

TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI TOIMETISED
УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS
ALUSTATUD 1893.a Vihik 348 Выпуск ОСНОВАНЫ В 1893.г.

ИОНИЗАЦИЯ, АЭРОЗОЛИ, ЭЛЕКТРОМЕТРИЯ

VII



Tartu 1975

TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI TOIMETISED
УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS

ALUSTATUD 1893.a

Vihik 348 Выпуск

ОСНОВАНЫ В 1893.g.

ИОНИЗАЦИЯ, АЭРОЗОЛИ, ЭЛЕКТРОМЕТРИЯ

VII

ТАРТУ 1975

Редколлегия: П. Кард, Ю. Лембра, Я. Рейнет, В. Рийвес,
У. Нымм

С настоящего выпуска сборник "Труды по аэроионизации и электроаэрозолям" будет называться "Ионизация, аэрозоли, электрометрия" в связи с расширением тематики работ, выполняемых Проблемной лабораторией аэроионизации и электроаэрозолей Тартуского государственного университета.

Редколлегия

ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРА ПОДВИЖНОСТЕЙ ЛЕГКИХ АЭРОИОНОВ ОТ МИКРОПРИМЕСЕЙ ВОЗДУХА

Х. Ф. Таммет

I. Введение.

Хотя спектр подвижностей легких аэроионов изучается уже восемьдесят лет, накопленные знания скромны. Основные сведения о легких аэроионах получены в последние годы методами теоретических оценок молекулярной структуры и масс-спектрометрии аэроионов. Обзор соответствующих исследований можно найти в работе [1].

Современная теория позволяет оценить вероятности реакции при столкновениях аэроионов и молекул. Возможность получения практических выводов зависит от наличия количественных исходных данных. Для положительных аэроионов вырисовывается довольно достоверная картина распределения аэроионов по разным молекулярным структурам. Приложение теории для описания отрицательных аэроионов труднее. Кое-что известно об аэроионах малого возраста. При большом возрасте становятся существенными плохо изученные реакции с разными микропримесями воздуха.

Мы назовем условно микропримесями те газообразные составляющие воздуха, относительная концентрация которых не превышает 10^{-6} .

Масс-спектрометрический метод экспериментального изучения аэроионов отличается высокой разрешающей силой и дает информацию, оказывающую непосредственную помощь при идентификации молекулярного состава аэроионов. Масс-спектрометрическая аппаратура сложна, что ограничивает ее применение. В области большого возраста масс-спектрометрические исследования затруднены по причине малой концентрации аэроионов. Концентрация аэроионов ограничена сверху рекомбинацией и

электростатическим рассеянием. Относительная численная концентрация вышесекундных аэрозонов всегда ниже 10^{-13} .

Классический аспирационный метод, пригодный для анализа аэрозонов по подвижности, позволяет без труда зарегистрировать аэрозоны с относительной численной концентрацией 10^{-18} . Недостатком метода является низкая разрешающая сила. Без ответа остался даже вопрос о типе спектра подвижностей в аспирационном измерительном конденсаторе. Хотя мгновенный спектр подвижностей, безусловно, дискретный, высказывалось мнение, что аэрозоны успевают в измерительном конденсаторе многократно менять подвижность, а в результате линии подвижности размываются и сливаются в сплошной спектр.

Ниже будет показано, что аспирационный метод все же позволяет обнаружить дискретную структуру спектра подвижностей для отрицательной полярности и получить информацию о микропримесях воздуха. Дополнительно выявляется, что намеренное использование некоторых микропримесей дает возможность калибровки аппаратуры и повышения разрешающей силы.

2. Спектрометрическая аппаратура.

Для измерения спектра подвижностей использовались измерительный конденсатор и система протягивания воздуха, описанные в работе [2]. Аппаратура дополнена устройством автоматического управления [3], входным электрофильтром для осуществления дифференциального метода второго порядка, тритиевым ионизатором и трубой для старения аэрозонов.

Отношение действующих емкостей измерительного конденсатора $\sim 1/10$, отношение расходов $\sim 1/20$, радиусы обкладок 72,5 и 46 мм, средняя действующая емкость ~ 6 пф. Все описываемые измерения проведены при расходе 4,5 ... 5 дм³/с. Труба для старения аэрозонов является удлинением внешней обкладки измерительного конденсатора и обеспечивает при использовании полной ее длины возраст аэрозонов 2,5 с.

Абсолютная калибровка аппаратуры по подвижности довольно груба. Наименее точно определены действующая емкость и

расход воздуха, ошибка расчетной предельной подвижности составляет, вероятно, несколько процентов. Точность определения отношений подвижностей гораздо выше, поскольку сохранность режима измерения контролируется с ошибкой не более десятых долей процента.

Занесение внешней турбулентности предотвращено, и течение воздуха в измерительном конденсаторе ламинарно. Ширина аппаратной функции определяется, в первую очередь, тепловой диффузией аэроионов. Аппаратная функция вычислялась по приближенной теории [4] *, она изображается семейством почти гауссовых широких линий.

Хотя аппаратная функция рассчитывалась теоретически и определялась также экспериментально, ниже будут представлены только оригинальные записи спектрометра, не подвергнутые никакой вычислительной корректуре. Причина в том, что появление искусственных сателлитов спектральных линий (вычислительные "духи") при элементарных методах численного повышения разрешающей силы снижает доверие физиков к результатам такой обработки. Запись дифференциального счетчика второго порядка изображает в сглаженном виде функцию распределения проводимости и при сканировании напряжения с экспоненциальным шагом непосредственно соответствует рекомендациям [5].

При измерении аэроионов возраста 2,5 с аддитивная составляющая шума оказалась ниже 0,1% от пиковых значений записи. Основную ошибку внесла мультипликативная составляющая, коэффициент вариации имел значение 0,5 ... 3%.

* Формула (I9.26) в указанной работе содержит опечатки и должна иметь вид:

$$\mu = \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{2\ell^2} + \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) \ln \frac{r_2}{r_1} .$$

3. Иодовая линия.

Теоретические соображения позволяют ожидать, что наиболее значительно удастся воздействовать на спектр отрицательных аэроионов, добавляя к воздуху сильные электрооакцепторы. Это предсказание подтверждается экспериментом. Наиболее удобно генерируемой сильной электрооакцепторной примесью является, по-видимому, иод. Кристалл иода массой 1 г испаряется при комнатной температуре в слабом потоке воздуха со скоростью несколько мкг/с. Расход иода легко проверяется взвешиванием.

Результаты измерений показывают, что увеличение концентрации иода в воздухе сопровождается эффектом насыщения — спектр отрицательных аэроионов приближается к некоторому предельному спектру. Предельный спектр практически достигается уже при концентрации иода порядка сотен мкг/м³, для уверенного насыщения можно рекомендовать концентрацию 1 мг/м³.

Кривая предельного спектра для примеси иода показана на рис. 1.

В проведенных экспериментах предельный спектр не зависит от возраста аэроионов. При уменьшении возраста повышалась лишь пороговая концентрация насыщения. Колебание относительной влажности в пределах 24 ... 76% также почти не действовало на предельный спектр.

Теория дает для отношения стандартного отклонения почти гауссовой аппаратной функции использованного измерительного конденсатора к центру той же функции при подвижности аэроионов примеси иода значение 0,063. Запись предельного спектра повторяет в пределах ошибок расчета и измерения аппаратную функцию, указанное выше отношение имело на опыте значение 0,062. Отсюда можно заключить, что истинный предельный спектр состоит из одной дискретной линии, которая и называется нами иодовой линией.

Подвижность иодовой линии зависит от плотности воздуха. После приведения к нормальным условиям получено значение $1,75 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ с возможной ошибкой до нескольких процентов.

Ниже подвижность иодовой линии будет обозначена через JU и использована как практическая единица измерения подвижности. Иодовая единица подвижности и калибровка аппаратуры по иодовой линии позволяет избежать ошибки, возникающие из-за недостаточно точной определенности действующей емкости измерительного конденсатора и расхода протягиваемого воздуха, а также обойти приведение результатов к нормальным условиям.

Особенно полезна иодовая линия тем, что она позволяет экспериментально определять аппаратную функцию спектрометра легких аэрозонов. По сравнению с методикой, использованной, например, в работах [2, 4], достигается как упрощение эксперимента, так и уточнение результатов.

Основной недостаток метода калибровки аппаратуры по иодовой линии — возможное засорение измерительного конденсатора иодом. Для устранения следов иода может понадобиться длительное продувание. Поэтому рекомендуется не превышать концентрацию иода 1 мг/м^3 и проводить за минимальное необходимое время.

4. Воздух лаборатории.

Спектры аэрозонов в воздухе лаборатории без добавления специальных примесей были измерены многократно. Пример результатов представлен на рис. 1. Калибровочная запись иодовой линии демонстрирует здесь конфигурацию аппаратной функции.

Анализ результатов позволяет заключить, что спектральные линии положительных аэрозонов расположены столь тесно, что их нельзя разрешить при помощи использованной аппаратуры. Границы подвижности $0,45 \dots 0,9 JU$. Спектр положительных аэрозонов оказался стабильным при повторении измерений в разное время. На него не удалось сколь-нибудь значительно воздействовать и посредством испытанных примесей. По-видимому, спектр положительных аэрозонов не представляет интереса с точки зрения детектирования и анализа микропримесей воздуха.

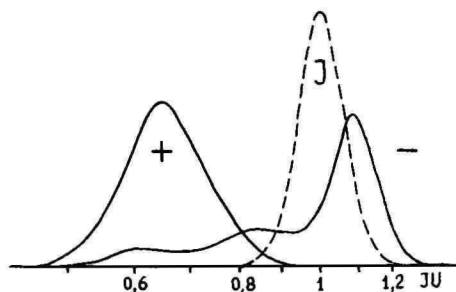


Рис. 1. Записи иодовой линии и спектров подвижностей легких положительных и отрицательных аэрозолей возрастом 2,5 с при температуре 18⁰С и относительной влажности 27%.

В дальнейшем будут рассмотрены только спектры отрицательных аэрозолей. Спектр подвижностей отрицательных аэрозолей содержит линии, разрешимые на запись без всякой математической обработки наблюдений. Границы подвижности 0,6 ... 1,1 U .

Подвижности линий отрицательных аэрозолей стабильны, но интенсивности линий меняются. Отношения интенсивностей зависят и от возраста аэрозолей. При увеличении возраста линия $\sim 0,8 U$ возрастала и достигала при возрасте порядка десятков секунд (естественный фон ионизации) примерно одинаковой высоты с линией $\sim 1,08 U$. Отмеченный эффект можно объяснить гипотезой, что линия $\sim 0,8 U$ обусловлена какой-то микропримесью с низкой концентрацией, но большим сродством к электрону.

Интенсивности линий были разны и для аэрозолей одного возраста при повторных измерениях в разное время, но в условиях почти одной и той же температуры и влажности. Вероятно, что это объясняется нестабильностью состава неконтролируемых микропримесей воздуха.

5. Примеси галоидов.

Все галоиды сильные электроноакцепторы и действуют на спектр отрицательных аэроионов.

Ковалева и Куду [6] обнаружили и описали сверхчувствительность зажигания разряда с острия к примеси хлора. Факт был объяснен электроноакцепторными свойствами хлора. Естественно ожидать, что влияние хлора проявится на спектре подвижностей раньше, чем оно станет достаточным для действия на начальные стадии разряда с острия.

Действие электроноакцепторных примесей на отрицательные аэроионы замечено и нашло применение в газовой хроматографии (см., например, работу [7]).

Примесь иода была рассмотрена уже выше. Действие других галоидов вполне аналогичное – при увеличении концентрации спектр вырождается в одну дискретную линию с подвижностью, характерной для конкретной примеси. Характерные подвижности следующие:

фтор	-	0,99 μ
хлор	-	1,1 μ
бром	-	0,88 μ
иод	-	1 μ

Теоретически объяснить этот ряд пока не удалось.

Разные характерные подвижности дают возможность дифференциального анализа микропримесей галоидов в воздухе методом спектрометрии подвижностей аэроионов. Отличить нельзя только фтор от иода.

Порог чувствительности был оценен для примеси хлора. Поток хлора с известным расходом был генерирован посредством электролиза насыщенного раствора хлорида натрия в четверть-миллилитровом фторопластовом сосуде, разделенном на две электродные секции, сообщающиеся через длинную и узкую щель. Результаты продемонстрированы на рис. 2. Коэффициент вариации экспериментальных точек в области 0,8 ... 1,2 μ составляет 1 ... 2% и может быть легко еще уменьшен. Кривые были бы уверенно различимы уже при концентрации хлора 0,1 мкг/м³.

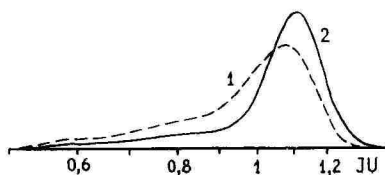


Рис. 2. Записи спектра подвижностей легких отрицательных аэроионов возрастом 2,5 с при температуре 20°C и относительной влажности 24%. 1 - воздух лаборатории со следами иода от предыдущих опытов, 2 - тот же воздух при добавлении $\sim 3 \text{ мкг/м}^3$ хлора.

6. Другие примеси.

Вполне аналогично с галоидами действует хлористый водород. Его характерная подвижность $0,97 \text{ JU}$.

Действие окислов серы, которые выделяются из насыщенного раствора сульфита натрия после добавления капли серной кислоты, показано на рис. 3.

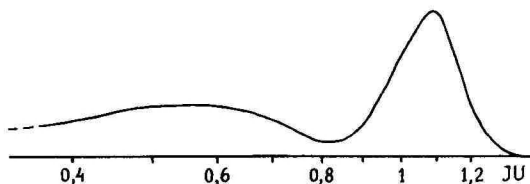


Рис. 3. Запись спектра подвижностей легких отрицательных аэроионов возрастом 2,5 с при добавлении к воздуху окислов серы. Температура воздуха 20°C , относительная влажность 24%.

В опытах с микропримесями сероводорода, аммиака, паров бензина, бензола и алкоголей не было замечено существенного сдвига спектра ни отрицательных, ни положительных аэроионов.

Не повлияли на спектр также химические продукты коронного разряда. Последний факт дает возможность заменить тритиевый ионизатор на коронный, что упрощает эксплуатацию аппаратуры.

Многие известные электрооакцепторы, например, циан, фреон, фосген и четыреххлористый углерод, не были испытаны.

Воздух всегда содержит влагу в концентрации, на много порядков величины превышающей концентрацию микропримесей. Колебания влажности существенно влияют на спектр подвижностей отрицательных аэроионов. Этот давно известный факт иллюстрирует рис. 4. Действие влажности оказывается, вероятно, важнейшей помехой при анализе микропримесей воздуха методом спектрометрии подвижностей легких отрицательных аэроионов.

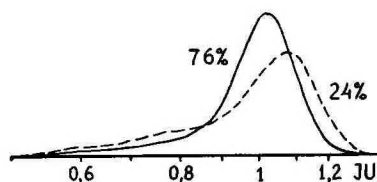


Рис. 4. Записи спектра подвижностей легких отрицательных аэроионов возрастом 2,5 с в воздухе лаборатории со следами мода от предыдущих опытов. Температура воздуха 20°C, относительная влажность указана при кривых.

7. Выводы.

Для калибровки спектрометра легких аэроионов может быть использован воздух с примесью паров мода. Спектр подвижностей отрицательных аэроионов в воздухе с концентрацией мода около 1 мг/м³ имеет вид одной дискретной линии.

Подвижность иодовой линии JU предлагается за практическую единицу подвижности в спектрометрии легких аэроионов. При нормальных условиях $1 JU \approx 1,75 \text{ см}^2/(\text{В.с})$. Применение иодовой единицы позволяет обойти затруднения, сопровождающие

абсолютную калибровку аппаратуры.

Иодовая линия дает возможность экспериментального определения аппаратной функции спектрометра легких аэроионов.

Спектр подвижностей легких аэроионов состоит из дискретных линий. При изменении букета примесей воздуха и при старении аэроионов спектральные линии не сдвигаются, а перераспределяются лишь их интенсивности.

Спектр положительных аэроионов оказался малочувствительным к примесям воздуха. Спектральные линии расположены тесно и их не удалось разрешить. Диапазон подвижностей положительных аэроионов возрастом 2,5 с был 0,45 ... 0,9 μ .

Спектр подвижностей отрицательных аэроионов сверхчувствителен к сильным электрооакцепторам. Например, хлор может быть обнаружен при концентрации ниже 1 мкг/м³. В воздухе без специальных примесей отрицательные аэроионы возрастом 2,5 с имели подвижность в пределах 0,6 ... 1,1 μ .

Все галоиды, а также хлористый водород, образуют отрицательные аэроионы с одной, характерной для данной примеси, подвижностью. Окислы серы образуют сложный спектр с хвостом, простирающимся в область малых подвижностей.

Метод спектрометрии подвижностей легких отрицательных аэроионов вышесекундного возраста может быть предложен для селективного детектирования электрооакцепторных микропримесей воздуха. Результаты наблюдения за спектром подвижностей аэроионов, по-видимому, содержат информацию об уровне некоторых загрязнителей воздуха.

Литература

1. Mohnen V.A. Formation, nature and mobility of ions of atmospheric importance. 5. intern. conf. on atmos. electricity, Garmisch-Partenkirchen, 1974, 23 pp.
2. Сальм Я.И. Экспериментальное исследование действия турбулентной диффузии в аспирационном счетчике аэроионов. Уч. зап. Тартуского гос.ун-та, вып. 239, Тарту 1969, с. 68-91.

3. Таммет Х.Ф., Якобсон А.Ф. Автоматическое управление одноканальным спектрометром аэроионов. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973, с. 27-35.
4. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 195, Тарту, 1967, 234 с.
5. Таммет Х.Ф. К общим проблемам спектрометрии аэроионов. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973, с. 5-12.
6. Куду К.Ф. О начальных стадиях разряда с острия в воздухе. Тарту, 1960, 56 с.
7. Ротин В.А. Радиоионизационное детектирование в газовой хроматографии. М., 1974, 190 с.

KERGETE AEROIOONIDE LIIKUVUSSPEKTRI SÕLTUVUS ÕHU
MIKROLISANDEIST

H. Tammet

Resüme

Kergete aéroioonide spektromeetri kalibrimiseks saab kasutada joodilisandiga õhku. Kergete negatiivsete aéroioonide spekter õhus, mis sisaldab ca 1 mg/m^3 joodiauru, koosneb ühest diskreetsest spektrijoonest.

Artiklis soovitatakse joodijoone liikuvust JU praktiliseks liikuvusühikuks. Normaalingimuste puhul on $1 \text{ JU} \approx 1,75 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Joodiühiku kasutamine kergete aéroioonide spektrometrias kõrvaldab aparatuuri absoluutse kalibrimisega seotud raskused.

Joodilisandiga õhk võimaldab katseliselt määrata kergete aéroioonide spektromeetri aparaadifunktsiooni.

Kergete aéroioonide liikuvusspekter koosneb diskreetsetest joontest. Õhu lisandibuketi ja niiskuse varieerumisel ning aéroioonide vananemisel muutuvad vaid spektrijoonete intensiivsused.

Positiivsete aeroioonide spektrijooned paiknevad tiheidalt ja neid ei õnnestu katses lahutada. Spekter on stabiilne ega sõltu olulisel määral mikrolisanditest. Enam kui 99% 2,5 s vanustest positiivsetest kergetest aeroioonidest oli katsetes liikuvusega 0,45...0,9 JU.

