятор температуры. - Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф., посвящ. Дню радио. Секция "Проблемы измерительного приборостроения". Таллин, 1979, с. 10.

Савихин А.А., Сакс О.В., Шор В.Г. Установка для измерения э.д.с. Холла и термостимулированной проводимости в высокоомных образцах. - Тезисы докл. респ. науч. конф., посвящ. Дню радио. Секция "Проблемы измерительного приборостроения". Таллин, 1979, с. 9.

Сакс О.В. Иголочный термометр с полупроводниковым термосопротивлением для регистрации температур в пределах от 30° до 42°C с чувствительностью до $0,001^{\circ}$. - II Всесоюз. конф. по применению радиозлектроники в биологии и медицине. Тезисы докл. Л., 1962, с. 116.

Сакс О.В. Сравнительный анализ блок-схем высокочувствительных усилителей с динамическим конденсатором. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1979, вып. 479, с. 146-165.

Сакс О.В., Рождественская Т.Б., Антонова Д.И., Павлов О.М., Степанова Л.М., Графов В.С., Матросов В.А., Покровская А.В. Новые методы и образцовая аппаратура для метрологического обеспечения средств измерения предельно малых постоянных токов (на русск. и англ. языках). - Тезисы докл. VIII конгр. ИМЕКО. М., 1979.

Сакс О.В., Хяммалов Ю.А. О динамическом конденсаторе с электростатическим возбуждением. - Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф., посвящ. Дню радио. Секция "Проблемы измерительного приборостроения". Таллин, 1979.

Сакс О.В., Хяммалов Ю.А., Шор В.Г. Динамический конденсатор с электростатическим возбуждением ДК-79. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1980, вып. 534, с. 37-44.

Сальм Я.И. О повышении разрешающей способности спектрометра легких аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1979, вып. 479, с. 10-14.

Сальм Я.И. Об электростатическом рассеивании аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1980, вып. 534, с. 95-100.

Сибуль С.Ф. О влиянии дыхательных упражнений на носовое и внешнее дыхание при затрудненном носовом дыхании у больных аллергической ринопатией. - В сб.: Актуальные вопросы оториноларингологии. Таллин, 1979, с. 117-119.

Сибуль С.Ф. О применении нагретых электроаэрозолей при заболеваниях дыхательных путей. - В сб.: Актуальные вопросы оториноларингологии. Таллин, 1979, с. 197-198.

Сибуль С.Ф., Вендер В.А. Электротермометрические измерения в связи с аэроионотерапией заболеваний уха. - В сб.: Современные аспекты оториноларингологии. Рига, 1978, с. 197-198.

Сибуль С.Ф., Сийрде Э.К., Йентс А.К. Действие лизоцима в виде аэрозолей и электроаэрозолей на активность мерцательного эпителия. - В сб.: Актуальные вопросы оториноларингологии. Таллин, 1979, с. 196-197.

Сибуль С.Ф., Слепиковский Б.С. О действии аэроионизации и гайморотомии на рефлекторную связь слизистой оболочки носа и кожи щеки. - В сб.: Актуальные вопросы оториноларингологии. Таллин, 1979, с. 107-108.

Сийрде Э.К. О прошлом и будущем оториноларингологии в Эстонской ССР. - В сб.: Актуальные вопросы оториноларингологии. Таллин, 1979, с. 3-5.

Сийрде Э.К., Сибуль С.Ф., Йентс А.К. Аэроионо- и электроаэрозольтерапия при лечении болезней дыхательных путей. - Медицинский факультет - здравоохранению. Тезисы конференции. Тарту, 1980, с. 217-219.

Сийрде Э.К., Сибуль С.Ф., Карин Э.А. Опыт применения некоторых физических методов лечения при заболевании уха, носа и горла. - Вестник оториноларингологии, 1979, № 1, с. 60-64.

Сийрде Э.К., Сяргавя В.А., Сибуль С.Ф. Некоторые данные о хроническом гипертрофическом насморке. - Вестник оториноларингологии, 1979, № 4, с. 65-70.

Сийрде Э.К., Сяргавя В.А., Сибуль С.Ф., Йентс А.К. О развитии научной работы по оториноларингологии в Тартуском государственном университете. - *Tartu Ülikooli ajaloo küsimusi*, IX. Тарту, 1979, с. 62-71. (Вопросы истории Тартуского университета, IX).

Сяргавя В.А., Йентс А.К. Кислородные электроаэрозоли и аэрозоли в лечении тугоухости. - В сб.: Современные аспекты оториноларингологии. Рига, 1978, с. 91.

Таммет Х.Ф., Сальм Я.Й. Об использовании проволочных антенн для аэроионизации. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1979, вып. 479, с. 19-25.

Тикк А.А., Синисалу В.Х., Кросс Э.Ю., Рюш Х.О. Проблемы послеоперационного интенсивного лечения больных с опухолями головного мозга. - Вопросы клинической неврологии и психиатрии, Тарту, 1971, 8, с. 132-136.

Тикк А.А., Пикк Т.А. Легочные осложнения при тяжелой черепно-мозговой травме. - Сб. науч. работ по актуальным вопросам нейрохирургии. Рига, 1972, с. 151-154.

Хальясте А. Нейтрализатор статических зарядов для топографий. - X студ. науч.-техн. конф. высших учебных заведений Прибалт., Белорусск. ССР и Калинингр. обл. Аннотации науч. работ. Таллин, 1964, с. 35.

Хяммалов Ю.А. Анализ работы электростатического динамического конденсатора с натянутой мембраной. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, Тарту, 1980, вып. 534, с. 21-36.

Ипрус Я. Об определении заряда и радиуса частиц аэрозолей. - X студ. науч.-техн. конф. высших учебных заведений Прибалт., Белорусск. ССР и Калинингр. обл. Аннотации науч. работ. Таллин, 1964, с. 36.

Arold M. Vilsandi teaduseaareks. - Eesti Loodus, 1979, nr. 5, lk. 288-289. (Остров Вильсанди как возможная база исследования природной среды; на эст. яз.).

Jents A. Võrdlevaid vaatlusi luminesentsmeetodiga aerosoolide ja elektroaerosoolide peatumise kohta ülemiste hingamisteede limaskestl ning eritamise kohta uriiniga. - TRÜ Toim., Tartu, 1963, 134, lk. 54-59. (Сравнительные данные задержки аэрозолей и электроаэрозолей на слизистых оболочках верхних дыхательных путей, а также их выделения с мочой, полученные люминесцентным методом; на эстонском языке).

Jents A., Särgava V. The action of electroaerosols on hearing disorders. - Book of Abstracts. 8th Intern. Congr. of Biometeorology. Shefayim, Israel, 1979, p. 186.

Kirm A., Reinet J. Keskkonnakaitse-alase uurimistöö ühest lõigust Tartu Riiklikus Ülikoolis. - Keskkonnakaitse, Tallinn, 1980, nr. 4. Informatsiooniseeria XIV, lk. 11-14. (Об одном участке научно-исследовательской работы в области охраны окружающей среды в Тартуском государственном университете; на эст. яз.).

Matisen R., Reinet J. Measurement of air ion concentration in rooms of different industries. - Book of Abstracts. 8th Intern. Congr. of Biometeorology. Shefayim, Israel, 1979, p. 190.

Primägi L., Kremerman M., Visnapuu L. Application of negatively charged aerosols of leucocytic interferon for the prevention and treatment of acute respiratory infections in children. - Book of Abstracts. 8th Intern. Congr. of Biometeorology. Shefayim, Israel, 1979, p. 194.

Reinet J., Früller P. Biometeorological significance of the study of atmospheric ionization and the phenomenon of fluctuation. - Ionization of the air and electrical field effects in biology. Bibl. of published references. 1960-1969 by G.W.K. King, Pennsylvania, USA.

Reinet J., Siirde E. Aerosol Ionizer and Its Application in Medicine. Reprint Proceedings. 3rd Intern. Biometeorological Congr. Pau, 1963, p. 1031-1036.

Reinet J., Tammet H., Salm J. On the methods of counting air ions. - Ionization of the air and electrical field effects in biology. Bibl. of published references. 1960-1969 by G.W.K. King, Pennsylvania, USA.

Reinet J., Tammet H., Salm J. On the methods of counting air ions. Reprint Proceedings. 3rd Intern. Biometeorological Congr. Pau, 1963, p. 1037-1046.

Reinet J., Tammet H., Salm J. On the methods of counting air ions. - Biometeorology, Vol. 2. Pergamon Press, London, 1967.