Negatiivsete aeroioonide spekter on ülitundlik tugevate elektronaktseptorite suhtes. Näiteks mõjustab kloor negatiivsete aeroioonide spektrit märgatavalt juba kontsentratsioonil alla $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Õhus, mis ei sisalda spetsiaallisandeid, oli enam kui 99% 2,5 s vanustest negatiivsetest aeroioonidest liikuvusega 0,6...1,1 JU.

Fluor, kloor, broom, jood ja kloorvesinik moodustavad igaüks vaid ühe, vaadeldavale lisandile iseloomuliku liikuvusega negatiivseid aeroioone. Väävlioksiidide lisamisel omandab spekter madalate liikuvuste poole ulatuva "saba" (vt. joon. 3).

Aeroioonide liikuvusspektri vaatlusandmed sisaldavad informatsiooni õhu mikrolisandite sisalduse kohta. Sekundit ületava vanusega kergete negatiivsete aeroioonide spektrometriat võib soovitada kui meetodit tugevate elektronaktseptorite mikrolisandite selektiivseks detekteerimiseks õhus.

THE DEPENDENCE OF THE MOBILITY SPECTRUM OF SMALL AIR IONS ON TRACE ADMIXTURES IN THE AIR

H. Tammet

Summary

The air containing traces of an iodine admixture can be used in the calibration of a spectrometer of small air ions. The spectrum of small negative air ions in the air containing about 1 mg of iodine vapour per cubic meter consists of a single discrete spectral line.

The mobility of an iodine line is recommended as a practical unit of mobility JU. Under normal conditions $1 \text{ JU} \approx 1.75 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. The use of an iodine unit in the spectro-

metry of small air ions removes difficulties connected with the absolute calibration of instrumentation.

The air containing traces of an iodine admixture makes it possible to experimentally determine the apparatus function of the spectrometer of small air ions.

The mobility spectrum of small ions consists of discrete lines. Under conditions in which the bouquet of admixtures and the humidity content of the air vary as well as in cases of aging of air ions, only intensities of spectral lines undergo changes.

The spectral lines of positive air ions are arranged so close to one another that investigators have not succeeded in separating them experimentally. Their spectrum is stable and does not depend essentially on trace admixtures in the air. Over 99% of positive small air ions aged 2,5 seconds showed mobilities ranging from 0.45 to 0.9 JU in experiments.

The spectrum of negative air ions is highly sensitive to strong electron acceptors. For instance, chlorine affects the spectrum of negative air ions noticeably already at a concentration below $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In the air which did not contain any special admixtures over 99% of negative air ions aged 2.5 seconds showed mobilities ranging from 0.6 to 1.1 JU.

Fluorine, chlorine, bromine, iodine and chloric hydrogen produce only negative air ions having a single mobility which is characteristic of the admixture under study. When sulphur oxides are added, the spectrum acquires a "trail" (see Fig. 3) extending in the direction of low mobilities.

Observational data on the mobility spectrum of air ions comprise information on the content of trace admixtures in the air. The spectrometry of small negative air ions aged over 1 second can be recommended as a method which can be used for the selective detection of trace admixtures of strong electron acceptors in the air.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ
МНОГОКАНАЛЬНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО
СПЕКТРОМЕТРА АЭРОИОНОВ

А.Ф. Якобсон, Я.И. Салым, Х.Ф. Таммет

Описание испытываемого многоканального спектрометра аэроионов приведено в литературе [1]. В отмеченной статье описан также метод обработки наблюдений, при котором результатом является спектр проводимости.

В настоящем же исследовании внимание сконцентрировано на определении неэлектрической характеристики - спектра размеров субмикроскопического аэрозоля, с применением того же спектрометра.

Для перехода от спектра проводимости к спектру размеров частиц аэрозоля (суммарно: как заряженных, так и незаряженных), во-первых, надо перейти от подвижности заряженных частиц к их размеру. Это осуществляется с помощью формулы Милликена - Кэнингема - Стокса [3]. Во-вторых, надо учитывать распределение зарядов на частицах аэрозоля (учитывать долю незаряженных частиц, однократно заряженных и т.д.). Для этого мы использовали теорию зарядки аэрозольных частиц в симметрично-биполярной ионной атмосфере [2]. Эта теория имеет известные ограничивающие предположения, однако, в настоящее время уточненные теории недостаточно разработаны.

Также подлежит разрешению вопрос - всегда ли достигается стационарное распределение зарядов на аэрозольных частицах, поскольку для этого требуется некоторое время. В типичных естественных условиях это время составляет несколько десятков минут. В нижеописанных опытах время ожидания, очевидно, везде достаточно.

Первая серия измерений проведена во время экспедиции Института физики атмосферы АН СССР на острове Сааремаа Эстонской ССР летом 1973 г. в условиях чистой атмосферы на побережье моря. Анализ результатов позволил выявить характер и параметры аппаратного шума в разных погодных условиях. Уровень аппаратного шума ограничивает число разрешимых фракций. В условиях низкой концентрации аэрозоля в чистой атмосфере это число не выше пяти. С учетом полученного опыта составлена программа обработки наблюдений, выдающая информацию уже не о проводимости, а непосредственно о численной концентрации субмикроскопического аэрозоля для пяти фракций в интервалах радиуса эквивалентных сферических частиц 10-17; 17-25; 25-40; 40-80 и 80 - ∞ нм.

При составлении программы принято допущение о скорости убывания концентрации с ростом радиуса выше 100 нм, основанное на анализе результатов наблюдений. Программа обработки (с названием "*Aerosol spectrum 10-100 nm*") выдает также оценку среднеквадратической ошибки по каждой фракции и некоторую дополнительную информацию. Ошибка измерения концентрации каждой фракции обычно находится в пределах 0,3 - 1 мм⁻³, корреляция ошибок соседних фракций отрицательна, значением 50-85%, корреляция ошибок фракций через одну положительна, значением 15-50%.

Приведем здесь в качестве примера средние значения из спектров, измеренных во время упомянутой экспедиции 17-го августа в 20 - 23 часа по московскому времени. В клетках указаны концентрации фракций, выше - граничные радиусы для этих фракций, справа - единицы измерения.

10	17	25	40	80	∞	нм
5,5	4,1	2,5	2,5	1,0		мм ⁻³

После экспедиции в схему электрометра были внесены некоторые изменения для того, чтобы после сильных входных импульсов электрометр быстро возвращался в нормальный режим. Таким образом, отдельные вышедшие из строя каналы меньше

нарушают работу прибора в целом. Преобразователь напряжения в код был заменен на аналогичный тип Ф4207.1.

Летом и в начале осени 1974 г. снята серия спектров в лабораторных условиях, как правило, три спектра подряд за один час в каждый рабочий день. Спектрометр находился в помещении объемом около 120 м^3 , в котором обычно находилось 5-6 человек, занимавшихся в основном электромонтажной работой. Особых источников загрязнения или ионизации не было. Помещение не отапливалось, слегка проветривалось. Погода в период измерений стояла в общем дождливая, относительная влажность в помещении в большинстве случаев колебалась от 60% до 70%.

В качестве примера приведем спектры для трех дней из упомянутой серии. Слева указаны число, месяц, год, часы и минуты начала измерений (по московскому времени). Последовательно измеренные спектры приведены один под другим

	10	17	25	40	80	∞	
15.07.74; 17.05	1,9	5,0	0,9	4,6	1,1		НМ ММ ⁻³
	2,8	4,0	1,7	4,1	1,7		
	2,2	4,3	1,6	3,7	1,5		

	10	17	25	40	80	∞	
16.07.74; 17.05	1,9	2,1	2,2	2,5	2,2		НМ ММ ⁻³
	1,2	1,1	4,5	2,6	1,7		
	1,3	2,8	3,6	2,4	2,4		

	10	17	25	40	80	∞	
17.07.74; 17.05	3,9	3,7	4,3	4,0	5,1		НМ ММ ⁻³
	3,0	3,9	4,0	5,2	5,8		
	1,8	3,7	2,3	4,3	5,3		

Эти параметры дают представление также о вариациях спектра, однако несовпадение концентраций отчасти обусловлено и случайными ошибками измерения, которые имеют средне-квадратическое значение ориентировочно $0,3 - 0,7 \text{ мм}^{-3}$ для одной фракции.

Средние значения по фракциям спектров, измеренных в течение одного месяца, с 15.07 до 15.08.74, т.е. среднее из 60 спектров.

10	17	25	40	80	∞	мм ⁻³
2,9	3,6	3,7	4,1	2,7		

Условия измерения в общих чертах охарактеризованы выше. Были проведены также некоторые простые эксперименты для выяснения влияния некоторых источников загрязнения. Измерения проводились в том же помещении.

а) Влияние работающего пылесоса.

Были сняты три спектра в обычных условиях, затем включен пылесос в нескольких метрах от спектрометра (шлангом не двигали). Приведем спектры до включения

10	17	25	40	80	∞	мм ⁻³
3,2	1,7	4,7	2,5	2,8		

и через час после включения

10	17	25	40	80	∞
40,3	10,6	4,3	4,1	3,5	

б) Влияние газового пламени.

Одиночная газовая горелка помещалась в нескольких метрах от спектрометра, горела ярким желтоватым пламенем (с ограниченным доступом воздуха). Спектр до зажигания горелки

10	17	25	40	80	∞	нм мм ⁻³
4,9	4,3	6,8	3,1	6,7		

Через час после зажигания

20,7	15,5	9,1	13,5	7,0
------	------	-----	------	-----

в) Влияние табачного дыма.

Спектр в обычных условиях

10	17	25	40	80	∞	нм мм ⁻³
3,6	3,9	3,0	4,0	2,2		

В удалении от спектрометра с надувом от вентилятора было выкурено две папиросы, так чтобы дым по возможности равномерно рассеивался в помещении. Спектр спустя час:

4,9	3,0	4,0	25,0	28,5
-----	-----	-----	------	------

Как видно, спектр субмикроскопического аэрозоля довольно чувствителен к указанным источникам загрязнения.

Изоляторы измерительного конденсатора в настоящей конструкции спектрометра не защищены от действия влаги и аэрозоля никакими специальными мерами. Испытания показали, что влажность начинает мешать измерениям, если относительная влажность продолжительное время выше 70%, измерения практически невозможны, если она выше 80%. Действие влажности проявляется в росте оценок ошибок измерения, которые вычисляются при обработке наблюдений. Увеличение ошибок измерения заметно также под действием дыма.

Выражаем благодарность проф. Г.В. Розенбергу за поддержку описанных исследований.

Литература

1. Таммет Х.Ф., Якобсон А.Ф., Салм Я.И. Многоканальный автоматический счетчик аэроионов. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973.
2. Фукс Н.А. О величине зарядов на частицах атмосферных аэроколлоидов. Изв. АН СССР, сер. географ. и геофиз., М., 1947.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., 1955.

MITMEKANALILISE AUTOMAATSE AEROIOONIDE SPEKTROMEETRI KATSETAMISE TULEMUSI

A. Jakobson, J. Salm, H. Tammet

Resümee

Kõnealuse aéroioonide spektromeetri kirjeldus on toodud samade autorite poolt Tartu Riikliku Ülikooli Toimetistes, vihik 320, Tartu, 1973. Käesolevas kirjutises on põhitähelepanu pööratud ühele õhu mitteelektrilisele karakteristikule - submikroskoopilise aerosooli mõõdete jaotusele (spektrile).

On koostatud katseandmete töötlemise programm "Aerosol spectrum 10 - 100 nm", milline annab välja spektri aerosooli kontsentratsioonidena viies fraktsioonis: ekvivalentsete sfääriliste osakeste raadiusvahemikes 10 - 17; 17 - 25; 25 - 40; 40 - 80 ja 80 - ∞ nm. Käesolevas kirjutises on vastavad spektrid esitatud kontsentratsioonidena ristkülikute sees, ühikutes - osakest kuupmillimeetris (mm^{-3}). Ristkülikutest kõrgemal on näidatud vastavad osakeste raadiuste piirid nende

fraktsioonide jaoks nanomeetrites (nm).

Esimene spekter on kolme tunni keskväärtaus, mõõdetud 1973. a. suvel, mererannikul, puhtas õhus.

Edasi tuleb rida spektreid, mis on mõõdetud 1974. a. suvel laboratooriumi ruumis; seejärel on esitatud ühe kuu jooksul samas ruumis mõõdetud spektrite keskväärtaus.

Lõpuks on toodud spektrid, mõõdetud samas ruumis ruumalaga umbes 120 m^3 , mis näitavad mõningate saastavate agentide mõju: a) tolmuimeja, b) gaasileek ja c) tubakasuits. Iga juhtumi jaoks on toodud algul spekter tavalise laboratooriumiõhu kohta, seejärel 1 tund pärast tolmuimeja sisselüümist, gaasileegi süütamist või vastavalt kahe paberossi põletamist.

Need spektrid demonstreerivad submikroskoopilise aerosooli mõõdete spektri suurt tundlikkust mainitud saastavate agentide suhtes.

RESULTS OF EXPERIMENTATION WITH THE MULTICHANNEL AUTOMATIC SPECTROMETER OF AIR IONS

A. Jakobson, J. Salm and H. Tammet

Summary

The description of the spectrometer of air ions under question has been given by the authors in the Transactions of Tartu State University, fascicle No. 320, Tartu 1973. The present paper draws special attention to one nonelectric characteristic of the air, namely the distribution of the dimensions (the spectrum) of submicroscopic aerosol particles.

A programme of the processing of experimental data entitled "The Aerosol Spectrum 10-100 nm" has been compiled which represents the spectrum of aerosol particles in the form of concentrations in five fractions of equivalent particles in radial intervals of 10-17; 17-25; 25-40; 40-80

and 80 - ∞ nm. The respective spectra have been presented in a table, the values of concentrations have been given within rectangles in units of particles per cube millimeter (mm^{-3}). Above the rectangles the respective boundaries of the particle radii for these fractions have been given in nanometers (nm).

The first spectrum represents the mean value of the spectra for three hours, measured on the seashore in conditions of clean air in the summer of 1973.

Then are given a number of spectra that were measured in a room of a laboratory in the summer of 1974. The room has a volume of 120 m^3 . These are followed by the mean values of the spectra measured in the same room in the course of a month. The last section of the paper presents the spectra that show the influence of some polluting agents: a) a vacuum cleaner, b) a gas flame and c) tobacco-smoke. For each case have been presented first the spectrum of ordinary laboratory air, then the spectrum of the air one hour after the switching-on of the vacuum cleaner or after the lighting of a gas flame or after smoking two cigarettes.

These spectra show a high sensitivity of the spectrum of the dimensions of submicroscopic aerosol particles to the polluting agents mentioned above.

СЧЕТЧИКИ АЭРОИОНОВ УТ - 69I4 и УТ- 7406

Р.Л. Матизен, Э.Ю. Ютс

В исследованиях атмосферной ионизации для измерения и непрерывной регистрации условной плотности заряда воздуха, а также для измерения плотности заряда аэрозолей применяются счетчики легких, средних и тяжелых аэроионов. При этих исследованиях часто приходится сталкиваться с различными неблагоприятными условиями, которые могут ограничить проведение исследований или сделать их невозможными. Такими условиями могут быть высокая относительная влажность воздуха, сильная запыленность, низкие температуры и т.п. Эти условия могут встретиться при исследованиях атмосферной ионизации на метеорологических станциях, в цехах заводов, в животноводческих помещениях и на птицефабриках.

Описываемые счетчики аэроионов УТ-69I4 и УТ-7406 предусмотрены для измерения и непрерывного регистрирования условной концентрации аэроионов, а также плотности заряда электроаэрозолей при относительной влажности воздуха до 99% в запыленной среде и температуре окружающего воздуха в пределах от $+40^{\circ}$ до -30° С, в широком диапазоне предельных подвижностей. Для обеспечения работоспособности прибора в этих условиях применена герметизация корпуса прибора, причем внутри него создается повышенное давление. Введена также система термостабилизации, обеспечивающая включение внутреннего подогрева при снижении температуры воздуха ниже $+5^{\circ}$ С. Прототипом этих счетчиков являются счетчики аэроионов САИ-ТГУ-65 и САИ-ТГУ-66 конструкции Х.Ф. Таммета [1, 2] . В целях повышения надежности прибора наиболее значительным изменениям подверглась схема электрометра, выполненного полностью на полупроводниках. Функциональная схема прибора изменилась мало и приведена на рис.1.

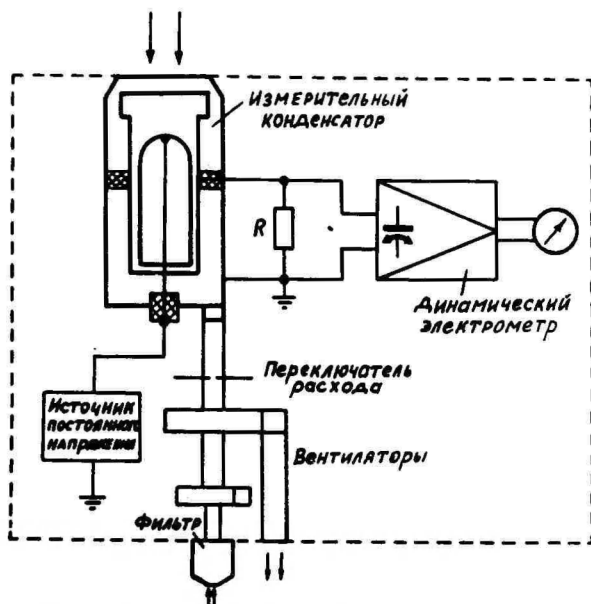


Рис. 1. Функциональная схема счетчиков аэроионов УТ-69I4 и УТ-7406.

Исследуемый воздух просасывается через измерительный конденсатор с помощью вентилятора, который насажен на вал электродвигателя постоянного тока. Постоянство оборотов обеспечивается центробежным регулятором. Для переключения расхода в воздушный тракт вводятся калиброванные диафрагмы.

Внутренняя обкладка конденсатора подключена к источнику напряжения, а внешняя ко входу электрометра.

Электрометры счетчиков действуют на основе компенсационного принципа и включены по схеме с емкостной модуляцией входного сигнала. В качестве модулятора используется динамический конденсатор, работающий на частоте 375-425 Гц. Обмотка возбуждения динамического конденсатора питается от генератора, собранного на двух транзисторах КТ315Г.

Модулированный сигнал усиливается усилителем переменного тока, на входе которого включен полевой транзистор

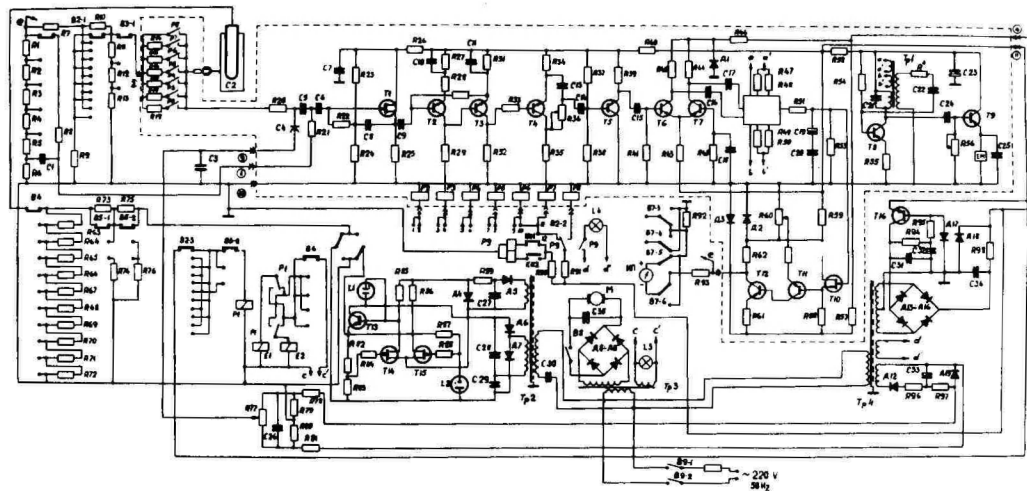


Рис. 2. Принципиальная схема счетчика типа УТ-7406.

типа КПиОЗ, имеющий высокое входное сопротивление. Усиленный сигнал детектируется синхронным детектором, а затем снова усиливается усилителем постоянного тока.

Выходное напряжение (находящееся в противофазе с входным напряжением) подается на измерительный прибор. Вся схема выполнена методом печатного монтажа.

Электронный счетчик УТ-6914 выполнен в виде отдельного блока с габаритами 130 x 130 x 65 мм и соединяется с остальными узлами прибора при помощи двух разъемов. Изменена также конструкция переключателя диапазонов измерения по концентрации.

Вместо цилиндрического барабана с закрепленными на нем измерительными сопротивлениями разработан переключатель, в котором сопротивления подключаются ко входу электрометра с помощью игольчатых контактов и реле.

Конструктивно переключатель счетчика УТ-6914 также выполнен в виде отдельного блока и соединяется с остальными узлами при помощи двух разъемных соединений.

Измерительный конденсатор, блок высокого напряжения, схема сглаживания, а также циферблаты передней панели по сравнению со счетчиком САИ-ТТУ-66 не изменились.

Воздух для поддержания повышенного давления внутри корпуса прибора засасывается через фильтр с помощью дополнительного вентилятора, насаженного на вал того же двигателя, что и основной вентилятор.

Фильтр представляет собой металлический цилиндр, в котором между двумя слоями ткани Петрянова находится силикогель. Воздух, проходя через фильтр, осушается и очищается от пыли.

Габариты счетчика УТ-6914 520 x 260 x 240 мм, вес не более 17 кг. Питание от сети 220 в 50 Гц, потребляемая мощность не превышает 30 Вт при выключенной системе подогрева.

В счетчике УТ-7406 дальнейшим изменениям подверглась схема электрометра. Благодаря применению транзисторов КТ315 и использованию в синхронном детекторе интегральной схемы КИИТ983А удалось несколько уменьшить размеры электрометра.

Применена новая схема стабилизированного источника высокого напряжения, предложенная Х.Ф. Тамметом. В связи с тем, что максимальное напряжение, подаваемое на внутреннюю обкладку измерительного конденсатора, составляет 400 В вместо 780 В в прежних разработках, изменились пределы измерения по предельной подвижности. В целях уменьшения размеров прибора блок переключателя диапазонов по концентрации конструктивно объединен в один блок с электрометром, в качестве регистрирующего прибора применен двухшкальный микроамперметр типа М 1632. Принципиальная схема прибора приведена на рис. 2.

В заключение приведем основные технические характеристики прибора УТ-7406.

1. Диапазон предельной подвижности $0,0002 \dots 16 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.
2. Измерение концентрации аэроионов возможно в пределах от 10 до $3 \cdot 10^9$ эл.зар./см³.
3. Ориентировочная суммарная погрешность не превышает 10%.
4. Диапазон рабочих температур - $30^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$.
5. Питание от сети или преобразователя 220 В, 50 Гц.
6. Потребляемая мощность около 20 Вт при выключенной системе подогрева.
7. Габаритные размеры 516 x 370 x 144 мм.
8. Масса не более 12 кг.

Литература

1. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. Уч. зап. Тартуского гос.ун-та, вып. 195, Тарту, 1967.
2. Таммет Х.Ф. Счетчик аэроионов САИ-ТГУ-66. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 240, Тарту, 1970, с. 157-163.

AERIOONIDE LOENDURID UT-6914 JA UT-7406

R.Matisen, E.Üts

Resüme

Artiklis kirjeldatakse universaalseid aerioonide loendureid, mis võimaldavad töötamist rasketes kliimatilistes tingimustes (kõrge relativse niiskuse korral ja suures temperatuuride vahemikus). Töökindluse tõstmise eesmärgil dünaamilise elektromeetri skeem on valmistatud täielikult pooljuhtidel, teistes blokkides on tehtud konstruktiivseid muudatusi võrreldes eelmiste mudelitega.

AIR ION COUNTERS UT-6914 AND UT-7406

R.Matisen and E. Üts

Summary

The paper presents a description of the general-purpose air-ion counters of the types UT-6914 & UT-7406 which can be used in unfavourable climatic conditions (excessive relative humidity, wide range of extreme temperatures). With the aim of enhancing the reliability of the instrument the scheme of the dynamic electrometer operates entirely on semiconductors, structural changes have been made in other blocks of the set-up compared with the previous models.

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГРАНУЛОМЕТРИИ АЭРОЗОЛЕЙ

Х.Ф. Таммет

1. Введение.

Электрическая гранулометрия означает измерение спектра размеров аэрозольных частиц при помощи аппаратуры, выходной сигнал которой непосредственно зависит от функции распределения плотности заряда аэрозоля по электрической подвижности частиц $g(k)$:

$$I(\psi) = \int G(\psi, k) g(k) dk. \quad (I)$$

В уравнении (I) I означает силу тока, ψ - управляемый параметр и $G(\psi, k)$ - аппаратную функцию измерительного конденсатора. Для перехода от функции $g(k)$ к спектру размеров необходимо знать вероятность $p_i(r)$ i -кратного заряда ie частицы с размером r и подвижность $k_i(r)$ i -кратно заряженной частицы. Символ e означает элементарный заряд. Функции $G(\psi, k)$, $p_i(r)$ и $k_i(r)$ зависят только от метода измерения и аппаратуры, все они будут рассматриваться ниже как известные до измерения. Определение конкретного вида упомянутых функций не входит в задачи настоящего исследования.

При классическом подходе переходы от сигнала $I(\psi)$ к спектру по подвижности и от спектра по подвижности к спектру по размеру рассматриваются как два самостоятельные этапа обработки наблюдений. В практике электрической гранулометрии использовалась, как правило, простейшая теоретическая модель, в которой заряды всех заряженных частиц одной полярности и одного размера принимаются одинаковыми. При этом второй этап сводится просто к преобразованию шкалы и двухэтапная обработка наблюдений не вызывает принципиальных воз-

ражений. Затруднения появляются тогда, когда мы стараемся учесть действительное статистическое распределение зарядов. Двухэтапная обработка наблюдений усложняет оценку ошибок измерения спектра по размеру и в этом случае лучше перейти к методу одноэтапной обработки наблюдений, который описывается ниже.

2. Непрерывная модель.

Рассмотрим дифференциальный интервал размеров (r , $r + dr$). Если $f(r)$ — функция распределения численной концентрации частиц по размеру, то численная концентрация всех частиц рассматриваемого интервала равна $f(r)dr$, а i -кратно заряженных частиц — $p_i(r)f(r)dr$. Последние несут объемный заряд со средней плотностью $g^{(i)}(k_i)dk_i = ie p_i(r)f(r)dr$. Значения k_i и dk_i определяются по значениям r и dr согласно функции $k_i(r)$. Сила тока i -кратно заряженных частиц в измерительном конденсаторе будет

$$I^{(i)}(\psi) = \int G(\psi, k_i) g^{(i)}(k_i) dk_i = ie \int G(\psi, k_i(r)) p_i(r) f(r) dr, \quad (2)$$

а сила тока всех частиц

$$I(\psi) = \sum_i I^{(i)}(\psi) = \int [e \sum_i i G(\psi, k_i(r)) p_i(r)] f(r) dr. \quad (3)$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках, зависит только от аппаратуры и метода измерения. Обозначим его кратко $H(\psi, r)$ и запишем уравнение гранулометра в компактном виде

$$I(\psi) = \int H(\psi, r) f(r) dr. \quad (4)$$

Функция H называется аппаратной функцией электрического гранулометра, она вычисляется по формуле

$$H(\psi, r) = e \sum_i i p_i(r) G(\psi, k_i(r)). \quad (5)$$

3. Конечномерная модель.

Задача решения уравнения (4) поставлена некорректно в смысле Адамара и это уравнение непосредственно не может служить основой алгоритма обработки наблюдений. Реальным задачам измерения более соответствуют конечномерные математические модели.

Рассмотрим переход от непрерывной модели к конечномерной. Для простоты примем фракционную модель спектра размеров частиц. Спектр описывается конечным набором фракционных концентраций $\{n_j\}$. Каждое n_j равно концентрации частиц в j -том поддиапазоне $[r_{j-1}, r_j)$ размеров. Допустим, что внутри каждого поддиапазона

$$f(r) = n_j f^{(j)}(r) / \int_{r_{j-1}}^{r_j} f^{(j)}(r) dr. \quad (6)$$

Функции $f^{(j)}(r)$ считаются заранее известными, эксперимент должен определить лишь числа n_j .

В согласии с реальной ситуацией допустим, что параметр ψ пробегает конечную совокупность значений $\{\psi_e\}$. Для краткости примем обозначения $I_e = I(\psi_e)$, $G_e(k) = G(\psi_e, k)$ и $H_e(r) = H(\psi_e, r)$. Если вычислить интеграл (4) как сумму интегралов по фракциям, то получим

$$I_e = \sum_j \left[\frac{1}{\int_{r_{j-1}}^{r_j} f^{(j)}(r) dr} \int_{r_{j-1}}^{r_j} H_e(r) f^{(j)}(r) dr \right] n_j. \quad (7)$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках, зависит только от метода измерения, аппаратуры и априорных допущений. Обозначим это выражение для краткости H_{ej} . Тогда конечномерное уравнение гранулометра коротко записывается

$$I_e = \sum_j H_{ej} n_j. \quad (8)$$

Множители H_{ij} образуют матрицу, которая называется аппаратной матрицей электрического гранулометра. Используя формулу (5), элементы аппаратной матрицы можно выразить следующим образом:

$$H_{ij} = \frac{e}{\int_{r_{j-1}}^{r_j} f^{(j)}(r) dr} \int_{r_{j-1}}^{r_j} f^{(j)}(r) \sum_i i \rho_i(r) G_p(k_i(r)) dr. \quad (9)$$

Если функция $H_{ij}(r)$ гладка и фракции узкие, то аппаратная матрица почти не зависит от конкретного вида функций $f^{(j)}(r)$, и эти функции можно выбирать произвольно. В противном случае функции $f^{(j)}(r)$ определяются с учетом предварительных знаний об общем характере спектра размеров аэрозольных частиц.

4. Заключение.

Одноэтапное описание преобразования спектр-сигнал в электрическом гранулометре аэрозолей позволяет построить простую математическую модель гранулометра, которая оказывается частным случаем стандартной модели линейной теории спектрометрии. Это дает возможность приложить в гранулометрии аэрозолей стандартные алгоритмы обработки наблюдений линейной теории спектрометрии и получить результаты вместе с оценкой ошибок измерения.

AEROSOOLIDE ELEKTRILISEST GRANULOMEETRIAST

H. Tammet

Resümee

Traditsiooniline kaheastmeline matemaatiline mudel ei võimalda aerosooli elektrilises granulomeetrias otseselt rakendada spektrometria lineaarteooria standardmeetodeid. Artiklis konstrueeritakse granulomeetri üheastmeline matemaatiline mudel nii pideva kui ka lõplikumõõtmelise käsitlusviisi jaoks ning tuletatakse granulomeetri võrrandeis (4, 8) esineva aparaadifunktsiooni (5) ja aparaadimaatriksi (9) üldavaldised.

ON THE ELECTRIC GRANULOMETRY OF ELECTRIC AEROSOLS

H. Tammet

Summary

The traditional two-stage mathematical model does not enable one to directly apply standard methods of the linear theory of spectrometry to the electrical granulometry of aerosols.

The article presents a one-stage mathematical model of a granulometer designed both from a continuous and a discrete point of view and derives general expressions of the apparatus function (5) and the apparatus matrix (9) occurring in granulometric equations (4, 8).

О ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАРЯДКЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Э.И.Тамм

I. Введение.

Электрический заряд аэрозольных частиц играет немаловажную роль в поведении аэрозоля как целого, существенно влияя на рассеивание, осаждение и коагуляцию частиц. В приложениях аэрозолей часто прибегают к их искусственной (униполярной или биполярной) зарядке. При этом заряд, получаемый частицей, существенно зависит от ее линейного размера. Назовем зарядку строго функциональной в том случае, когда все частицы одинакового размера получают точно одинаковые заряды и электрические подвижности. Такой процесс — идеализированный предельный случай реального процесса приближенной функциональной зарядки, когда частицы одинакового размера получают приближенно одинаковые заряды и подвижности. Очевидно, что функциональная зарядка является униполярной.

Функциональность зарядки важна во многих технических приложениях (например, при электросепарации частиц), но особое значение приобретает она при исследовании аэрозолей. Здесь можно выделить такие частные случаи функциональной зарядки, как аналитическая зарядка, которая должна обеспечить возможность определения распределения размеров по измеренному распределению электрических подвижностей частиц, и мономобильная зарядка, используемая для создания аэрозолей с частицами приближенно одинаковой подвижности. Последние удобны при исследовании электрических свойств аэрозольных облаков, калибровке измерителей заряда частиц и для направленного осаждения частиц. В случае использования монодисперсных аэрозолей две упомянутые частные задачи функциональной зарядки могут быть решены одним и тем же методом, но в общем случае будет существенной и специфика задач. Например, если частицы разного размера получают одинаковые подвижности, то метод зарядки надо признать идеальным для мономобиль-

ной зарядки; но совершенно не пригодным для аналитической.

Следует отметить, что для определения распределения размеров по распределению подвижностей частицы можно заряжать и в биполярной ионной атмосфере, где создается равновесное распределение подвижностей, зависящее от распределения линейных размеров. Такой способ зарядки также, в принципе, может быть назван аналитическим, но в связи с тем, что функциональным, в определенном выше смысле, он не является, биполярной зарядки мы здесь касаться не будем.

Для аналитической зарядки ультрамикроскопических и микроскопических частиц (характерный линейный размер $d \geq 0,1$ мкм) предпочтительна зарядка потоком легких аэроионов во внешнем электрическом поле, так как для таких частиц при зарядке без внешнего поля (чисто диффузионная зарядка) зависимость подвижности k частиц от их размера d слаба, а при увеличении d , когда поправкой Кенингема к формуле Стокса для сопротивления среды можно пренебречь, эта зависимость совсем исчезает. Исходя из вышесказанного, при монобильной зарядке можно предпочесть диффузионную зарядку, хотя достижение больших зарядов затруднительно.

Определенные выше термины "функциональная зарядка", "аналитическая зарядка" и "монобильная зарядка" не встречаются в литературе, однако описываемый во множестве работ процесс зарядки аэрозольных частиц можно отнести к этим типам зарядки. При исследовании закономерностей процесса зарядки частиц потоком ионов во внешнем поле многие авторы пытались зарядить частицы возможно строго функционально [1 - 5, 22]. Функциональную зарядку в ионной атмосфере без внешнего поля исследовали Уитби с сотрудниками [7 - 9]. В работах [10 - 12] целью была монобильная зарядка частиц для изучения движения заряженных частиц. Существует множество работ, где для электрической спектрометрии размеров частиц применяется аналитическая функциональная зарядка во внешнем поле [13 - 19] или без него [20].

Целью данной работы является определение критериев качества аналитической и монобильной зарядки и анализ воз-

возможностей повышения качества этих видов функциональной зарядки.

2. Функции распределения аэрозольных частиц

Заряженный аэрозоль можно охарактеризовать двумерными функциями распределения частиц по размерам и зарядам f_{rq} и по размерам и подвижностям f_{rk} . При условии $q \gg e$ (q - заряд частиц, e - элементарный заряд), когда дискретностью шкалы заряда можно пренебречь, эти функции рассматриваются как непрерывные (бесконечномерные), нормированные к единице распределения. Маргинальные одномерные спектры f_r , f_q и f_k определяются как интегралы от f_{rq} и f_{rk} по всей области определения одного из аргументов; они также нормированы к единице.

При экспериментальном определении спектров частиц, в связи с конечным объемом выборки, непрерывное представление спектров непригодно. Шкалы r , k и q разбивают некоторым способом на интервалы (при этом должно быть соблюдено условие $\Delta q > e$) и подсчитывают число частиц n_{ij} , попадающих в четырехугольники $\Delta r_i \Delta k_j$ на плоскости rk (или $\Delta r_i \Delta q_j$ на плоскости rq) при определении двумерных спектров, или число частиц n_i , попадающих в интервалы Δr_i (или Δk_i , Δq_i) при определении маргинальных спектров. Получается конечномерное представление спектров в виде наборов фракций. Графическая картина такого конечномерного представления одномерного спектра известна под названием гистограммы. Для плотности распределений получаются оценки:

$$\tilde{f}_{r,k_j} = \frac{n_{ij}(\Delta r_i, \Delta k_j)}{N \Delta r_i \Delta k_j}, \quad (2.1)$$

$$\tilde{f}_{r,q_j} = \frac{n_{ij}(\Delta r_i, \Delta q_j)}{N \Delta r_i \Delta q_j}, \quad (2.2)$$

$$\tilde{f}_{r_i} = \sum_j \tilde{f}_{r_i q_j} \Delta q_j = \sum_j \tilde{f}_{r_i k_j} \Delta k_j = \frac{n_i(\Delta r_i)}{N \Delta r_i}, \quad (2.3)$$

$$\tilde{f}_{k_i} = \sum_j f_{r_j k_i} \Delta r_j = \frac{n_i(\Delta k_i)}{N \Delta k_i}, \quad (2.4)$$

$$\tilde{f}_{q_i} = \sum_j \tilde{f}_{r_j q_i} \Delta r_j = \frac{n_i(\Delta q_i)}{N \Delta q_i}. \quad (2.5)$$

Здесь N означает объем выборки, r_i , k_i и q_i - средние значения величин r , k , q в интервалах Δr_i , Δk_i , Δq_i .

Конечномерные маргинальные спектры \tilde{f}_r , \tilde{f}_k , \tilde{f}_q , состоящие из m фракций, можно рассматривать как векторы в m -мерных пространствах, а само конечномерное описание спектров - как результат алгебраизации бесконечномерного (непрерывного) описания. Экспериментальное определение описанных выше плотностей распределения связано с трудоемкими операциями подсчета числа частиц в соответствующих интервалах величин r , k , q . Нередко экспериментальному определению легче поддаются распределения некоторых, зависящих от выше-названных аргументов, физических характеристик аэрозоля по этим аргументам. В случае заряженного аэрозоля легко измеряется (например, аспирационным методом) спектр плотности объемного заряда, описываемый плотностью распределения плотности объемного заряда по подвижностям ρ_k :

$$\rho_k(k) = \frac{dq}{dk} = \lim_{\Delta k \rightarrow 0} \frac{\Delta \rho(k, k + \Delta k)}{\Delta k}. \quad (2.6)$$

Здесь $\Delta \rho(k, k + \Delta k)$ означает абсолютную долю плотности объемного заряда, причиненную частицами с подвижностями в интервале $[k, k + \Delta k)$. ρ_k обычно нормируют к суммарной плотности заряда ρ :

$$\int_0^{\infty} \rho_k(k) dk = \rho. \quad (2.7)$$

При наличии однозначной связи $q = q(k)$ между зарядом и подвижностью частицы, g_k можно выразить через f_k :

$$g_k(k) = f_k(k) q(k) n, \quad (2.8)$$

где n означает числовую концентрацию частиц.