Salm J. Konvektsioonivoolu tihedus kondensaatoris laengukandjate difusiooni korral. - ENSV TA Toim. Füüsika, matemaatika. Tallinn, 1970, nr. 1, lk. 118-120. (Плотность конвекционного тока в конденсаторе в случае диффузии носителей заряда; на эст. яз.).

Salm J., Reinet J., Matisen R., Üts E. Measurement of air ion concentration in high relative humidity. - Book of Abstracts. 8th Intern. Congr. of Biometeorology. Shefayim, Israel, 1979, p. 197.

Saveljevã V., Smirnova L., Visnapuu L. The effect of electric charges of inhaled predicated aerosols on the biological availability of the predication. - Book of Abstracts. 8th Intern. Congr. of Biometeorology. Shefayim, Israel, 1979, p. 198.

Sibul S.F., Siirde E.K., Jents A.K. The action of lysozyme aerosols and electroaerosols on mucous membrane of respiratory tract. - 3rd Congr. of Intern. Society for Aerosol in Medicine. Abstract. Salsomaggiore Terme (Parma), Italy, 1980.

Sibul S., Vender V. The Effect of Negative Air Ions on the Blood Supply of the External Auditory Meatus. - Ibidem, 1979, p. 199.

Siirde E. Bipolaarse ionisatsiooni füsioloogilise toimem vaatlusi. - Arstiteadusk. konverentsi teesid. Tartu, 1960, lk. 38-39. (Наблюдения физиологического действия биполярной ионизации; на эст. яз.).

Siirde E., Reinet J. Effect of electroaerosols and aerosols on the isolated heart of the frog. - Ionization of the air and electrical field effects in biology. Bibl. of published references 1960-1975 by G.W.K. King, Pennsylvania, USA.

Siirde E., Sibul S., Reinet J. The action of negative air ions and electroaerosols on the vegetative nervous system. - Book of Abstracts. 8th Intern. Congr. of Biometeorology. Shefayim, Israel, 1979, p. 202.

Tammeorg M. Logaritmiline femtoampermeeter. - Füüsikaosak. üliõpilaste tead. töid. Tartu, 1978, lk. 29-33. (на эст. яз.).

Teller O. Nõrga voolu allikas ja tema kasutamine. - Füüsikaosak. üliõpilaste tead. töid. Tartu, 1978, lk. 33-38. (на эст. яз.).

Villako K., Saks O., Sugasepp E. Radioaktiivne B₁₂ vitamiini sidumise võime Tartu Lihakombinaadi poolt toodetavas maomahlas. - TRÜ Toim. Tartu, 1963, 134, lk. 185-188. (Способность связывания радиоактивного витамина B₁₂ в желудочном соке, выпускаемом Тартуским мясокомбинатом; на эст. яз.).

Изобретения

Аллес П.Т., Аллес Г.К., Виснапуу Л.Ю., Куум Ю.Ю., Пуо-лаккайнен Л.И. Устройство для снятия с пластины пчелиного яда. Авт. св. СССР, М. кл. А 01 К 51/00, № 755632, заявл. 10.07.79, № 2647322/30. Бюл. изобр., 1980, № 13, с. 15.

Виснапуу Л.Ю. Пневматический распылитель. Авт. св. СССР, М. кл. В 05 В 5/02, № 697200, заявл. 10.04.78, № 2602452/23-05. Бюл. изобр., 1979, № 42, с. 31.

Виснапуу Л.Ю., Белов М.Н., Талалай М.Л., Бердичевский Д.М. Электроаэрозольный распылитель. Авт. св. СССР, М. кл. В 05 В 5/02, № 685346, заявл. 24.04.78 № 2606035/23-05. Бюл. изобр., 1979, № 34, с. 45.

Виснапуу Л.Ю., Мирме А.А. Устройство для генерирования монодисперсных капель. Авт. св. СССР, М. кл. В 05 В 17/06, № 676330, заявл. 30.03.78, № 2597252/23-05. Бюл., изобр., 1979, № 28, с. 34.

Виснапуу Л.Ю., Талалай М.Л., Бердичевский Д.М. Аэрозольный генератор. Авт. св. СССР, М. кл. А 61 М 11/02, № 735257, заявл. 15.05.78, № 2614818/28-13. Бюл. изобр., 1980, № 19, с. 16.