Статистическая оценка функции g_k дается конечномерным вектором \tilde{g}_k с элементами:

$$\tilde{g}_{ki} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} q_j}{\Delta k_i V}. \quad (2.9)$$

В числителе сумма зарядов всех n_i частиц, подвижности которых попадают в интервал Δk_i , V означает объем аэрозоля, откуда взята проба, т.е. промерены все N частиц. Заметим, что статистическая оценка (2.9) не требует наличия однозначной связи между q и k . Необходимо только, чтобы плотность заряда была постоянна по всему объему аэрозоля или же чтобы ее можно было считать постоянной для объема V .

3. Операторы зарядки

Процесс зарядки аэрозоля математически описывается преобразованием одномерного спектра незаряженного аэрозоля f_r в двумерный спектр f_{rk} (или f_{rq}). (Строго говоря, незаряженного аэрозоля не бывает, но мы здесь пренебрегаем слабыми равновесными зарядами на частицах аэрозоля до их зарядки.) Этот процесс можно рассматривать как применение некоторого оператора зарядки к спектру f_r , в результате чего получается новая функция распределения. Обозначим операторы зарядки символически:

$$f_r \rightarrow f_{rk}, \quad (3.1)$$

$$f_r \rightarrow f_{rq}. \quad (3.2)$$

Таким же образом можно рассматривать преобразование спектра f_r в маргинальные спектры подвижностей и зарядов f_k и f_q . Соответствующие маргинальные операторы зарядки:

$$f_r \rightarrow f_k, \quad (3.3)$$

$$f_r \rightarrow f_q. \quad (3.4)$$

Наконец, можно рассматривать оператор, преобразующий f_r в g_k :

$$f_r \rightarrow g_k. \quad (3.5)$$

С точки зрения аналитической зарядки наибольший интерес представляет последний оператор, потому что g_k сравнительно легко определить экспериментально. Поэтому в дальнейшем изложении речь будет идти, главным образом, именно об этом операторе и связи его с операторами (3.3) и (3.1).

Назовем зарядку линейной в том случае, если оператор (3.1) линейный и его можно представить в виде

$$f_{rk}(r, k) = M(k, r) f_r(r), \quad (3.6)$$

где функция $M(k, r)$ не зависит от спектра размеров. Это возможно только тогда, когда процесс зарядки любой частицы не влияет на процесс зарядки любой другой частицы. Маргинальный оператор (3.3) выражается

$$f_k(k) = \int_0^{\infty} M(k, r) f_r(r) dr. \quad (3.7)$$

Положив $f_r(r) = \delta(r - r')$, получим

$$f_k(k) = M(k, r'),$$

т.е. $M(k, r)$ представляет собой спектр подвижностей f_k , получаемый при зарядке строго монодисперсного аэрозоля.

$M(k, r') = f_k(k|_{r=r'})$ есть не что иное как условная плотность распределения подвижностей при условии, что $r = r'$.

При строго функциональной зарядке, очевидно, получается однозначная связь между r и k частицы. $M(k, r)$ можно тогда представить в виде:

$$M(k, r) = \left| \frac{dr}{dk} \right| \delta(r-r'). \quad (3.8)$$

Тогда

$$f_k^f(k) = \int_0^\infty \left| \frac{dr}{dk} \right| \delta(r-r') f_r(r) dr = f_r^f(r') \left| \frac{dr}{dk} \right|_{r=r'}.$$

Из строго монодисперсного аэрозоля получается строго моно-мобильный аэрозоль.

Конкретизируем вид оператора (3.5) для случая линейной зарядки. Из (2.8) и (3.7) получим:

$$g_k(k) = \int_0^\infty M_g(k, r) f_r(r) dr, \quad (3.9)$$

где

$$M_g(k, r) = M(k, r) q_r(k) n. \quad (3.10)$$

Назовем $M_g(k, r)$ функцией преобразования зарядника.

$M_g(k, r)$ интерпретируется (аналогично $M(k, r)$) как спектр плотности объемного заряда, получаемый при зарядке строго монодисперсного аэрозоля, т.е. как условная плотность распределения g_k при условии $r = r'$:

$$g_k(k|_{r=r'}).$$

При строго функциональной зарядке можно $M_g(k, r)$ также выразить через дельта-функцию, аналогично (3.8):

$$M_g(k, r) = q_r(k) n \left| \frac{dr}{dk} \right| \delta(r-r'). \quad (3.11)$$

Для практического использования необходимо представить (3.9) в конечномерном виде:

$$\tilde{g}_k = M_g \tilde{f}_r. \quad (3.12)$$

Здесь \tilde{g}_k и \tilde{f}_r - вектор-столбцы, M_g - матрица преобразования. Физическая интерпретация M_g : j -ый столбец матрицы M_g дает умноженный на Δr_j вектор g_k , получаемый при зарядке монодисперсного аэрозоля, радиус всех частиц которого остается в интервале Δr_j .

При строго функциональной зарядке, исходя из вышесказан-

ного, k и r связаны однозначно: $k = k(r)$. Если шкалы r и k разбить на интервалы так, чтобы границы интервалов r_ℓ и k_ℓ были связаны: $k_\ell = k(r_\ell)$, то M_φ получается диагональной.

4. Обратная задача определения f_r по φ_k . Качество зарядки

Выражение (3.9) можно рассматривать как интегральное уравнение для определения f_r . В математическом анализе задача о решении этого уравнения считается некорректно поставленной. В случае заданного $\tilde{\varphi}_k$ и невырожденной квадратной M_φ конечномерное уравнение (3.12) решается точно. Если же число строк матрицы M_φ превышает число столбцов, то преобразованием Гаусса уравнение можно привести к квадратному виду:

$$M_\varphi^T \tilde{\varphi}_k = (M_\varphi^T M_\varphi) \tilde{f}_r. \quad (4.1)$$

Здесь M_φ^T — транспонированная матрица M_φ . Это равносильно решению системы несовместных уравнений методом наименьших квадратов.

Некорректность уравнения (3.9) отражается в плохой обусловленности матрицы M_φ , так что в реальных условиях, когда вектор $\tilde{\varphi}_k$ определяется экспериментально, формальное решение уравнения (3.12) (или (4.1)) может стать бесполезным, ввиду чрезвычайного усиления ошибок измерения. Отсюда возникает задача определения условий, при которых достигается наилучшая обусловленность матрицы преобразования, т.е. задача об оценке качества аналитической зарядки. К сожалению, теория некорректно поставленных или плохо обусловленных обратных задач не разработана еще в той мере, чтобы стало возможным ввести строгий универсальный критерий качества аналитической зарядки, и мы выведем этот критерий на основе полунтуитивных соображений.

В случае строго функциональной зарядки, когда, при условии соответствующего разбиения шкалы радиусов и шкалы под-

вижностей (см. п. 3), матрица M_{ρ} диагональна, затруднений за счет плохой обусловленности не возникает. На практике затруднений, очевидно, тем меньше, чем ближе зарядка к строго функциональной, т.е. чем меньше ширина спектра или стандартное отклонение $\sigma_{k|r}$ подвижностей частиц фиксированного радиуса r . Но $\sigma_{k|r}$ непосредственно не характеризует качества аналитической зарядки. Качество это определяется кажущейся шириной функции f_r° , вычисленной через функцию f_k , которая получена при зарядке частиц строго фиксированного размера. Мерой этой кажущейся ширины f_r° в реальных условиях зарядки аэрозоля с конечной дисперсией размеров частиц можно считать стандартное отклонение $\sigma_r|k$, оцениваемое (при условии, что зависимость $k = k(r)$ допускает линеаризацию) как

$$\sigma_r|k \approx \sigma_{k|r} \left| \frac{dr}{dk} \right|.$$

Критерием качества аналитической зарядки можно считать обратную величину кажущегося относительного стандартного отклонения:

$$\xi = \frac{r}{\sigma_r|k} \approx \frac{r}{\sigma_{k|r}} \left| \frac{dk}{dr} \right| \approx \frac{r}{\sigma_{k|r}} \left| \frac{dk_r}{dr} \right|. \quad (4.2)$$

Критерий (4.2) является безразмерным. \bar{k}_r и $\sigma_{k|r}$ являются характеристиками функции условного распределения величины k при фиксированном значении величины r : условным средним значением и условным стандартным отклонением.

При практическом применении критерия (4.2) невозможно, разумеется, строго фиксировать r . В этом случае за $\sigma_{k|r}$ придется принять стандартное отклонение спектра подвижностей частиц, радиусы которых попадают в возможно узкий интервал Δr , в простейшем случае — просто σ_k спектра подвижностей, полученного при зарядке приближенно монодисперсного аэрозоля с известной шириной спектра радиусов. Хорошей оценкой для $\sigma_{k|r}$ служит квадратный корень из средней условной дисперсии величины k для приближенно монодисперсного аэрозоля. dk_r/dr можно оценить тангенсом угла наклона касательной к кривой регрессии $\bar{k}_r = \bar{k}_r(r)$. Вместо кривой регрессии можно использовать и взаимную зависимость средних значений \bar{k}

и \bar{r} , характеристик маргинальных спектров f_k (или g_k) и f_r приближенно мономобильного аэрозоля: $\bar{k} = k(\bar{r})$.

Приближенное равенство (4.2) выполняется тем точнее, чем теснее коррелятивная связь между k и r . dk/dr в (4.2) означает угловой коэффициент касательной к кривой функциональной связи $k = k(r)$, которая получилась бы при строго функциональной зарядке в условиях, определяемых средними значениями влияющих на процесс зарядки величин в реальном заряднике. При слабой корреляции k и r dk_r/dr значительно меньше dk/dr . В таких условиях при экспериментальной оценке ξ полезно использовать исходную формулу $\xi = r/\sigma_r/k$. Если работать с приближенно монодисперсным аэрозолем, то за оценки r и σ_r/k можно взять среднее значение и квадратный корень из средней условной дисперсии величины r .

Значительно проще вывести критерий для качества мономобильной зарядки, так как этот критерий сходится с критерием качества самого мономобильного аэрозоля. Этим критерием может служить, очевидно, отношение

$$G_k = \bar{k} / \sigma_k, \quad (4.3)$$

где σ_k — стандартное отклонение маргинального спектра f_k (или g_k). К этому определению необходимо еще добавить, по какой из функций, f_k или g_k , следует вычислить \bar{k} и σ_k . Но так как при мономобильных частицах значения этих параметров, вычисленные по обеим отмеченным функциям, практически совпадают, мы не будем в определении ограничивать выбора функции.

Такой же критерий $G_r = \bar{r} / \sigma_r$ для оценки качества монодисперсного аэрозоля предложил Бернер [6].

Так как задачи генерирования аэрозоля и мономобильной зарядки на практике часто решаются совместно, целесообразно их рассматривать комплексно как задачу генерирования мономобильного аэрозоля.

5. Возможности определения матрицы преобразования

Для экспериментального определения M_3 существует, в

принципе, два различных метода. Первый из них вытекает непосредственно из физической интерпретации M_g , данной в конце п. 3. Измерим r , q и k для всех частиц в выборке достаточно большого объема и разобьем шкалы r и k на (возможно узкие) интервалы Δr_i , Δk_j . Будем считать радиус всех частиц в интервале r_i фиксированным и равным некоторому среднему значению этого интервала, и по формуле (2.9) вычислим вектор $\tilde{g}_k = \tilde{g}_k(k|r \approx r_i)$. Получаем оценку для i -го столбца матрицы M_g .

Второй метод определения M_g заключается в следующем. Пусть определению подлежит квадратная матрица M_g с n строками и n столбцами, причем интервалы Δr_i и Δk_j заданы некоторым образом. Экспериментально необходимо определить n -мерные векторы $\tilde{f}_{r_i, \bar{r}_s}$, $\tilde{g}_{k_j, \bar{r}_s}$ при различных значениях среднего радиуса \bar{r}_s . Желательно, чтобы этих векторов было n штук, т.е. $s = 1, 2, \dots, n$. образуем матрицы

$$F = \begin{pmatrix} \tilde{f}_{1\bar{r}_1} & \tilde{f}_{1\bar{r}_2} & \dots & \tilde{f}_{1\bar{r}_n} \\ \tilde{f}_{2\bar{r}_1} & \tilde{f}_{2\bar{r}_2} & \dots & \tilde{f}_{2\bar{r}_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{f}_{n\bar{r}_1} & \tilde{f}_{n\bar{r}_2} & \dots & \tilde{f}_{n\bar{r}_n} \end{pmatrix}, \quad (5.1)$$

$$R = \begin{pmatrix} \tilde{g}_{1\bar{r}_1} & \tilde{g}_{1\bar{r}_2} & \dots & \tilde{g}_{1\bar{r}_n} \\ \tilde{g}_{2\bar{r}_1} & \tilde{g}_{2\bar{r}_2} & \dots & \tilde{g}_{2\bar{r}_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{g}_{n\bar{r}_1} & \tilde{g}_{n\bar{r}_2} & \dots & \tilde{g}_{n\bar{r}_n} \end{pmatrix}. \quad (5.2)$$

Из (3.12) вытекает равенство

$$R = M_g F, \quad (5.3)$$

откуда

$$M_g = RF^{-1}. \quad (5.4)$$

Для обоих методов отсутствует достаточно развитая теория, позволяющая оценить точность получаемых оценок M_g . При первом методе можно только интуитивно сказать, что минимальная допустимая ширина интервалов Δr лимитируется величиной случайных погрешностей определения r . При втором методе интуиция подсказывает в некоторой степени требования к функциям $f_{r\bar{r}}$: они не должны быть слишком близки друг к другу, в таком случае явно получается плохо обусловленная матрица F . Разработка теории методов определения M_g не является целью данной работы.

6. Функциональная зарядка аэрозольных частиц в униполярной ионной атмосфере

Как известно из многих теоретических и экспериментальных работ, при зарядке частиц ионами во внешнем электрическом поле существует два механизма зарядки — ударный и диффузионный. По Мирзабекяну [21] заряд, полученный шарообразной частицей, с ошибкой не более чем 20% (для электропроводящих частиц — 10%) можно определить как сумму зарядов, рассчитанных по теории обоих механизмов зарядки в отдельности. В таком приближении для электрической подвижности частицы получается формула:

$$k = LME_0 r \left(1 + A \frac{\ell}{r}\right) H_1(n_0 t) + LN \left(1 + A \frac{\ell}{r}\right) H_2(n_0 t). \quad (6.1)$$

Здесь введены обозначения

$$L = \frac{2\epsilon_0}{3\eta}, \quad M = 1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}, \quad N = \frac{KT}{e}, \quad H_1 = \frac{\pi k' e n_0 t}{4\pi \epsilon_0 + \pi k' e n_0 t},$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, K — постоянная Больцмана, e — заряд электрона, η , T — вязкость и абсолютная температура среды, k' , n_0 — подвижность и концентрация ионов, r , ϵ — радиус и диэлектрическая проницаемость вещества частицы, E_0 — напряженность электрического поля, t — время пребывания частицы в области пространства с парамет-

рами E_0 и n_0 . N_2 является табулированной функцией от $n_0 t$, представленной, к примеру, в [21] графически.

Формула (6.1) не учитывает стохастический характер процесса зарядки — даже при строго фиксированных внешних условиях (E_0 , n_0 , t) получается конечный разброс зарядов и подвижностей частиц одинакового размера. По вычислениям Мирзабекяна [21] среднеквадратический разброс зарядов для частиц с $r = 0,1$ мкм составляет 1 эл. зар., а для частиц с $r = 1$ мкм — 2,5 эл. зар. В случае сильной униполярной зарядки, учитывая еще невысокую точность самой формулы (6.1), мы этим разбросом будем пренебрегать и рассматривать процесс зарядки как вполне детерминированный внешними условиями.

Из (6.1) видно, что в устройстве для функциональной зарядки частиц — функциональном заряднике — необходимо обеспечить возможно строгое постоянство E_0 и n_0 в зоне зарядки, т.е. в той части объема зарядника, где находятся или проходят аэрозольные частицы и существует ионная атмосфера, а также времени прохождения частиц через эту зону. Если зарядник имеет ось симметрии, то надо поддерживать E_0 и n_0 постоянными только в любом поперечном разрезе зоны зарядки. Необходимо также поддержание этих величин E_0 , n_0 и t постоянными во времени на протяжении всего сеанса зарядки. Зависимость двух членов в (6.1) от r различна: при возрастании r первый член возрастает, а второй убывает, приближаясь при $r \gg \ell$ к постоянной (не зависящей от r) величине. Ясно, что для мономобильной зарядки необходимо иметь возможно строго монодисперсный аэрозоль; даже при больших частицах ($r \gg \ell$) иногда оказывается полезным применение чисто диффузионной зарядки (в (6.1) сохраняется только второй член), если не требуется возможно большая подвижность частиц.

Качество аналитической зарядки, как известно из формулы (4.2), определяется величинами $\sigma_{k|r}$ и $|dk/dr|$. Условную дисперсию $\sigma_{k|r}$ можем выразить:

$$\sigma_{k|r} = \frac{\sigma_{k|r}}{\bar{k}_r} \bar{k}_r = \frac{\bar{k}_r}{G_{k|r}}. \quad (6.2)$$

Величина $G_{k|r} = \bar{k}_r / \sigma_{k|r}$ является обратной величиной коэффициента вариации функции условного распределения подвижных частиц при фиксированном значении радиуса r . Для ξ получим:

$$\xi = \frac{r}{\bar{k}_r} \left| \frac{dk}{dr} \right| G_{k|r} \quad (6.3)$$

\bar{k}_r можем выразить через формулу (6.1), предполагая, что E_0 и $n_0 t$ в ней означают некоторые средние значения для зоны зарядки. Для dk/dr получим:

$$\frac{dk}{dr} = LME_0 H_1 - LNA \frac{\ell}{r^2} H_2 \quad (6.4)$$

Таким образом, с точностью применимости формулы (6.1) для критерия качества аналитической зарядки получаем:

$$\xi = \frac{|ME_0 H_1 - NA \frac{\ell}{r^2} H_2|}{(1 + A \frac{\ell}{r})(ME_0 H_1 + N \frac{\ell}{r} H_2)} G_{k|r} = |\xi'| G_{k|r} \quad (6.5)$$

Здесь введено обозначение

$$\xi' = \frac{ME_0 H_1 - NA \frac{\ell}{r^2} H_2}{(1 + A \frac{\ell}{r})(ME_0 H_1 + N \frac{\ell}{r} H_2)} \quad (6.6)$$

Легко видеть, что $|\xi'| < 1$; значит $\xi \leq G_{k|r}$.

$G_{k|r}$ определяется разбросом величин E_0 и $n_0 t$ в зоне зарядки, т.е. чисто техническими свойствами зарядника. ξ' определяется средними значениями E_0 , $n_0 t$ и r . Так как E_0 имеет принципиальный верхний предел (пробивная напряженность поля), то видно, что при фиксированном r существует и принципиальный верхний предел для $|\xi'|$, причем для мелких частиц может оказаться предпочтительным зарядник без внешнего поля ($E_0 = 0$). В этом случае имеем:

$$\xi = \frac{1}{1 + \frac{r}{A\ell}} G_{k|r} \quad (6.7)$$

Видно, что ξ не зависит от плотности ионов в зоне зарядки. Но при $E_0 \neq 0$ такая зависимость существует. Значит, в общем случае представляет интерес исследование зависимости

ξ от r , E_0 и $n_0 t$. На рисунке представлены графики зависимости ξ' от r при некоторых значениях E_0 и $n_0 t$.