Кирм А.А., Паутс У.А. Ротационная форсунка. Авт. св. СССР, М. кл. F 23 D 11/04, № 645000, заявл. 15.04.77, № 2480535/06. Бюл. изобр., 1979, № 4, с. 135.

Паутс У.А., Кирм А.А. Вертикальный центробежный насос. Авт. св. СССР, М. кл. F 04 D 3/02, № 715825, заявл. 23.03.78, № 2596278/25. Бюл. изобр., 1980, № 6, с. 165.

Рейнет Я.Ю. Устройство для перемешивания жидких сред. Авт. св. СССР, М. кл. В 01 F 7/28, № 701681, заявл. 01.08.77, № 2517736/23-26. Бюл. изобр., 1979, № 45, с. 32.

Сальм Я.И. Счетчик аэроионов. Авт. св. СССР, М. кл. H 01 J 39/26, № 668028, заявл. 04.01.78, № 2564753/25. Бюл. изобр., 1979, № 22, с. 184.

Сула Э.В., Тетсов Э.А., Ирд В.Я., Яегер Э.Р. Электроаэрозольный генератор. Авт. св. СССР, М. кл. В 05 В 5/02, № 712132, заявл. 12.06.79, № 2627108/23-05. Бюл. изобр., 1980, № 4, с. 19.

СОДЕРЖАНИЕ

М.Р. ЛААН. О механизме развития высокочастотного разряда	3
М.Х. АЙТС, К.Ф. КУДУ, А.Я. ХАЛЪЯСТЕ. Исследование развития одноэлектродного высокочастотного разряда в условиях смешанного напряжения ..	II
Ю.А. ХИММАЛОВ. Исследование температурной нестабильности коэффициента модуляции динамического конденсатора ДК-79	20
А.А. ЖУКОВ. К механизму электрического пробоя в области первой критической частоты	28
Х.Р. ИХЕР, Я.И. САЛЪМ. Зависимость спектра подвижности легких аэроионов от их возраста	33
М.У. АРОЛЬД, Р.Л. МАТИЗЕН, М.А. РЕЙНАРТ, Я.Р. ЭЗВЕЛЬ. О региональных фоновых атмосферно-электрических наблюдениях на острове Вилсанди ...	40
Р.М. ТУТАЕВ. Математическая модель спектрометра легких ионов	49
Я.Ю. РЕЙНЕТ. О сравнении показаний счетчиков аэроионов, работающих на принципах заряжения и разряжения	58
Р.Э. ПРИИМАН. К вопросу образования окисляющих ингредиентов в процессах искусственной ионизации воздуха	65
Л.Э. ЛАНГУС. Об определении окислов азота в воздухе ..	71
Л.Ю. ВИСНАПУУ. Рассеяние табачного дыма в ионизированном и неионизированном воздухе	77
А.А. МИРМЕ, Э.И. ТАММ, Х.Ф. ТАММЕТ. Электрогранулометр аэрозольных частиц с широким пределом измерения	84
Ю.Э. КИКАС, Т.П. БЕРНОТАС. Система получения и контроля калибровочных аэрозолей	93
В.Б. ТАММЕ, В.А. САММЕЛСЕЛЬГ. Система для генерирования латексных аэрозолей	102
И.А. ПЕЙЛЬ. Исследование изоляционных материалов, примененных при измерении слабых токов	108
М.Х. АНСО. О выборе структурной схемы и ее параметров для быстродействующих измерителей малых токов	116

Ф.Г. МИЛЛЕР. К разработке электрометров прямого усиления для многоканальных спектрометров аэроионов	I24
Н.В. ВИЛЛЕМ. Фотоэлектронные спектры замещенных ацетиленов и винилацетиленов, содержащих элементы IV группы	I33
Список научных работ и изобретений сотрудников Тартуского государственного университета по тематике Проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей	I42

CONTENTS

M. LAAN. On the mechanism of the development of a high-frequency discharge	3
M. AINTS, K. KUDU, A. HALJASTE. The study of the development of the HF point-discharge under conditions of superimposed HF and DC voltages...	II
J. HÄMMALOV. An investigation into the thermal instability of the modulation coefficient of the dynamic capacitor DK-79	20
A. ZHUKOV. On the mechanism of electric breakdown in the region of the first critical frequency...	28
H. IHER, J. SALM. Dependence of the small ion mobility spectrum on the age of ions	33
M. AROLD, R. MATISEN, M. REINART, J. ÖÖVEL. About the observations of the phenomena of atmospheric electricity on Vilsandi Island	40
R. TUTAYEV. The mathematical model of a small-ion spectrometer	49
J. REINET. Comparison of the readings of airion counters operating on the principle of charge increase and charge decrease	58
R. PRIIMAN. Formation of oxidizable ingredients during the processes of artificial ionization of the air	65
L. LANGUS. Determination of nitrogen oxides in the air	71
L. VISNAPUU. Scattering of tobacco-smoke in ionized and unionized air	77
A. MIRME, E. TAMM, H. TAMMET. An aerosol electrogranulometer with a wide measuring range	84
Ü. KIKAS, T. BERNOTAS. The system of producing and checking calibration aerosols	93

V. TAMME, V. SAMMELSEIG. The system of producing latex aerosols	I02
I. PEIL. The study of insulating materials to be applied for measuring low-level currents....	I08
M. ANSO. On the choice of a structural scheme and of its parameters for high-speed microcurrent meters	II6
F. MILLER. On the elaboration of electrometers of direct amplification for multichannel spectrometers of air ions	I24
N. VILLEM. Photoelectron spectra of substituted acetylenes and vinylacetylenes containing group IV elements	I33
The papers and inventions of the research workers of Tartu State University according to the topics of the Research Laboratory of Air Ionization and Electroaerosols	I42

Ученые записки Тартуского государственного университета.

Выпуск 588.

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ
ЧАСТИЦ И ИОНОВ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ*

Ионизация, аэрозоли, электрометрия XII.

На русском языке.

Резюме на английском языке.

Тартуский государственный университет.

ЭССР, 202 400, г.Тарту, ул.Дликооли, 18.

Ответственный редактор Л. Виснапуу.

Корректоры Н. Чикалова, Р. Приймак, Л. Кивимяги.

Подписано к печати 13.XI 1981.

МВ 09028.

Формат 30x45/4.

Бумага писчая.

Машинопись. Ротапринт.

Учетно-издательских листов 9,97.

Печатных листов II,25.

Тираж 500.

Заказ № 1227.

Цена I руб. 50 коп.

Типография ТГУ, ЭССР, 202400, г.Тарту, ул.Пялсона, 14.

УДК 537.525.2

О МЕХАНИЗМЕ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА. Лаан М.Е
Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981,
с. 3-10.

Исследовано развитие высокочастотного (ВЧ) разряда в воздухе при атмосферном давлении в разрядном промежутке острие-плоскость. Определено пространственно-временное распределение свечения в разные фазы ВЧ напряжения. В результате математической обработки результатов эксперимента вычислены приведенная напряженность поля и линейная плотность электронов как функции от времени и координаты. В результате вычислений установлена модель развития ВЧ разряда. Обсуждена достоверность полученных результатов. Указано, что допущения, сделанные при вычислениях, не влияют существенно на полученную модель развития ВЧ разряда, но ими нельзя пренебрегать при уточнении механизма развития.

Илл. 3. Библ. 6. Рез. англ.

УДК 537.525.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ОДНОЭЛЕКТРОДНОГО ВЧ РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОГО НАПРЯЖЕНИЯ. Айтс М.Х., Куду К.Ф., Хальясте А.Я. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып.588, Тарту, 1981, с.11-19.

Описываются результаты исследования закономерностей развития канальной структуры острьевого ВЧ разряда в воздухе на частоте 20 МГц в зависимости от величины как постоянной, так и переменной составляющей смешанного напряжения. С увеличением постоянной положительной составляющей ВЧ вспышки становятся одноканальными, имеющими тенденцию распространяться вдоль оси острьевого электрода. Наилучшие условия для распространения разряда по оси острья обеспечиваются конические острья с острым углом заточки, при которых отклонение разрядных каналов от оси менее 5° при подходящем выборе напряжений. При нарастающем ВЧ напряжении можно обеспечить распространение разряда по оси на значительно большее расстояние, чем при неизменяющемся. Установлено, что ВЧ вспышки становятся одноканальными и по оси распространяющимися также при отрицательной постоянной составляющей смешанного напряжения.

Илл. 2. Табл. 1. Библ. 4. Рез. англ.