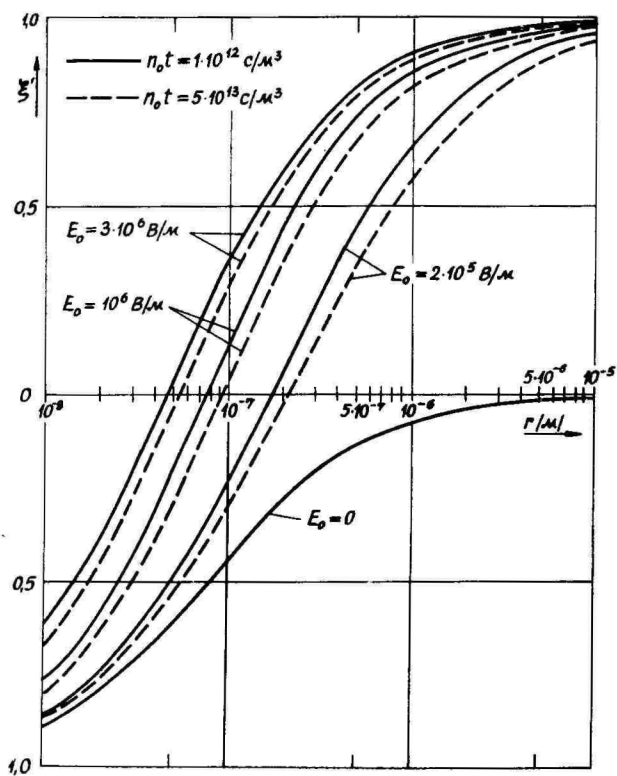


Рис. Зависимость ϵ' от радиуса частиц r при некоторых значениях величин E_0 и $n_0 t$.

Графики построены для случая $\varepsilon = 2,24$ (дибутилфталат), подвижность ионов принята равной $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Видно, что при $r \lesssim 0,1 \text{ мкм}$ всегда целесообразно применять зарядник без внешнего поля. В промежутке радиусов $0,1 \text{ мкм} < r \lesssim 2 \text{ мкм}$ целесообразно применять зарядник с максимальной возможной напряженностью внешнего поля. В случае больших частиц ($r \gtrsim 2 \text{ мкм}$) зависимость ξ' от напряженности поля E_0 становится слабой.

Графики показывают, что ξ' слабо зависит от произведения $n_0 t$. При этом с уменьшением $n_0 t$ в заряднике с внешним полем в условиях преобладания ударного механизма ($\xi' > 0$), т.е. там, где вообще есть смысл применить такой зарядник, $|\xi'|$ немного увеличивается. Так как уменьшение концентрации ионов n_0 подавляет и действие ионного ветра, создавшего неоднородность условий зарядки в зоне зарядки (тем самым уменьшая величину $G_{k|r}$), то ясно, что следует отдавать предпочтение зарядникам с низкой концентрацией ионов в зоне зарядки. В заряднике без внешнего поля выбор значения концентрации ионов зависит от конкретных возможностей достижения однородной концентрации.

Снижение концентрации ионов в заряднике влечет за собой уменьшение абсолютного значения подвижности частиц и плотности заряда в аэрозоле. При этом, как правило, ухудшается разрешающая способность спектрометров подвижности частиц. Поэтому в конкретных условиях необходимо каждый раз отдельно решать вопрос о том, выгодно ли снижение концентрации ионов в заряднике, или же выигрыш в качестве зарядки компенсируется ухудшением свойств измерительной аппаратуры.

В связи с тем, что формула (6.1), на которой базируются все изложенные здесь выкладки, является приближенной, а зависимость $G_{k|r}$ и G_k от конкретных условий зарядки поддается только экспериментальному исследованию, необходимо предпринять экспериментальное исследование как аналитической, так и мономобильной зарядки. Некоторые результаты экспериментального исследования мономобильной зарядки приведены в статье [23].

Литература

1. Fuchs N., Petrjanoff I., Rotzeig B. On the rate of charging of droplets by an ionic current. *Trans. Faraday Soc.*, 32, 1936, 1131.
2. Klumb H., Schütz A. Untersuchungen über die elektrische Aufladung von Aerosolen. *Zs. Aerosol-Forsch. Therap.* 6, 1957, Nr.1, 40-53.
3. Hewitt G.W. The charging of small particles for electrostatic precipitation. *AIEE trans.*, 76, 1957, No.31, 300-306.
4. Penney G.W., Lynch R.D. Measurements of charge imparted to fine particles by a corona discharge. *AIEE Trans.*, 76, 1957, 294-299.
5. Dötsch E., Fridrichs H., Knacke O., Krahe J. Zur Kinetik der elektrischen Aufladung eines Aerosols. *Staub*, 29, 1969, Nr. 7, 282-286.
6. Berner A. Über die Kondensation von Dämpfen hochsiedender Flüssigkeiten zu monodispersen Aerosolen. - Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der phil. Fak. der Universität Wien, 1964.
7. Whitby K.T., Mc Farland A.R. The decay of unipolar small ions and homogeneous aerosols in closed spaces and flow systems. *Proc. Internat. conf. ioniz. air*, Philadelphia, Pa, Vol.2, 1961, VII/1-VII/30.
8. Whitby K.T., Peterson C.M. The electrical neutralisation and particle size measurement of dye aerosols. *Ind. Engrg. Chem. Fund.*, 4, 1965, 66.
9. Vomela R.A., Whitby K.T. The charging and mobility of chain aggregate smoke particles. *J. Coll. Interf. Sci.*, 25, 1967, No.4, 568-576.
10. Goyer G.G., Gruen R., La Mer V.K. Filtration of monodisperse electrically charged aerosols. *J. Phys. Chem.*, 58, 1954, No.1, 134-142.

11. Hochrainer D., Hidy G.M., Zebel G. Creeping motion of charged particles around a cylinder in an electric field. *J. Coll. Interf. Sci.*, 30, 1969, No.4, 553-567.
12. Hochrainer D. Zur Aerosolabscheidung an einer Einzel-faser unter dem Einfluss elektrischer Kräfte. *Staub*, 29, 1969, Nr.2, 67-70.
13. Rohman H. Methode zur Messung der Grösse von Schwebeteilchen. *Zs. Phys.*, 17, 1923, 253-265.
14. Lipscomb W.N., Rubin I.R., Sturdivant J.H. An investigation of a method for the analysis of smokes according to particle size. *J. Appl. Phys.*, 18, 1947, No.1, 72-79.
15. Yosikawa H.H. et al. Electrostatic particle size analyzer. *Rec. Sci. Instrum.*, 27, 1956, No.6, 359-362.
16. Lassen L., Weickel H. Die Anlagerung radioaktiver Atome an Aerosole (Schwebestoffe) im Grossenbereich 0,7 - 5 μ m (Radius). *Zs. Phys.*, 161, 1961, H. 3, 339-345.
17. Langer G., Radnik J.L. Development and preliminary testing of a device for electrostatic classification of submicron airborne particles. *J. Appl. Phys.*, 32, 1961, No.5, 955-957.
18. Langer G., Pierrard J., Yamate G. Further development of an electrostatic classifier for submicron airborne particles. *Int. J. Air and Water Poll.*, 8, 1964, No.3/4, 167-176.
19. Salbreiter H., Stierstadt K. Der Einfluss unipolarer Elektrischer Ladungen auf die Beweglichkeit von natürlichen Aerosol. *Zs. Phys.*, 196, 1966, Nr. 5, 495-503.
20. Whitby K.T., Clark W.E. Electric aerosol particle counting and size distribution measuring system for the 0,015 to 1 micron size range. *Tellus*, 18, 1965, No. 2-3, 573-586.

21. Мирзабекян Г.З. Зарядка аэрозолей в поле коронного разряда. В сб. "Сильные электрические поля в технологических процессах". М., 1969, с. 20-39.
22. Макальский Л.М., Мирзабекян Г.З. Экспериментальное исследование зарядки частиц размером 0,2 - 4 мкм ионами воздуха. В сб. "Сильные электрические поля в технологических процессах", вып. 2. М., 1971, с. 95-108.
23. Тамм Э.И. Экспериментальное исследование генератора монобильного аэрозоля. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973, с. 193-176.

AEROSOOLOSIAKESTE FUNKTSIONAALSEST LAADIMISEST

E. Tamm

Resümee

Nimetame aerosooliosakeste rangelt (või ligikaudu) funktsionaalseks laadumiseks sellist protsessi, mille käigus ühesuguste lineaarmõõtmega osakesed saavad täpselt (või ligikaudu) võrdsed laengud ja elektrilised liikuvused. Käesolevas töös on lähemalt vaadeldud funktsionaalse laadumise kahe erijuhu - analüütilise ja monomobiilse laadumise kvaliteedi kriteeriume ja nende sõltuvust laadumisprotsessi mõjutavatest teguritest.

Laadumisprotsessi võib matemaatiliselt vaadelda kui laadimisoperaatori rakendamist laadimata aerosooli osakeste lineaarmõõtmete jaotusfunktsioonile f_r , see operaator teiseb funktsiooni f_r osakeste laengutiheduse jaotusfunktsiooniks liikuvuste järgi g_k . Juhul, kui iga osakese laadumisprotsessi võib vaadelda sõltumatu teistest osakestest (mitte eriti suure tihedusega aerosool), on operaator lineaarne ja väljendub valemitega (3.8) (pidevate jaotusfunktsioonide korral) ja (3.11) (diskreetsete jaotusfunktsioonide korral). Funktsiooni (maatriksit) M_g nimetame laadimiseadme teiseb-dusfunktsiooniks (-maatriksiks).

Kui M_g on tuntud, võib valemeid (3.8) ja (3.11) vaadelda kui võrrandeid f_r määramiseks mõõdetud g_k kaudu. Siin ongi meil tegemist analüütilise laadimisega. Ülesanne on lahenduv, kui maatriks M_g ei ole liiga halvasti määratud. Poolintuitiivsetest kaalutlustest defineeritud analüütilise laadumise kvaliteedi dimensioonitu kriteeriumi ξ (valem (4.2)) väärtuse kasvades paranebki M_g määratus. ξ võib esitada kahe teguri korrutisena (valem (6.5)). Joonisel on esitatud laadumistingimuste (väljatugevuse E_0 , ioonide kontsentratsiooni n_0 ja osakese poolt laadumistsooni läbimise aja t) keskmistest väärtustest sõltuva teguri ξ' sõltuvus osakese raadiusest r suuruste E_0 ja $n_0 t$ mitmesuguste väärtuste korral kerakujuliste osakeste jaoks.

Laadumisprotsessi, mille tulemusena saadakse ligikaudu võrdsete liikuvustega osakesi sisaldav aerosool, nimetame monomobiilseks laadumiseks. Monomobiilse laadumise kvaliteedi kriteeriumi G_k (valem (4.3)) kasvades väheneb jaotusfunktsiooni g_k laius.

ON THE FUNCTIONAL CHARGING OF AEROSOL PARTICLES

E. Tamm

Summary

The author defines strict (or approximate) functional charging of aerosol particles as a process during which particles with the same linear dimensions are imparted exactly (or approximately) equal charges and electrical mobilities. The present paper deals in more detail with two special cases of functional charging - the analytical and the monomobile one - and their dependence on the factors affecting the process of charging.

The process of charging can from the mathematical point of view be regarded as the application of the charging operator to the distribution function f_r of the linear dimensions of uncharged aerosol particles. This operator trans-

forms the function f_r into the distribution function of the charge density of particles according to the mobilities g_k . In case the charging of any aerosol particle can be regarded as being independent of other particles (aerosols with not very high density), the operator is linear and can be expressed by means of formula (3.8) in the case of continuous distribution functions and through the medium of formula (3.11) in the case of discrete distribution functions. The function (matrix) M_g can be named the transformation function (or matrix) of the charging device.

If M_g is known, formulas (3.8) and (3.11) can be regarded as equations to be used for the determination of f_r through measured g_k . This is a case of analytical charging. The problem is solvable when the matrix M_g has not been too badly conditioned. The dimensionless criterion ξ (formula 4.2) of the quality of analytical charging has been defined by semi-intuitive considerations. The definiteness of M_g will improve with an increase in the value of ξ . ξ can be represented as a product of two factors (formula 6.5). The factor ξ' is defined by the mean values of the charging conditions (such as the field strength E_0 , the ion concentration n_0 , and t , denoting the time taken by the passage of particles through the charging zone). Figure 1 represents the dependence of ξ' on the radius r of a particle for some values of E_0 and $n_0 t$ for spherical particles.

The process of charging resulting in aerosols containing particles having approximately equal mobilities is called monomobile charging. The width of the distribution function g_k diminishes with an increase in the criterion G_k (formula 4.3) of the quality of monomobile charging.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗАРЯЖЕНИЕ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОРОННОГО РАЗРЯДА

Л.Ю.Виснапуу

Электрически заряженные частицы диспергированного в газовой среде вещества представляют особый интерес для многих отраслей народного хозяйства. Для заряжения частиц часто используют коронный разряд. Как соответствующим зарядным устройствам, так и теории зарядки посвящено немало работ. Но во многих из них недостаточно показана связь между конструктивными и режимными параметрами устройств и их характеристиками. Это затрудняет разработку эффективных зарядных устройств и нахождение их оптимального рабочего режима. Поэтому в данной работе представлен критический обзор литературы по заряжению аэрозоля в поле коронного разряда. Основное внимание уделено оценке эффективности зарядных устройств и соответствующим инженерным вопросам.

Электризация частиц дыма ионами, образующимися при коронном разряде, осуществлена уже в 1830 г. в классическом опыте Холфельда [1]. На этом принципе в конце прошлого века был разработан способ электрической газоочистки, а в тридцатых годах этого века начались исследования по нанесению покрытий в электрическом поле.

В зарядке частиц аэрозоля ионами различают два механизма присоединения ионов к частицам: во-первых, вследствие их беспорядочного теплового движения (диффузионная зарядка) и, во-вторых, в результате столкновения при направленном движении их под действием внешнего поля (ударная зарядка).

Первые измерения зарядов частиц в поле коронного разряда принадлежат Хауэру [2]. Он пришел к выводу, что частицы заряжаются в основном из-за адсорбции ионов под действием электрического поля.

По экспериментальным данным Романа [3] частицы окиси железа радиусом 1-3 мкм, обтекая коронирующее острие при на-

пряженности поля около 200 В/мм, за доли секунды приобретает заряды 120-480 е, в то время как расчетные значения заряда составляют 510-550 е ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - элементарный электрический заряд).

Потенье и Моро-Ано [5] нашли выражение заряда, приобретаемого частицей за счет ударной зарядки.

$$q_{yug} = 4\pi\epsilon_0 E \delta r^2 e k_u N_u t / (4\epsilon_0 + e k_u N_u t), \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная, E - напряженность электрического поля в точке нахождения частицы, $\delta = 1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}$ - показатель диэлектрических свойств частицы, ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость, r - радиус частицы, k_u - электрическая подвижность иона, N_u - счетная концентрация ионов в невозмущенной зоне зарядки, t - время зарядки. Эквивалентную формуле (1) зависимость вывел еще раньше Роман [3].

Диффузионную зарядку частиц впервые рассматривал Дейч [6], теорию которого позднее уточнили Арендт и Кальман [7], Капцов [8], Фукс [9], Уайт [10]. В ионизированной газовой среде частица за счет диффузии ионов приобретает заряд

$$q_{diff} = 4\pi\epsilon_0 \frac{r}{e} K T \ln \left(1 + \frac{c_u e^2 r N_u t}{4\epsilon_0 K T} \right), \quad (2)$$

где $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура газа, $c_u = 3RT/\mu$ - средняя квадратичная скорость теплового движения ионов, $R = 8300$ Дж/(кмоль·К) - универсальная газовая постоянная, μ - молекулярная масса газа.

Формулы (1) и (2) выведены при упрощающих условиях, когда 1) первоначально все частицы не заряжены, 2) частицы между собой не взаимодействуют, 3) концентрация ионов в зоне зарядки значительно превышает концентрацию частиц, 4) все ионы, попадающие на частицу, остаются на ней.

В опытах работы [7] использовали α - излучение, создающее в зарядной зоне концентрацию ионов $0,5-67$ мм⁻³, причем напряженность электрического поля не превышала 30 В/мм. Время зарядки доходило до нескольких часов. Частицы масла радиусом $0,5-2,2$ мкм получали заряды, удовлетворительно согла-

сущиеся с расчетными по формуле (2).

Для практических расчетов формулам (1) и (2) можно придать другой вид. Приняв $k_u = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ [4], $T = 300 \text{ К}$, $\mu = 29 \text{ кг/кмоль}$, получим соответственно

$$q_{уд} = 1,1 \cdot 10^{-10} E \delta r^2 N_u t / (1,3 \cdot 10^{12} + N_u t) \quad (3)$$

и

$$q_{диф} = 2,8 \cdot 10^{-12} r \ln (1 + 8,8 \cdot 10^{-5} r N_u t). \quad (4)$$

В работах Спурного и др. [11, с.54] и Ужова [12, с.42] без достаточных объяснений приведена формула максимального заряда, приобретаемого частицей радиусом менее 0,5 мкм под действием теплового движения ионов,

$$q_{диф макс} = 3,2 \cdot 10^{-11} r. \quad (5)$$

Дифференциальные уравнения, одновременно учитывающие процессы диффузионной и ударной зарядки, слишком сложны для аналитического решения их. Используя ЭВМ, Мерфи и др. [13] численно решили ряд таких уравнений по методу конечных разностей.

Швейтцер [14] изучал зарядку частиц масла радиусом 0,2 - 0,6 мкм в условиях повышенной концентрации ионов $10^5 - 10^6 \text{ мм}^{-3}$, создаваемой коронирующей проволокой в цилиндре. Напряженность поля равнялась 300 - 500 В/мм, а время зарядки порядка 1 с. Большинство частиц оказалось заряженными слабее, чем это следовало бы ожидать по формуле (2). Но встречались частицы, особенно радиусом более 0,4 мкм, которые были заряжены значительно сильнее, например, при радиусе 0,6 мкм заряды достигали 700 е. По предположению автора пониженные значения заряда обусловлены ограниченным временем зарядки, за которое частицы не успели еще максимально зарядиться, а повышенные заряды объясняются сильной ударной ионизацией в непосредственной близости с коронирующим электродом. В общем подтверждалась линейная зависимость заряда от радиуса частицы.

Согласно экспериментальным данным Заксе [4] частицы радиусом 0,5 - 4,0 мкм приобретали в поле коронного разряда заряды, пропорциональные квадратам их радиусов, как следу-

ет также из формулы (I). При напряженности поля 500 В/мм частицы масла радиусом более 2 мкм заряжались менее чем за 1 с до нескольких тысяч элементарных зарядов.

Тщательные измерения зарядов частиц радиусом 5 - 100 мкм и до 10 мм, пролетающих через поле коронного разряда между тонкой проволокой и коаксиальным цилиндром, были проведены Потенье и Моро-Ано [5]. С точностью нескольких процентов полученные результаты удовлетворяли формуле (I). Наибольшая согласованность отмечалась для крупных частиц.

С целью получения заряженных частиц для ингаляции Виленкин [15] предложил ионизировать струю воздуха, распыливающего ингаляционную жидкость. Для оценки эффективности зарядки таким способом отсутствуют количественные данные. Можно полагать, что большие потери ионов будут в воздушном сопле и на поверхности распыливаемой жидкости.

Закономерность заряжения капелек масла в поле коронного разряда изучали также Фукс и др. [16]. Частицы радиусом 0,5 - 3,0 мкм проходили осесимметричный разрядный промежуток с концентрацией ионов $(2,0 - 3,4) \cdot 10^4 \text{ мм}^{-3}$, причем плотность тока составляла $(3 - 10) \cdot 10^{-5} \text{ А/мм}^2$, напряженность электрического поля 56 - 94 В/мм и время зарядки 0,01 - 0,02 с. Измеренные значения зарядов частиц с точностью около 30% совпадают с расчетными по формуле (I).