УДК 621.319.43

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА МОДУЛЯЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА ДК-79. Хяммалов Ю.А. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 20-27.

Приведены средние и максимальные значения изменений статических емкостей, резонансных частот колебания мембраны и коэффициентов модуляции девяти электростатических динамических конденсаторов с натянутой мембраной ДК-79 при изменении температуры от комнатной до -20°C и $+50^{\circ}\text{C}$.

На основе пружинно-пластинчатой модели колеблющейся мембраны выведена формула для расчета коэффициента модуляции с учетом неоднородной натянутости мембраны. Показано, что малейшее изменение существующей неоднородности натяжения мембраны при изменении температуры из-за теплового расширения и изменения взаимного расположения конструкционных элементов динамического конденсатора могут вызвать заметное изменение коэффициента модуляции. Полученные результаты применимы для любой конструкции электростатического динамического конденсатора с колеблющимся элементом в виде круглой натянутой мембраны.

Библ. 3. Рез. англ.

УДК 537.523.74

К МЕХАНИЗМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ОБЛАСТИ ПЕРВОЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ. Жуков А.А. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 28-32.

В работе делается попытка уточнения механизма электрического пробоя в области первой критической частоты с привлечением для объяснения понижения пробойного напряжения по сравнению с напряжением пробоя постоянным током вторичных процессов на временном катоде, таких как испускание электрона при нейтрализации возбужденного до метастабильного состояния положительного иона и выход электрона под действием ультрафиолетового кванта, испущенного метастабильным ионом или атомом газа. Записывается условие пробоя в области первой критической частоты, которое удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными других авторов.

Илл. 3. Библ. 14. Рез англ.

УДК 551.594

537.56

ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРА ПОДВИЖНОСТИ ЛЕГКИХ АЭРОИОНОВ ОТ ИХ ВОЗРАСТА. Ихер Х.Р., Сальм Я.И. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 33-39.

Легкие аэроионы в лабораторных условиях создавались коронным ионизатором или источником альфа-излучения. Спектр подвижности измеряли аспирационным спектрометром повышенной разрешающей способности. Возраст аэроионов варьировал от 0,2 до 1,2 с. Приведен ряд спектров. Форма спектра положительных аэроионов была относительно стабильной. Спектр отрицательных аэроионов имел два основных пика. При увеличении возраста заметно понизился пик с меньшей подвижностью.

Илл. 5. Библ. 5. Рез. англ.

УДК 551.594.12

551.510:615.847.1

О РЕГИОНАЛЬНЫХ ФОНОВЫХ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ НА ОСТРОВЕ ВИЛСАНДИ. Арольд М.У., Матизен Р.Л., Рейнарт М.А., Зевель Я.Р. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 40-48.

Дано обоснование выбора острова Вилсанди для долгосрочных фоновых наблюдений. Описана конструкция павильона для атмосферно-электрических измерений. Приведены данные измерений в летний период 1979 года и их интерпретация.

Илл. 4. Табл. 2. Библ. 2.

УДК 518.0:551.508

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СПЕКТРОМЕТРА ЛЕГКИХ ИОНОВ. Тутавев Р.М. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 49-57.

В статье приводятся обоснование и описание математической модели процесса переноса легких ионов в ионно-дрейфовом спектрометре. Учитываются процессы диффузии, взаимного расталкивания, потери ионов за счет химических реакций и искажения электростатического поля объемным зарядом.

Илл. 1. Библ. 9. Рез. англ.

УДК 621.317.792

О СРАВНЕНИИ ПОКАЗАНИЙ СЧЕТЧИКОВ АЭРОИОНОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ПРИНЦИПАХ ЗАРЯЖЕНИЯ И РАЗРЯЖЕНИЯ. Рейнет Я.Ю. Уч.зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 58-64.

Определены концентрации легких, средних и полутяжелых атмосферных ионов параллельно двумя счетчиками различных типов. Один из них работал по принципу заряжения, другой по принципу разряжения. При сопоставлении показаний обоих счетчиков дано объяснение различий, возникающих между этими показаниями.

Библ. 9. Табл. 3. Рез. англ.

УДК 621.384.5:546.214.546.174

К ВОПРОСУ ОБРАЗОВАНИЯ ОКИСЛЯЮЩИХ ИНГРЕДИЕНТОВ В ПРОЦЕССАХ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА. Прийман Р.Э. Уч.зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 65-70.

Исследованы процессы образования озона и окислов азота при работе некоторых коронных ионизаторов воздуха, применяемых в практических и исследовательских целях.

Показано, что на расстоянии один метр от источника ионизации концентрация двуокси азота в среднем на порядок ниже ПДК, установленной для рабочей зоны, а при работе ультрафиолетового излучателя и проволочно-антенного коронного ионизатора двуокись азота обнаруживается в следовых количествах. Концентрация озона, в зависимости от типа ионизатора, составляет 0,5...2,1 ПДК.

Табл. 1. Библ. 7. Рез. англ.

УДК 543.544:546.172.6

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОКИСЛОВ АЗОТА В ВОЗДУХЕ. Лангус Л.Э. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 71-76.

Дан обзор различных химических и физико-химических методов определения и разделения окислов азота за последние 20 лет. Более подробно рассматриваются газохроматографические методы, указаны трудности и наиболее оптимальные варианты анализа, связанные с применением этого метода.

Библ. 30. Рез. англ.

УДК 541.182.3

РАССЕЯНИЕ ТАБАЧНОГО ДЫМА В ИОНИЗИРОВАННОМ И НЕИОНИЗИРОВАННОМ ВОЗДУХЕ. Виснапуу Л.Ю. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 77-83.

Исследованы динамика рассеяния дисперсной фазы аэрозоля на примере табачного дыма (начальная концентрация 14 мг/м^3) и изменения полярной объемной плотности заряда (предельные подвижности аспирационного счетчика $10^{-3} \dots 10^{-1} \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$) в естественных условиях и при различных видах искусственной ионизации.

Установлена скорость рассеяния табачного дыма при искусственной ионизации: относительные массовые концентрации дисперсной фазы аэрозоля понизились за 30 мин.

при ультрафиолетовом излучении	до 0,42
при водном электроаэрозоле	до 0,30
при коронном разряде совместно с ультрафиолетовым излучением	до 0,11
при коронном разряде	до 0,09

в то время как при естественном рассеянии эта величина уменьшилась до 0,49.

Илл. 1. Табл. 1. Библ. 5. Рез. англ.

УДК 541.182.2/3
551.508
621.319.7.001

ЭЛЕКТРОГРАНУЛОМЕТР АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ С ШИРОКИМ ПРЕДЕЛОМ ИЗМЕРЕНИЯ. Мирме А.А., Тамм Э.И., Таммет Х.Ф. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 84-92.

В работе описывается широкодиапазонный электрогранулометр аэрозольных частиц для определения распределения концентрации частиц в интервале диаметров 10 нм...10 мкм. Широкий диапазон измерения достигается применением параллельно двух механизмов зарядки - диффузионного и ударного. Устройство содержит два второго порядка дифференциальных многоканальных анализатора подвижностей (аспирационных конденсатора) со своими зарядниками, с общим количеством каналов, равным 26. Ток каждого канала измеряют отдельным электрометром. Модуляция тока производится коммутацией полярности зарядки, синхронное детектирование сигнала - в ходе цифровой обработки. В качестве чистого воздуха используют воздух, прошедший через анализаторы; анализаторы выполняют роль электрофильтров. Измерение и запись информации на перфоленту полностью автоматизированы.

Илл. 3. Библ. II. Рез. англ.

УДК 621.319

СИСТЕМА ПОЛУЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ.

Кикас Ю.Э., Бернотас Т.П. Уч. зап. Тартуского гос.ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 93-101.

Описана система получения калибровочных аэрозолей, содержащая четыре этапа: 1) получение первоначального термоконденсационного аэрозоля, 2) электрическая нейтрализация частиц в биполярном коронном нейтрализаторе, 3) электрическая сепарация частиц, 4) контрольная регистрация среднего размера и концентрации частиц с помощью электронной микроскопии, фотоэлектрического нефелометра или детектора аэрозольного тока.

Вычислены рабочие характеристики электрического сепаратора для лог-нормального распределения размеров частиц входящего аэрозоля. Изучена зависимость выходного тока сепаратора от ширины спектра размеров частиц. Получены аэрозоли $NaCl$, S и AgI с диаметрами частиц $0,01...1$ мкм.

Илл. 5. Библ. 5. Рез. англ.