В более поздней работе Фукс [9] рассматривал диффузию ионов в электрическом поле частицы. Здесь при решении диффузионного уравнения, определяющего поток ионов на частицу, считая последнюю абсолютно поглощающей, одно из граничных условий выбрано несколько иначе, чем в работе [7]. Согласно этому подходу

$$q_{\text{диф}} = 4 \pi \epsilon_0 \frac{r}{e} \text{КТА} (N_u t), \quad (6)$$

где $A(N_u t)$ - табулированная функция.

Кинетику как диффузионной зарядки, так и зарядки, происходящей под одновременным действием теплового и направленного движения ионов, анализировал Капцов [8]. Он вывел формулу кинетики диффузионной зарядки, определяющей процесс

электризации частиц радиусом менее 0,5 мкм в ионизированной среде при напряженности поля ниже 150 В/мм. В системе СГС эта формула :

$$t = \frac{2A_1 \sqrt{r} + A_2}{8 \sqrt{2r/3} r c_u N_u}, \quad (7)$$

где A_1 и A_2 - функции аргумента $z = (\sqrt{q/e} - 0,5)/\sqrt{r}$, значения которых при z , равном от 1 до 2000, приведены в таблице.

Уайт [10] пропускал масляный туман через трубчатый электрофильтр, в котором напряженность поля равнялась 560 В/мм. За 0,5 с частицы приобретали заряды, приблизительно пропорциональные квадратам их радиусов.

Арабаджи [17], пропуская через зону коронного разряда струю конденсирующегося водяного пара, определил, что облако заряженных частиц уменьшает интенсивность проходящего через него света на 11% больше, чем облако незаряженных частиц. По пробам капель последние оказались при электризации мельче (диаметры 1 - 5 мкм), чем без электризации (3 - 5 мкм). При этом отмечено, что на предметном стекле (в слое масла) заряженные капли быстрее сливались, были менее стабильны, чем незаряженные. Автор не объясняет причину различия в дисперсности. Возможно, что это обусловлено изменением условий конденсации осаждения частиц на стекло, а также электростатическим рассеянием.

В вышеуказанных работах не рассматривался вопрос выноса заряженных частиц из зарядного устройства. Боуэн и др. [57] в своих опытах с цилиндром, по оси которого была натянута коронирующая проволока, заметили, что существует оптимальное значение тока между проволокой и цилиндром, при котором выходящие из устройства частицы больше всего заряжены. Опыты показали, что это оптимальное значение тока зависит от свойств распыляемого вещества и влажности воздуха. Конкретных значений авторы, однако, не дают.

Электроаэрозольная установка для групповой ингаляции фирмы К.Хейзера, описанная в работах Бизы [18] и Дейзера [19], имеет восемь пневматических распылителей типа Бергсо-

на [20] с соплами диаметром 0,6 мм. Распылители осесимметрично установлены под колпаком, сепарирующим крупные капли, и ориентированы так, что струя создаваемого аэрозоля приходит во вращательное движение. На периферии установки натянута вольфрамовые проволоки. Вся система подвешена к потолку при помощи изоляционной трубки, служащей заодно воздухопроводом, и при работе находится под напряжением 40 – 60 кВ. Избыточное давление сжатого воздуха 0,2 – 0,4 МПа. Проволоки коронируют, и образующиеся ионы заряжают частицы аэрозоля, направляющегося в окружающее пространство. Диаметр большинства частиц получаемого электроаэрозоля находится в интервале 0,4 – 4,0 мкм, средний диаметр 1,35 мкм. Средний заряд частиц составляет примерно 200 е. Коэффициент униполярности равен 0,9 – 1,0 и зависит от приложенного напряжения. Сведения о производительности установки как по жидкости, так и заряду отсутствуют.

Пенни и Линч [21] изучали зарядение частиц масла в цилиндрическом зарядном устройстве, представляющем собой металлическую трубу с внутренним диаметром 49 мм и длиной 330 мм, по оси которой натянута вольфрамовая проволока диаметром 76 мкм. Через трубу пропускали частицы радиусом 0,15 – 0,32 мкм. Результаты измерений показали, что при $E = 230$ В/мм (положительная корона) и $N_u t = 6 \cdot 10^4$ с/мм³ заряды частиц $q \sim r^{1,5}$. Было обнаружено, что с увеличением напряженности поля растет расхождение экспериментальных значений зарядов с расчетными по теории диффузионной зарядки. Так, например, заряжая частицы радиусом 0,15 мкм при $E = 150$ В/мм и $N_u t = 3 \cdot 10^4$ с/мм³ $q_{\text{эксп}} = 22$ е и $q_{\text{теор}} = 16$ е, а при $E = 400$ В/мм и $N_u t = 10^5$ с/мм³ $q_{\text{эксп}} = 40$ е и $q_{\text{теор}} = 20$ е. Это свидетельствует о значительной роли ударной зарядки и в случае мельчайших частиц при больших напряженностях поля. Также было установлено, что при равных условиях зарядки частицы заряжаются отрицательными ионами в 1,3 – 1,4 раза сильнее, чем положительными. Это объясняется большей подвижностью отрицательных ионов. Таким образом, с точки зрения эффективности зарядки предпочтительнее применять отрицательную корону, которая к тому же

более стабильна. В отдельных случаях, однако, когда необходимо обеспечить меньшее образование вредных соединений азота и озона, пользуются положительной короной [22].

Хьюитт [23] экспериментально исследовал ударную и диффузионную зарядку частиц масляного тумана радиусом 0,07 - 0,66 мкм в поле положительной короны. Зарядная зона ограничена двумя коаксиальными цилиндрическими электродами, расстояние между которыми 7,2 мм. Внутренним электродом служила металлическая сетка, через которую от коронирующей осевой проволоки к заряжаемым частицам проходили ионы. С целью предотвращения осаждения заряженных частиц на электроды на последние подавалось прямоугольное переменное напряжение. Изменение напряженности поля и концентрации ионов в радиальном направлении в зарядной зоне не превышало 10%. При разных опытах $E = 30 - 1080$ В/мм и $N_{\mu}t = (0,05 - 5,80) \cdot 10^4$ с/мм³. Результаты измерений показали, что при $N_{\mu}t = 10^4$ с/мм³ заряды, полученные частицами указанных размеров в слабом поле ($E = 60$ В/мм), близки с расчетными по диффузионной зарядке, и в сильном поле ($E = 1080$ В/мм) - с расчетными по ударной зарядке. В поле средней напряженности ($E = 360$ В/мм) заряды частиц радиусом менее 0,2 мкм ближе к расчетным по диффузионной зарядке, а заряды частиц радиусом более 0,2 мкм - к расчетным по ударной зарядке. На основании приведенных в работе данных можно заключить, что преобладающую роль в зарядении частиц играет диффузионная зарядка, если $E_r < 0,07$ В, и ударная зарядка, если $E_r > 0,07$ В. Отклонения измеренных значений зарядов от расчетных составляют менее 20% по формуле (3) при $E_r > 0,3$ В и по формуле (4) при $E_r < 0,04$ В. Это согласуется также с соответствующими выводами Капцова [8, с. 196]. Кроме того, по результатам измерения подвижности частиц радиусом 0,07 - 0,7 мкм, заряженных при $E = 60 - 1080$ В/мм и $N_{\mu}t = 10^4$ с/мм³, можно заметить, что существует минимум подвижности, составляющий $(7 - 20) \cdot 10^{-8}$ м²/(В.с) и имеющий место при условии $E_r^2 \approx 8 \cdot 10^{-6}$ В.мм. Со смещением в сторону меньших или больших значений последнего произведения наблюдается возрастание

подвижности частиц.

Кинетику одновременно диффузионной и ударной зарядки теоретически изучал Китаев [24]. Составленное им уравнение скорости зарядки решено графическим интегрированием. По полученным результатам в среде с концентрацией ионов 10^5 мм^{-3} и напряженностью 150 В/мм частицы радиусом 0,01 – 0,5 мкм заряжаются до 0,8 – 0,9 предельного заряда за 1 с, а частицы радиусом 1 – 10 мкм за 0,01 с. Для других значений концентрации ионов и напряженности поля дана методика введения поправок. По экспериментальным данным Хьюитта [23] указанное время зарядки для частиц радиусом 0,08 – 0,46 мкм составляет несколько десятых долей секунды, так что в пределах порядка величины результаты совпадают.

Чижов [25] предложил устройство для зарядки распыленной воды в виде сетки из нихромовой проволоки диаметром 0,15 мм, на которую подавалось напряжение до 18 кВ. Капли средним радиусом 25 мкм пропускали через сетку. Количественных данных о получаемых каплями зарядах, к сожалению, не приведено.

Несколько вариантов зарядных устройств с коронирующими электродами описал Гэлик [26]. Часть из них выполнена в виде трубы, по оси которой вблизи выходного отверстия установлена проволока, острое или звездочка с острыми, а другая часть в виде ряда заземленных металлических стержней в одной плоскости и сетки из тонких проволок в параллельной плоскости. Диаметр проволок 0,1 – 0,2 мм и длина до 200 мм. Межеlectродное расстояние от 7,5 до 32 мм. Приложенное напряжение до 21 кВ. Зависимость разрядного тока I от напряжения U соответствует известной формуле [8]

$$I / \mu\text{KA} = C U / \text{kB} (U - U_{\text{кр}}) / \text{kB}, \quad (8)$$

где при изменении критического напряжения $U_{\text{кр}}$ от 4 до 7 кВ коэффициент C изменялся, соответственно, от 4,6 до 1.

Через зарядные устройства продували порошок с массовым расходом 5 – 20 г/с. Одним из недостатков таких устройств является осаждение частиц на электроды, уменьшающее эффек-

тивность зарядки. Подробные исследования были осуществлены по электризации частиц талька, выдуваемых из трубы диаметром 43 мм потоком воздуха, начальная скорость и массовый расход которого составляли соответственно 24 м/с и 45 г/с, через коронирующую сетку. При увеличении разрядного тока до 0,4 мА наблюдалось резкое возрастание заряда частиц, дальнейшее увеличение тока заметного эффекта не давало. С увеличением относительной влажности воздуха и массового расхода порошка удельный заряд последнего уменьшался. По мере удаления от зарядного устройства в направлении потока от 3 до 6 м удельный заряд порошка, осаждавшегося на измерительный зонд, уменьшался от 33,4 до 11,6 мкЛ/кг, причем средний заряд, приходившийся на одну частицу, равнялся соответственно от 10 до $2,3 \cdot 10^4$ е. Средний радиус частиц 3 - 4 мкм. Эти же данные представлены Галвицем [27].

Примененная в рассматриваемой работе методика измерения зарядов частиц, основанная на определении изменения потенциала и массы измерительного зонда в потоке, дает сведения о частицах, попавших на зонд. Так как слабее заряженные частицы по сравнению с сильно заряженными осаждаются на зонд в меньшей мере, то приведенные данные по зарядам для зарядного устройства в целом, вероятно, являются завышенными.

В установке Шагана [28] измельченный песок заряжается путем смешения с воздухом, ионизированным коронным разрядом. Параметры зарядного устройства и размеры частиц не даны. Сказано лишь, что заряд одной частицы составляет около 10 е. Это весьма малая степень зарядки.

Китаев [29] изучал электризацию термомеханического аэрозоля, создаваемого из веретенного масла. Испытывали зарядные устройства в виде коронирующих проволок диаметром 0,2-1,0 мм, натянутые либо по оси заземленной металлической трубы диаметром 120 мм и длиной 1,2 м, либо между тремя металлическими пластинами шириной 0,8 м и длиной 0,77 м, расстояние между которыми 140 - 180 мм. Входное сечение трубы и пластин устанавливали на расстоянии, соответственно, 0,25 и 1,5 м от выходного сечения аэрозольного ге-

нератора ЭАУ - I [30]. Приложенное напряжение составляло 25 - 46 кВ. Расчетная плотность заряда в разрядном промежутке $0,5 \cdot 10^6$ е/мм³ и относительная объемная концентрация частиц $3 \cdot 10^{-5}$. В одном из опытов было определено, что разрядный ток между электродами при неподвижном воздухе был более 2 мА, при продувке воздухом снизился до 1,4 мА, при подаче дыма упал до 0,5 мА и при подаче аэрозоля до 0,3 мА. Автор опытов полагает, что это уменьшение тока обусловлено выносом ионов за пределы разрядного промежутка. Однако весьма маловероятно, чтобы поток воздуха или аэрозоля при данных условиях мог обеспечить ток конвекции порядка 1 мА. Причина уменьшения тока, по-видимому, в изменении условий коронного разряда. В работе, к сожалению, отсутствуют количественные данные о скорости потока аэрозоля в разрядном промежутке и непосредственно измеренном токе конвекции. Поэтому трудно сказать что-либо определенное о степени зарядки аэрозоля. На основании эффективности осаждения заряженного аэрозоля отмечено, что в некоторых опытах зарядка была слабая и что это обусловлено высокой концентрацией аэрозоля в зоне зарядки. Сделан вывод, что повышение эффекта от электризации термомеханического аэрозоля возможно путем снижения массовой доли высокодисперсной фракции. Это заключение действительно подтверждается расчетом, если при постоянном массовом расходе дисперсной фазы ток конвекции не зависит от ее дисперсности. Последнее обстоятельство требует, однако, экспериментальной проверки.

Коше [31] теоретически и экспериментально исследовал зарядку частиц радиусом 0,02 - 0,5 мкм. Он ввел в формулу (I) поправку, учитывающую влияние среднего свободного пути ионов ℓ_u на ударную зарядку частиц в электрическом поле :

$$q_{yг} = 4\pi\epsilon_0 E \left[\left(1 + \ell_u/r\right)^2 + \frac{2(\epsilon-1)}{(1 + \ell_u/r)(\epsilon+2)} \right] r^2 \frac{ek_u N_u t}{4\epsilon_0 + ek_u N_u t} \quad (9)$$

Эта формула применима к частицам радиусом менее 1 мкм. Когда $\ell_u/r \leq 1$, выражение (9) приблизительно совпадает с (I). Экспериментальные значения заряда, полученные шеллач-

ными частицами при $E = 150 - 500$ В/мм, $N_u = 8 \cdot 10^4$ мм⁻³ и $t = 0,01 - 0,04$ с удовлетворительно согласуются с вычисленными по формуле (9) при $\ell_u \approx 0,1$ мкм. Было также установлено, что частицы радиусом порядка $0,1$ мкм обладают наименьшей подвижностью, равной при указанных условиях зарядки $(4 - 6) \cdot 10^{-8}$ м²/(В·с).

Моисеев [32], рассматривая распыление жидкости в электрическом поле, приравнял силы поверхностного натяжения капли к сумме сил расталкивания ее одноименных зарядов и ponderomotorных сил внешнего поля, стремящихся разорвать каплю :

$$2\pi r\sigma = q^2 / (16\pi\epsilon_0 r^2) + \pi\epsilon_0 \epsilon r^2 E^2 / 2, \quad (10)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Подставив в это уравнение значение предельного заряда, приобретаемого каплей при ударной зарядке согласно формуле (I),

$$q_{уд макс} = 4\pi\epsilon_0 E \delta r^2, \quad (11)$$

находится максимальный радиус устойчивой капли

$$r_{макс} = 4\sigma / [\epsilon_0 E^2 (2\delta^2 + \epsilon)]. \quad (12)$$

Моисеев утверждает, что именно зависимость (12) характеризует размеры капель, т.е. что и при ионной зарядке степень электризованности определяет дисперсность. С этим нельзя согласиться. В данном случае размеры капель определяют приобретаемые ими заряды, а не наоборот. Моисеев производит расчет дробления капель при $E = 15$ кВ/мм - такая напряженность практически при нормальных условиях не существует. Ведь напряженность пробоя для воздуха намного меньше, около 3 кВ/мм. Даже при этой предельной напряженности для такой жидкости как вода, имеющей $\sigma = 70$ мН/м и $\epsilon = 80$, по формуле (12) получим $r_{макс} = 40$ мкм, а для других жидкостей с меньшим ϵ еще больше. Так как обычно заряжают частицы значительно меньших размеров, то ясно, что получае-

мые каплями при ионной зарядке заряды ко вторичному дроблению не приводят.

Как показали опыты Койранского и др. [33], примешивание ионов к аэрозолю приводит к ускоренному уменьшению концентрации частиц, что объясняется их электростатическим рассеянием. В зависимости от расстояния места отбора проб от генератора отрицательных ионов 70–90% частиц были заряжены отрицательно. В работе отсутствует четкая разница между понятиями "концентрация ионов и частиц", что затрудняет однозначное понимание результатов. Некорректным является введенный термин "нейтральный ион".

Уайт [22] измерил удельный заряд заряженных частиц аэрозоля на выходе лабораторного и производственного электрофильтров. Он равнялся 70–300 мКл/кг, причем средний заряд отдельных частиц (0,5–10 мкм) составлял $10^2 - 10^5$ е.

Циммерман [34] привел описание зарядных устройств нескольких компаний США, предназначенных для обработки сельскохозяйственных культур. Это осесимметричные насадки с центральным коронирующим игольчатым электродом, на который подается постоянное напряжение 12–18 кВ. Разрядный ток 0,1–0,6 мА. Через зарядное устройство продували пыль. Подсчитано, что электризация позволяет в 4–10 раз сократить расходы препаратов, не снижая эффективности обработки. Данных о степени зарядки частиц нет.

Вывос заряженных частиц газовым потоком из коронного зарядного устройства рассмотрен в работе Потенья [35]. Твердые изоляционные частицы радиусом около 1 мкм, транспортируемые струей воздуха со скоростью 50–100 м/с, проходят через трубчатый ионизатор без значительного осаждения на стенках. Исходя из закономерности зарядки частиц, рассчитан ток, отдаваемый генератором,

$$I_{\kappa} = 3V\varepsilon_0 E \delta M / (4r\gamma), \quad (13)$$

где $V < 1$ – коэффициент, учитывающий потери зарядов на стенках и неполную зарядку частиц, M – массовый расход частиц, γ – плотность вещества частиц. Согласно этой формуле при

$E = 300$ В/мм, $\delta = 2$, $M = 12,5$ г/с, $r = 1$ мкм, $\gamma = 2500$ кг/м³ получен ток $I_K = 16$ мкА, причем $V = 0,8$. Длина и диаметр ионизатора составляли соответственно 400 и 50 мм.

Указано, что разрядный ток от коронирующего провода в ионизаторе ослабляется заряженными частицами тем более, чем больше радиус трубки ионизатора. На основании этого сделан вывод, что для получения тока целесообразен ряд параллельных ионизаторов соотвидной конструкции. Изготовлены ионизаторы, содержащие 7 - 19 трубок. В таких генераторах ток конвекции достигает 150 мкА. Данных о разрядном токе не приведено.

В другой работе Потенье [36] сообщено о зарядном устройстве, состоящем из 19 шестигранных трубок длиной 0,3 м и с осевыми коронирующими проволоками, на которые подавали напряжение 40 кВ. Через трубки продували летучую золу (средний радиус частиц 6 мкм) со скоростью 50 м/с и расходом 86 г/с (17,5 г/м³). Ток конвекции равнялся 80 мкА. К сожалению, он не сопоставлен с током коронного разряда, что затрудняет оценить эффективность устройства.

Фрейдин [37] изучал зависимость между током и расходом распыливаемого вещества в разрядном промежутке. Он ввел понятие режима запирания факела распыла, характеризующегося равенством плотности объемного заряда частиц распыленного вещества и плотности объемного заряда ионов, образуемой при коронном разряде без распыла. Примером, видимо, служила работа Балабанова [38], а запираение тока коронного разряда было рассмотрено уже Дейчем [39]. Этот режим, согласно Фрейдину, соответствует такому значению расхода вещества, при котором с уменьшением расхода сила тока в разрядном промежутке увеличивается, а с увеличением расхода остается постоянной. Предполагается, что частицы приобретают в разрядном промежутке заряд при расходах, не превышающих расход режима запираения, причем в режиме запираения все ионы в пределах факела переходят на частицы. Это обстоятельство, а также вытекающие отсюда следствия являются сомнительными, требующими экспериментальной проверки. Как следует из при-

веденных в работе данных, режим запираания имеет место при тем большем расходе, чем меньше диэлектрическая проницаемость вещества. На графике зависимости тока от расхода соответствующие кривые обозначены неправильно, что приводит к обратному утверждению. Та же ошибка допущена в последующей работе Фрейдина [40]. Далее показано, что, зная размеры факела распыла, напряженность поля E , плотность тока частиц $j_{ч}$ и расход распыливаемого вещества M_3 в режиме запираания, можно определить средний радиус частиц как

$$r_{cp} = 3\epsilon_0 \delta M_3 LE / (V j_{ч}), \quad (I4)$$

где L и V - длина и объем факела. Заряд частиц вычисляется по формуле (II). В предложенном методе технически трудно измеряемой величиной является истинная плотность тока частиц. При распыливании посредством вращающейся коронирующей кромки жидкости, например, с $\epsilon = 5,5$ режим запираания наступил при $M_3 = 0,7$ г/с, причем $r = 2,9$ мкм и $q = 2600$ е, а жидкости с $\epsilon = 3,8$ соответственно $1,9$ г/с, $4,6$ мкм и 5400 е. Удельный заряд частиц в первом случае 5 , а во втором $2,5$ мкЛ/кг. Ток частиц составляет $0,1 - 0,2$ от общего разрядного тока ($20 - 55$ мкА). Без распыливания разрядный ток равнялся 180 мкА. Таким образом, на частицы распыла приходится лишь $2 - 3\%$ от тока, протекающего через разрядный промежуток в отсутствие частиц.

На явлении запираания коронного тока частицами аэрозоля, направленного в разрядный промежуток, основана аналогичная (I4) формула, приведенная без доказательств Балабановым [41],

$$r_{cp} = 3 \sqrt{M_3 \mu / (2 \rho g ES)}, \quad (I5)$$

где ρ - плотность заряда ионов, S - средняя площадь сечения потока частиц.

С целью повышения эффективности зарядки частиц и предотвращения осаждения их на электроды зарядного устройства Балабанов и Глазов [42] предложили некоронирующий электрод выполнить в виде трубы Вентури и снабдить его подогревателем. Коронирующим электродом служит сосная проволока. Су -

жение канала ионизатора обуславливает увеличение напряженности поля и скорости частиц. Чтобы уменьшить разрядку частиц в пределах ионизатора, на внутреннюю поверхность диффузора трубы нанесено непроводящее покрытие.

Кекин и Щетилин [43] изучали зарядные устройства, коронирующие электроды которых представляли собой сетку, отдельную проволоку или иголки, а также устройства с термомонизатором. Заряжали капли воды, полученные центробежным распылителем. Наиболее эффективным оказалось устройство с сеткой, имеющее размеры 200 x 195 x 21 мм, диаметр проволоки 0,1 мм. Межеlectродное расстояние 10 мм. Максимально возможное (до пробоя) напряжение при распыле составляло 6,5 кВ и соответствующая расчетная напряженность поля в разрядном промежутке 360 В/мм. Разрядный ток равнялся 1,7 мА. Измеренный неопиcанным способом удельный заряд частиц радиусом 40 мкм при этом составлял 0,12 мКл/кг, отличаясь от расчетного менее 3% !? Это примерно в два раза меньше предельного удельного заряда. В работе совершенно отсутствуют сведения о расходе распыливаемого вещества и токе конвекции. Авторы приходят к выводу, что расширение межэлектродного пространства решетчатого устройства нецелесообразно из-за нужного увеличения напряжения, а время пребывания частиц в зарядной зоне не должно быть более 10 мс во избежание осаждения их в пределах самого устройства. Неоправданным считают они и применение игольчатых электродов из-за более вероятного пробоя и меньшего тока по сравнению с проволочными.

Как показано в работе Левитова и Ткаченко [44], игольчатые электроды обеспечивают наибольшие скорости дрейфа частиц аэрозоля в разрядном промежутке. Это затрудняет вынос заряженных частиц за пределы устройства.

Мирзабекян [45, 46] исследовал теоретически зарядку частиц радиусом 0,1 - 2,0 мкм, при которых необходим одновременный учет как диффузионного, так и ударного процесса, в электрическом поле напряженностью 100 - 500 В/мм. Численно было решено общее диффузионное уравнение. Результаты рас -

четов отличаются от экспериментальных данных Хэлитта [23] менее 3 - 8 %. Анализ полученных кривых зарядки показал, что в общем случае заряд частиц может быть определен как сумма зарядов, вычисленных по формулам (1) и (6). Погрешность при этом составляет всего лишь 5 - 15 %. То же подтвердили экспериментальные данные работы [59], полученные при зарядке конденсационных капель дибутилфталата при $N_d t = (1...3,5) \cdot 10^3$ с/мм³. Так, например, при $E = 500$ В/мм и $N_d t = 10^3$ с/мм³ частицы радиусом 1 мкм заряжались в среднем до 50 е, чему соответствует удельный заряд 19 мкд/кг. Однако можно убедиться, что большую погрешность не дает и расчет заряда частиц как суммы зарядов, вычисленных по формулам (1) и (2). Последний способ кажется более практичным благодаря тому, что соответствующая функция полностью выражается аналитически.

Как видно из формулы (11), предельный заряд частиц при ударной зарядке ограничен максимально возможным (предпробойным) значением напряженности поля. Применяя периодическую импульсную корону, можно достичь более высоких значений напряженности поля, а следовательно, и больших зарядов частиц, чем в случае постоянной короны. Соответствующие эксперименты, проведенные Максимовым [47], показали, что в предпробивном режиме разряда максимальные заряды частиц, полученные при импульсной короне, в 1,8 раза больше зарядов, приобретенных такими же частицами при постоянной короне.

Хигнетт [48] исследовал экспериментально скорость зарядки частиц летучей золы радиусом 3,3 - 6,8 мкм и зависимость заряда частиц от их радиуса 2 - 65 мкм в электрическом поле с концентрацией ионов $(4 - 7) \cdot 10^8$ мм⁻³. Зарядным устройством служила трубка диаметром 254 мм, по оси которой был установлен коронирующий электрод в виде стержня диаметром 4,8 (6,4) мм, снабженного иглами высотой 4,8 (3,2) мм и с интервалом 24,4 (101,6) мм. Игольчатый электрод выбран с целью обеспечения равномерного распределения тока по всей длине устройства. На электрод подавали напряжение -23 (-40) кВ, плотность разрядного тока составляла 0,25 (0,49) мА/м.

Длину зоны зарядки можно было изменять от 102 до 1219 мм, а скорость потока частиц регулировать до 3 м/с. Заряды частиц измеряли при помощи специального зонда, содержащего клетку Фарадея и бумажный фильтр. Время, необходимое для приобретения частицами 0,5 и 0,8 предельного заряда, оказалось равным соответственно 0,2 и 1,0 с, что значительно больше теоретического. Само же значение заряда частиц радиусом менее 25 мкм в 3 – 4 раза больше теоретического и пропорционального квадрату их радиуса, а для более крупных частиц еще в большей степени. Увеличенные значения времени зарядки и заряда объясняются, на наш взгляд, неравномерностью плотности по кругу разрядного промежутка, обусловленной особенностью игольчатого электрода, а повышенный заряд крупных частиц – коагуляцией мелких заряженных частиц.

Сплинтер [49] изучал возможность предотвращения осаждения заряжаемых частиц на стенки зарядного устройства, применяя защитную струю добавочного воздуха между струей аэрозоля и внутренней стенкой сопла генератора. Частицы пыли радиусом 1,0 – 1,3 мкм заряжали в канале прямоугольного сечения, посредине которого установлена поперечная коронирующая проволока диаметром 0,08 мм. У боковых (относительно проволоки) стенок канала устроены щели для добавочного воздуха. Измерения показали, что при напряжении 23 кВ, разрядном токе 50 мкА, скорости пыли и добавочного воздуха 23 – 40 м/с кажущаяся подвижность частиц в турбулентном потоке составляла около $5,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Исходя из этого значения подвижности, рекомендовано определять параметры защитной струи. Применение последней позволило увеличить удельный заряд частиц, который при разных условиях равнялся 2 – 20 мкЛ/кг, что на 10 – 50 % меньше расчетного. Недостатком работы является отсутствие данных о расходе воздуха и распыливаемого вещества или токе конвекции, в связи с чем нельзя в достаточной мере обобщить полученные результаты.

Более полные сведения приведены в последующей работе Сплинтера [50], в которой исследовали степень электризации распыла воды и водных растворов в зависимости от расположе-

ния электродов перед распылителем и приложенного напряжения. При давлении 0,5 МПа работающий распылитель, перед которым установлены заземленное кольцо диаметром 64 мм и центральный коронирующий электрод, размещали в трубе диаметром 100 мм, через которую со скоростью 32 м/с продували добавочный воздух, предотвращающий осаждение частиц распыла на кольцо. При расходе жидкости 4 г/с наибольший ток конвекции, равный 7 мкА, был достигнут, когда кольцо располагалось на расстоянии 6,4 мм, коронирующий электрод на расстоянии 12,7 мм от выходного отверстия распылителя и напряжение равнялось 19 кВ. Сила разрядного тока при этом составляла 200 мкА. В случае более высокого напряжения заряженные частицы частично осаждались на кольцо. По представленным данным можно подсчитать, что удельная энергия транспортировки частиц добавочным воздухом равна 35 Дж/г. Это говорит о большой затрате энергии на удаление заряженных частиц от генератора. Без добавочного воздуха примерно при прочих равных условиях ток конвекции составлял всего лишь около 2 мкА, т.е. в 3,5 раза меньше.

Варехов [51] предложил для зарядки аэрозольных частиц использовать разряд между плоскими электродами с диэлектрическим барьером. В качестве последнего применяли гетинаксовую пластину толщиной 1 мм, приложенную к одному из электродов. Между этой пластиной и вторым электродом воздушный промежуток толщиной 3 мм, через который пропускали аэрозольные частицы. При напряжении 14 кВ между электродами плотность тока составляла 10 мА/м² и расчетная напряженность поля в разрядном промежутке 2,8 кВ/мм. За время прохождения этого промежутка, равное 24 - 36 мс, частицы масляного тумана средним квадратичным радиусом 0,18 мкм, осаждаемые на измерительный коллектор, имели средний заряд 41 - 68 е. Соответствующий удельный заряд равен 0,3 - 0,5 мКл/кг. Из данной работы неясно назначение барьера и почему он должен быть диэлектриком. Если этот барьер выполняет функцию коронирующего электрода, то в этом случае вместо него можно применять металлическую пластину с шероховатой поверхностью.

Тогда термин "диэлектрический барьер" неоправдан. Кажется, что использование диэлектрического барьера даже нецелесообразно, поскольку осаждение заряженных частиц на него приводит к снижению напряженности поля в разрядном промежутке и тем самым к уменьшению зарядки частиц.

Какабаев [52] исследовал устройства для зарядки термомеханических аэрозолей. Наиболее эффективными оказались варианты, в одном из которых в расширяющуюся насадку с острой кромкой диаметром 80 мм вставлен центральный конический отражатель диаметром основания 30 мм и во втором на выходе сопла установлены иглы диаметром 2 мм и длиной 40 мм. Указывается, что к круглому держателю диаметром 80 мм прикреплено 9 игл, расстояние между которыми 40 мм. Это практически неосуществимо: при указанных размерах максимально возможное число игл равно 7. Автор работы отмечает, что как будто им впервые выяснена зависимость разрядного тока от числа коронирующих игл, выражающаяся при напряжении 80 кВ и расстоянии между остриями и заземленной поверхностью 300 мм формулой

$$I = 28,9 n^{0,341}, \quad (16)$$

где n - число игл.

Приведенная формула не содержит расстояния между иглами, от которого существенно зависит разрядный ток. Эта формула может быть действительна лишь при каком-то фиксированном расстоянии между иглами, которое автором не указано. Что касается влияния числа коронирующих игл и расстояния между ними (взаимное экранирование электродов) на разрядный ток, то этот вопрос был рассмотрен уже Бичем [53]. Существенный недостаток работы [52] в целом заключается в отсутствии количественных данных по расходу распыливаемого вещества и току конвекции. Встречающееся выражение "зарядение аэрозоля до напряжения 80 - 100 кВ" физически бессмысленно.

Уитби и Кларк [54] использовали для зарядки аэрозолей струйный коронный ионизатор, описанный в работе [55]. Аэрозоль поступает через кольцевую щель в поток ионов, где происходит перемешивание и диффузионная зарядка частиц. Отме-

чено, что высокий потенциал поверхности пластика люцита, из которого сделано сопло зарядника, не допускает осаждения на его стенки заряженных частиц. Это, однако, неточно, поскольку суммарная напряженность поля, создаваемого зарядами внутренней поверхности сопла, равна нулю не зависимо от величины поверхностных зарядов и осаждение определяется объемным зарядом частиц. Кажущееся малое осаждение может быть обусловлено незначительным прилипанием и эффективным сносом частиц с поверхности пластика. Из характеристик зарядного устройства известны напряжение коронирующего острья 3,5 - 5,0 кВ, расход сжатого воздуха $57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, начальная концентрация ионов 10^{16} м^{-3} и, следовательно, ток конвекции не более 90 нА. Устройство вместе с анализатором подвижностей предназначено для определения дисперсного состава частиц.

Дёч и Фридрикс [56], теоретически рассматривая зарядку частиц в ионизированной среде, в случае совместного действия диффузионного и ударного процессов сложили соответствующие скорости заряжения в дифференциальной форме и численно решили полученное уравнение. Такой подход нельзя считать математически строгим, так как названные процессы не являются друг от друга независимыми.

Солодихин и Горбунова [58] экспериментально изучали зарядку распыла воды, используя пневматический распылитель с игольчатым коронирующим электродом, установленным параллельно оси струи на расстоянии 11,8 мм от нее. Опыт проводили при избыточном давлении 0,1 МПа и расходе воздуха 0,29 кг/с, расходе воды 0,17 г/с и напряжении 10 - 20 кВ. Длину электрода варьировали от 2 до 22 мм. Наибольшая плотность заряда, измеренная счетчиком легких ионов на расстоянии 1,5 м от распылителя и равная $(0,8 - 1,3) \cdot 10^3 \text{ е/мм}^3$, была зарегистрирована при длине электрода 7 мм. Авторы заключают, что этот максимум плотности имеет место при длине электрода, равной $(0,6 - 0,8) \cdot x_0$, где x_0 - длина начального участка турбулентной струи. Такой вывод, однако, не обоснован, ибо зависимости плотности заряда от x_0 не определяли.

Далее было замечено, что при $U < 10$ кВ аэрозоль заряжен биполярно, а при $U > 10$ кВ униполярно. Авторы объясняют биполярность при низком напряжении образованием на электроде диэлектрической оболочки, снижающей напряженность поля. С этим нельзя согласиться: дело в индуцирующем действии электрода, создающем разноименно относительно напряжения заряженные частицы, доля которых при низком напряжении соизмерима с долей частиц, заряженных коронным разрядом. Были проведены опыты с 8, 4, и 2 осесимметрично расположенными коронирующими электродами длиной 14 мм, отстоящими от оси на 11,8 мм. С уменьшением числа электродов плотность заряда частиц возрастала, достигая максимального значения при одном электроде. Это обусловлено взаимным экранированием электродов.

Работы Тамма [60, 61] посвящены конструированию и исследованию зарядного устройства для получения электроаэрозоля с узким спектром распределения числа частиц по электрическим подвижностям. Конденсационный аэрозоль дибутилфталата с расходом до 6,5 л/мин продували через разрядный промежуток острие-цилиндр в виде тонкого кольцеобразного слоя, защищенного изнутри и снаружи потоками воздуха. При разрядном токе 20 мкА частицы радиусом 0,7 мкм приобретали подвижность $0,3 \text{ мм}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, что соответствует заряду 400 е. Следовательно, удельный заряд частиц составляет 42 мкКл/кг.

В работе [63] описана сотовая конструкция зарядного устройства для электризации конденсационного аэрозоля, создаваемого термомеханическим аэрозольным генератором АГ-УД-2. Каждая ячейка этого устройства представляет собой острие в центре кольца. Первый вариант устройства состоит из 28 параллельных ячеек радиусом кольца 25 мм, второй из 7 ячеек радиусом кольца 50 мм. Более эффективным оказался второй вариант, который при продувании через него аэрозоля солярового масла с $M_T = 200$ г/с, $M = 10$ г/с и $U = 20$ кВ имел суммарный ток разряда 40 мкА и ток конвекции 17 мкА, обеспечивая удельный заряд 1,7 мкКл/кг.

Итак, на основе вышеприведенных данных можно заключить следующее.

Заряд, приобретаемый частицей при ионной зарядке, в практических расчетах согласно формулам (3) и (4) может быть определен как

$$q \approx q_{\text{уд}} + q_{\text{диф}} = 1,1 \cdot 10^{-10} \text{ЕБ} r^2 \frac{N_u t}{1,3 \cdot 10^{12} + N_u t} + 2,8 \cdot 10^{-12} r \ln(1 + 8,8 \cdot 10^{-5} r N_u t), \quad (17)$$

хотя физически это не строго.

Если допустить, что при диффузионной зарядке предельный заряд достигается частицей тогда, когда все свободные ионы распределены между частицами [41], и согласно (4) заряд частицы примерно пропорционален ее радиусу, то

$$q_{\text{диф}} \text{ пред} = N_u r e / (N_x r_a), \quad (18)$$

где N_x - счетная концентрация частиц аэрозоля, r_a - средний арифметический радиус.

При ударной зарядке предельный заряд в соответствии с (3) наступит, когда $N_u t \gg 1,3 \cdot 10^3 \text{ с/мм}^3$,

$$q_{\text{уд}} \text{ пред} = 1,1 \cdot 10^{-10} \text{ЕБ} r^2. \quad (19)$$

В случае наиболее благоприятных условий зарядки, когда $E = E_{\text{макс}} = 10^6 \text{ В/м}$ [47] и $\delta = 3$ (для электропроводящего вещества $\epsilon = \infty$),

$$q_{\text{уд}} \text{ макс} = 3,3 \cdot 10^{-4} r^2. \quad (20)$$

Учитывая, что электрические подвижности частиц $0,05 < r < 35 \text{ мкм}$ можно выразить как

$$k \approx 3 \cdot 10^3 q (r + 0,8 \cdot 10^{-7}) / r^2 \quad (21)$$

и что предельные заряды их при $E r < 0,07 \text{ В}$ определяются преимущественно диффузионной зарядкой по формуле (18), а при $E r > 0,07 \text{ В}$ ударной зарядкой по формуле (19), соответствующие предельные подвижности

$$k_{\text{пред}} \approx 3 \cdot 10^3 (1 + 0,8 \cdot 10^{-7}/r) N_{\text{и}} e / (N_{\text{г}} r_{\text{а}}),$$

если $0,05 < r < 1$ мкм,

(22)

и $k_{\text{пред}} \approx 3,3 \cdot 10^{-7} E \delta r,$

если $1 < r < 35$ мкм.

(23)

Подвижность частиц в функции радиуса имеет минимум, зависящий также от напряженности поля. Удельный заряд частиц с увеличением радиуса уменьшается.