УДК 621.319.7.001

СИСТЕМА ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЛАТЕКСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ. Тамме В.

Б., Саммелсельг В.А. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 102-107.

Описан генератор нейтральных или униполярно заряженных латексных аэрозолей. Экспериментально определены размеры получаемых частиц, приведены их электронные микрофотографии. Проведен статистический анализ размеров аэрозольных частиц.

Илл. 4. Табл. 1. Библ. 8. Рез. англ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЕННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СЛАБЫХ ТОКОВ. ПЕЙЛЬ И.А. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 108-115.

В работе проведено исследование ряда недефицитных и легко обрабатываемых изоляционных материалов, с точки зрения применения их для изолирования собирающих обкладок измерительного конденсатора электрогранулометра аэрозольных частиц.

Были испытаны следующие материалы: качественно отлитый полипропилен, плохо отлитый, с пузырьковыми включениями полипропилен, термически обработанный полипропилен, дифлон, термически обработанный дифлон, прозрачный полистирол, ударопрочный полистирол, полиэтилен низкого давления, полиэтилен высокого давления и фторопласт-4. Для этих материалов измерены: 1) зависимость тока поляризации в электрическом поле, тока деполяризации и тока поляризации при механическом деформировании от времени; 2) зависимость генерируемого шумового тока от влажности воздуха; 3) удельное сопротивление.

По результатам исследований построен ряд по степени преимущества изоляционных материалов. Выявлено, что наиболее подходящим изоляционным материалом для электрогранулометров является полипропилен при условии качественной отливки и без дополнительной термической обработки.

Илл. 1. Табл. 3. Библ. 6. Рез. англ.

УДК 621.317.723

О ВЫБОРЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ И ЕЕ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МАЛЫХ ТОКОВ. Ансо М.Х. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 116-123.

Показано, что функцию передачи электрометра можно разделить на две части, одна из которых не зависит от параметров усилителя, а другая характеризует динамические свойства усилителя. При анализе последней выясняется, что, с точки зрения динамической точности, большие возможности имеет коррекция динамики электрометра методом умножения операторных чувствительностей по сравнению с методом частотнозависимой обратной связи. Даны некоторые практические указания для уменьшения динамической погрешности электрометров и приведены иллюстрирующие экспериментальные результаты.

Илл. 4. Библ. 2. Рез. англ.

УДК 621.717.715
621.382

К РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОМЕТРОВ ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ АЭРОИОНОВ. Миллер Ф.Г. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 124-132.

Описан электрометрический входной блок прямого усиления, предназначенный для применения в многоканальном спектрометре аэрозольных частиц. Приведены некоторые особенности транзисторов КП305, важные с точки зрения электрометрии (зависимость тока затвора от конструкции корпуса транзистора, распределение транзисторов по токам затвора и др.). Приведена схема конкретного предусилителя, имеющего входной паразитный ток $(0,3...1) \cdot 10^{-15}$ А, дрейф нуля в лабораторных условиях $0,25 \cdot 10^{-15}$ А/час и уровень шума при постоянной времени 50 с примерно $2 \cdot 10^{-16}$ А.

Илл. 5. Табл. 3. Библ. 11. Рез. англ.

УДК 541.6

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ СПЕКТРЫ ЗАМЕЩЕННЫХ АЦЕТИЛЕНОВ И ВИНИЛ-АЦЕТИЛЕНОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕМЕНТЫ IV ГРУППЫ. Виллем Н.В. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 588, Тарту, 1981, с. 133-141.

Измерены He(I) фотоэлектронные спектры замещенных ацетиленов $(\text{CH}_3)_3\text{Э}=\text{СН}$ и винилацетиленов $(\text{CH}_3)_3\text{Э}=\text{С}-\text{СН}=\text{СН}_2$ Э = С, Si, Ge. Ионизационные полосы в низкоэнергетической области идентифицированы и приписаны. Приписание основано на сравнении с близкими соединениями и ЛКСО рассмотрении. Двухцентровые π -орбитали тройной связи сопрягаются с π -орбиталями двойной связи и расщепляются. Гиперконъюгативное смешивание с "квази" π -орбиталями $(\text{CH}_3)_3\text{Э}$ -групп не приводит к такому расщеплению.

Илл. 3. Библ. 15. Рез. англ.