Литература

1. Oesterle K.M. Kinetik der Lackharze in elektrostatischen Feld. - "Farbe und Lack", 1958, Heft 7, 368-372.
2. Hauer F.W. Bewegung und Ladung kleiner Teilchen im ionisierten elektrischen Feld. - "Ann. d. Physik", 1920, Bd. 61, 303-312.
3. Rohmann H. Messung der Grösse von Schwebeteilchen. - "Zschr. f. Phys.", 1923, Bd. 17, 253-265.
4. Ladenburg R. Untersuchungen über die physikalischen Vorgänge bei der sogenannten elektrischen Gasreinigung. - "Ann. d. Phys.", 1930, Bd. 4, 863-897.
5. Pauthenier M.M., Moreau-Hanot M. La charge des particules sphériques dans un champ ionisé. - "Journal de physique et le radium", 1932, Vol. 3, No. 12, 590-613.
6. Deutsch W. Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinder-Kondensator. - "Ann. d. Physik", 1922, Bd. 68, Nr. 12, 335-344.
7. Arendt P., Kallmann H. Über den Mechanismus der Aufladung von Nebelteilchen. - "Zschr. f. Phys.", 1926, Bd. 35, Nr. 6, 421-441.

8. Капцов Н.А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. М.-Л., Гостехиздат, 1947.
9. Фукс Н.А. О величине зарядов на частицах атмосферных аэроколлоидов. - "Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз.", 1947, № II, с. 341-348.
10. White H.J. Particle charging in electrostatic precipitation. - "AIEE Trans.", 1951, Vol.70, No.11, 1186 - 1191.
11. Спурный К., Йех Ч., Седлачек Б., Шторх О. Аэрозоли. М., Атомиздат, 1964.
12. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М., "Химия", 1967.
13. Murphy A.T., Adler F.T., Penney G.W. A theoretical analysis of an electric field on charging of fine particles. - "AIEE Trans." Preprint, 1959, 59-102.
14. Schweitzer H. Über die Aufladung kleiner Schwebeteilchen in der Korona-Entladung. - "Ann. d. Phys.", 1930.
15. Виленкин Л.Я. Способ ионизации ингаляционных жидкостей. Авт. св. № 25684, кл. 30 к, I2, 1932.
16. Фукс Н., Петрянов И., Ротцейгер Б. Заряд капелек ионными токами. "ЖЭТФ", 1936, вып. 6, с. 529.
17. Арабаджи В.И. Рассеяние света каплями вблизи коронирующего электрода. "Коллоидный журнал", 1951, т. I3, вып. 5, с. 321-322.
18. Bisa K. Die biologische Bedeutung der Elektro-Aerosole und ein Verfahren zu ihrer Herstellung. - "Zschr. Aerosol-Forschung und Therapie", 1953, Nr. 2, 286-294.
19. Deuser F. Unipolare elektrische Aufladung von Inhalationsnebeln. "Siemens Zeitschrift", 1953, Bd. 27, 218-223.
20. Martini H. Richtlinien zur Aerosolbehandlung. - "Deutsche Medizinische Wochenschrift", 1953, Nr. 45, 1543-1548.

21. Penney G.W., Lynch R.D. Measurements of charge imparted to fine particles by a corona discharge. - "AIEE Trans.", 1957, Vol. 76, 294-299.
22. White H.J. Industrial electrostatic precipitation. - Pergamon Press, Oxford-London-Paris, Frankfurt, 1963.
23. Hewitt G.W. The charging of small particles for electrostatic precipitation. - "AIEE Trans.", 1957, Vol. 76, No. 31, 300-306.
24. Китаев А.В. Униполярная электризация аэрозоля в поле коронного разряда. - "Вестник с.-х. науки", 1957, № 9, с. 127-131.
25. Чижов И. Осаждение пыли электрoзаряженной водой. Сб. материалов по пылеулавливаю в цветной металлургии. М., Металлургиздат, 1957, с. 361-367.
26. Göhlich H. Untersuchungen zur Verbesserung der Niederschläge von Pflanzenschutzmitteln durch elektrostatische Aufladung. - VDI-Forschungsheft 467, 1958. Beilage zu "Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens". Ausgabe B, Band 24.
27. Галлвиц К. Электростатическая зарядка материалов для опыливания и опрыскивания растений. Сб "Применение сил электрического поля в промышленности и сельском хозяйстве". М., 1964, с. 222-229.
28. Шаган И.Б. Экспериментальная электроионизационная пылевая установка. Труды ин-та эксп. мед. АН Латв. ССР, Рига, 1959, вып. 20, с. 61-67.
29. Китаев А.В. Опыты по оценке эффективности электризации термомеханического аэрозоля в поле коронного разряда. Сб. "Аэрозоли и их применение", М., изд.-во МСХ СССР, 1959, с. 78-83.
30. Дунский В.Ф., Южный Э.М., Хохлов Д.Н. Исследование процесса термомеханического образования туманов. Сб. "Аэрозоли в сельском хозяйстве", М., Сельхозгиз, 1956, с. 28-45.

31. Коше Р. Законы зарядки мелких частиц (менее 1 мк). Сб. "Применение сил электрического поля в промышленности и сельском хозяйстве", М., 1964, с. 113-118.
32. Моисеев Е.В. Расчет распыления лакокрасочных материалов в электрическом поле. - "Лакокрасочные материалы и их применение", 1961, № 1, с. 49-53.
33. Койранский Б.Б., Березик Г.С., Колодина Н.С. Действие аэроионов на аэрозоль. Всес. конф. по аэро- и гидроаэроионизации. Ташкент, 1962, с. 179-181.
34. Zimmerman M. Electrostatic dusting. "Implement and Tractor", 1963, Vol. 78, No. 20, 44-46, 100.
35. Потенье М. Электростатические генераторы со струей заряженной пыли. Сб. "Применение сил электрического поля в промышленности и сельском хозяйстве". М., 1964, с. 75-80.
36. Потенье М. Получение электростатических аэрозолей. Сб. "Применение сил электрического поля в промышленности и сельском хозяйстве". М., 1964, с. 131-134.
37. Фрейдин М.М. Зависимость между силой тока и распылением лакокрасочного материала при окраске в электрическом поле. - "Лакокрасочные материалы и их применение", 1964, № 4, с. 56-59.
38. Балабанов Е.М. Дисперсные системы в электрическом поле коронного разряда. Докт. дисс. М., 1955.
39. Deutsch W. Über die raumladungsbeschwerte Townsendladung im dichten Nebel. - "Ann. d. Phys.", 1931, Bd. 10, 847-867.
40. Фрейдин М.М. Окраска поверхностей с диэлектрическими свойствами в электрическом поле. Сб. "Окраска изделий в электрическом поле". М., изд-во "Химия", 1966, с. 89-105.
41. Балабанов Е.М. Зарядка частиц в электрическом поле коронного разряда при большой запыленности газа. - "Электричество", 1965, № 2, с. 57-61.
42. Балабанов Е.М., Глазов М.И. Ионизатор для зарядки частиц. Авт. св. № 171388. Бюлл. изобр., 1965, № II, с. 24.

43. Кекин А.А., Шетилин А.П. Возможности повышения эффективности существующих устройств электроподзарядки диспергированной воды в поле коронного разряда. Тр. ин-та горного дела АН Каз. ССР, т. 16, 1965, с. 88-96.
44. Левитов В.И., Ткаченко В.М. О влиянии формы коронирующего электрода на скорость дрейфа частиц аэрозоля в электрофильтре. - "Изв. АН СССР. Энерг. и трансп." 1966, № 4, с. 76-80.
45. Мирзабемян Г.З. Зарядка шарообразных частиц аэрозоля с радиусом 0,1 - 2 мкм в электрическом поле с пространственным зарядом при одновременном учете диффузионного и "ударного" процессов заряжения. "Мат. (тезисы) Всес. научно-технической конф. по применению аэрозолей в народном хозяйстве. М., 1967, с. 7.
46. Мирзабемян Г.З. Зарядка аэрозолей в поле коронного разряда. Научно-техн. сб. "Сильные электрические поля в технологических процессах". М., "Энергия", 1969, с. 20-39.
47. Максимов Б.К. Зарядка частиц в электрическом поле периодического импульсного коронного разряда. Докл. научно-исслед. работ за 1966-1967 гг. Московского энергетического ин-та. Секция электроэнергическая, подсекция техники высоких напряжений. М., 1967, с. 196-205.
48. Hignett E.T. Particle - charge magnitudes in electrostatic precipitation. - "Proc. Instn. Electr. Engrs.", 1967, Vol.114, No.9, 1325-1328.
49. Splinter W.E. Air-curtain nozzle developed for electrostatically charging dusts. - "Transactions of the ASAE", 1968, Vol. 11, No. 4, 487-490, 495.
50. Splinter W.E. Electrostatic charging of agricultural sprays. - "Transactions of the ASAE", 1968, Vol.11, No. 4, 491-495.

51. Варехов А.Г. Зарядка аэрозольных частиц при разряде между плоскими электродами с диэлектрическим барьером. Тр. Ленингр. ин-та авиационного приборостроения, Л., 1968, вып. 58, с. 155-160.
52. Какабаев С. Исследование основных параметров устройств для электростатического осаждения аэрозоля ядохимикатов на растения. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Ашхабад, 1968.
53. Beach R. Controlling static electricity with electrostatic neutralizers. - "Product Engineering", 1953, Vol. 24, No. 11, 167-181.
54. Уитби К.Т., Кларк В.Е. Установка для счета и определения дисперсного состава аэрозолей с размерами частиц от 0,015 до 1 мкм. Исследования по ядерной метеорологии и химии атмосферы. Л., 1969, с.169-192.
55. Whitby K.T. Generator for producing high concentrations of small ions. "Review of scientific instruments", 1961, Vol. 32, No.12, 1351-1355.
56. Dötsch E., Friedrichs H.-A. Zur Theorie der elektrischen Aufladung eines Aerosols. "Staub-Reinh. Luft", 1970, Nr. 4, 156-159.
57. Bowen H.D., Hebblethwaite P., Carleton W.M. Application of electrostatic charging to the deposition of insecticides and fungicides on plant surfaces. "Agric. Engng.", 1952, Vol.33, No.6, 347-350.
58. Солодихин А.Е., Горбунова Е.В. Экспериментальная оценка способов электризации дистиллированной воды при пневмораспыливании. Научно-исследовательские труды Ивановского текстильного института, Иваново, 1970, № 8.
59. Макальский Л.М., Мирзабекян Г.З. Экспериментальное исследование зарядки частиц размером 0,2 - 4 мкм ионами воздуха. Научно-техн. сб. "Сильные электрические поля в технологических процессах", вып. 2. М., "Энергия", 1971, с. 95-108.

60. Тамм Э.И. Экспериментальная система для генерирования и определения параметров мономобильного аэрозоля. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973, с. 139-162.
61. Тамм Э.И. Экспериментальное исследование генератора мономобильного аэрозоля. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973, с. 163-175.
62. Виснапуу Л.Ю., Закомырдин А.А., Рейнет Я.Ю. Электризация конденсационного аэрозоля при помощи зарядного устройства с коронирующими электродами. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973, с. 247-264.

AEROSOOLIOSAKESTE ELEKTRILINE LAADIMINE
KOROONALAHENDUSE ABIL

L. Visnapuu

Resüme

Esitatakse kriitiline ülevaade kirjandusest aerosooli-
osakeste elektrilise laadimise kohta koroonalahenduse abil.
Eriline tähelepanu on pööratud aerosooli laadimisseadmete
efektiivsuse hindamisele ja vastavatele tehnilistele küsi-
mustele.

On püütud esile tuua seosed seadmete töö- ja konstruk-
tiivsete parameetrite vahel, mis on vajalikud laadimissead-
mete konstrueerimisel ja vajaliku töörežiimi valikul.

ELECTRICAL CHARGING OF AEROSOL PARTICLES BY
MEANS OF CORONA DISCHARGES

L. Visnapuu

Summary

The paper presents a critical review of bibliography
on the electrical charging of aerosol particles by means

of a corona discharge. Special attention has been paid to the assessment of devices for charging aerosols and to the corresponding technical questions.

An attempt has been made to point out the relationships between operational and structural parameters that are required in designing charging devices and in choosing the necessary operating conditions.

К ВОПРОСУ ОБ УДАЛЕНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ОТ ГЕНЕРАТОРА

Л.Ю. Виснапу

Наряду с образованием заряженных частиц удаление их от генератора является весьма важным фактором, определяющим его производительность по заряду. Эффективность удаления заряженных частиц от генератора зависит в основном от электростатических и гидродинамических сил, действующих на эти частицы со стороны электрического поля и окружающей газовой среды. Некоторые общие вопросы удаления ионов от аэроионизатора изучал Таммет [1], применяя теории коронного разряда и аспирационного счетчика ионов. Имянитов [2], рассматривая эффективность разрядников статического электричества, основанных на эмиссии заряженных частиц, исходит из соотношения электрической и кинетической энергии ионов. В настоящей работе принимается во внимание то, что газовый поток, обтекающий генератор заряженных частиц, увлекает их с собой, причем учитывается действие объемного заряда образованной струи частиц.

Пусть удаление заряженных частиц от генератора осуществляется обтекающим его потоком газа. Электрическое поле образующейся заряженной струи препятствует удалению новых частиц. Заряд самого генератора способствует удалению одноименно с ним заряженных частиц и тормозит удаление противоположно заряженных частиц. Критерием существования тока конвекции является преобладание сил, удаляющих заряженные частицы от генератора, над силами, стремящимися вернуть эти частицы на генератор:

$$F_{уд} \gg F_{возвр} \quad (I)$$

Рассмотрим упрощенный случай удаления заряженных частиц от генератора. Предположим, что генератор обтекает безграничный поток газа с однородной скоростью v_n , что все частицы имеют одинаковые радиусы r и заряды q и что сопротивление движения частиц в среде потока выражается формулой Стокса. Тогда условие (1) равносильно следующему:

$$6\pi\mu_z r (v_o + v_n) \geq q (E_{стр} - E_{иск}), \quad (2)$$

где μ_z - динамическая вязкость обтекающего газа,
 v_o - скорость истечения частиц из генератора,
 $E_{стр}$ и $E_{иск}$ - напряженность электрического поля в начальном сечении струи частиц, обусловленная соответственно зарядом струи и зарядом генератора.

Преобразуем правую часть неравенства (2). Предварительно выразим заряд частицы через ее радиус и удельный заряд:

$$q = \frac{4}{3} \pi r^3 \gamma Q, \quad (3)$$

где γ - плотность вещества частиц,
 Q - удельный заряд частиц.

Напряженность поля, создаваемую заряженной струей, в ее начальном сечении считаем равной напряженности, вызванной заряженным цилиндром радиуса R_o и бесконечной длины с объемной плотностью заряда ρ ,

$$E_{стр} = \frac{R_o}{2\epsilon_o} \rho, \quad (4)$$

где $\epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная.

Плотность заряда выразим следующим образом:

$$\rho = I/\phi = I/(\pi R_o^2 v_o), \quad (5)$$

где I - сила тока удаляющихся заряженных частиц,
 ϕ - объемная скорость образующейся струи.

Напряженность поля, обусловленную зарядом самого генератора, напишем в виде

$$E_{\text{ген}} = \sigma / \epsilon_0, \quad (6)$$

где σ — поверхностная плотность заряда генератора.

Используя приведенные выражения (3) — (6), неравенство (2) преобразуется к виду

$$I_m \geq I, \quad (7)$$

где

$$I_m = \pi R_0 v_0 \left(\frac{9\epsilon_0 \mu_z (v_0 + v_n)}{\gamma r^2 Q} + 2\sigma \right), \quad (8)$$

причем у Q и σ учитывается знак соответствующих зарядов.

Выполнение условия (7) автоматически поддерживается обратной связью между производительностью генератора и электрическим полем струи. Избыточные заряженные частицы возвращаются обратно к генератору.

В итоге можно заключить, что

$$\begin{cases} I = I_m, & \text{если } I_m < I_0, \\ I = I_0, & \text{если } I_m \geq I_0. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь

$$I_0 = QM \quad (10)$$

представляет собой производительность генератора по заряду, M — массовый расход частиц.

Из приведенного следует, что для эффективного направления создаваемых генератором заряженных частиц в открытое пространство необходимо обеспечить выполнение условия

$$I_m > I_0. \quad (11)$$

В частном случае, когда $v_n = 0$ и $\sigma = 0$, с учетом (8) имеем

$$\frac{9\pi\epsilon_0\mu_z R_0 v_0^2}{\gamma r^2 Q} > I_0. \quad (12)$$

Если частицы, имеющие нулевую начальную скорость, выносятся из генератора струей газа, то согласно [3]

$$v_0 = v_i / (1 + M/M_i), \quad (13)$$

где v_i и M_i - начальная скорость и массовый расход газа-носителя.

Подставив выражения Q по (10) и v_0 по (13) в (12), получим

$$\frac{3v_i (\pi \epsilon_0 \mu_i R_0 M / r)^{0,5}}{r (1 + M/M_i)} > I_0. \quad (14)$$

При обычных соплах величина v_i ограничена критической скоростью истечения

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{2\alpha e R T}{(\alpha e + 1) m_i}}, \quad (15)$$

где m_i - молекулярная масса газа. В случае воздуха при нормальных условиях ($\alpha e = 1,4$; $R = 8300$ Дж/(кмоль·К); $T = 300$ К; $m_i = 29$ кг/кмоль; $\mu_i = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с) $v_{кр} = 320$ м/с и неравенство (14) примет следующий практический вид

$$2,1 \cdot 10^{-5} \frac{(R_0 M / r)^{0,5}}{r (1 + M/M_i)} > I_0. \quad (16)$$

Это условие удаления всех заряженных частиц, создаваемых пневматическим генератором электроаэрозоля, в открытое пространство без добавочного обдува. Как видно, существенную роль в удалении заряженных частиц от генератора играют величины r , M и M_i . Считая в левой части (16) M переменной, а остальные величины постоянными, можно заключить, что рассматриваемое выражение имеет максимальное значение при $M = M_i$. Следовательно, с точки зрения эффективного удаления заряженных частиц последнее равенство соответствует оптимальному режиму, если r является независимым от M и M_i . Радиус r при прочих равных условиях должен быть по возможности

малым, а радиус R_0 большим. Если согласно работе [4] учесть, что при пневматическом распыливании жидкости $r \sim M/M_1$, то M/M_1 следует выбрать по возможности малым.

Литература

1. Таммет Х.Ф. Удаление ионов от аэроионизаторов. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. I40, Тарту, 1963, с. I03- - II2.
2. Имянитов И.М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л., Гидрометеиздат, 1970, с. 186.
3. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960, с. 632.
4. Golitzine N., Sharp C.R., Badham L.G. Spray nozzles for simulation of cloud conditions in icing tests of jet engines. National aeronautical establishment. Report 14. Canada, 1951.

LAETUD OSAKESTE EEMALDAMISEST GENERAATORIST

L. Visnapuu

Resümee

Vaadeldakse laetud osakeste eemaldamist generaatorist eeldustel, et generaator asub ühtlase kiirusega gaasijoas, et kõigil osakestel on võrdsed raadiused ja laengud, et keskkonna takistus osakeste liikumisele avaldub Stokes'i valemi järgi. Arvestades laetud osakeste joa elektrivälja tagasitõrjuvat mõju generaatorist väljuvatele osakestele leitakse, et laetud osakeste efektiivse eemaldamise seisukohalt saavutatakse generaatori optimaalne töörežiim siis, kui generaatorist väljuvate osakeste massikulu on võrdne osakesi väljakandva gaasi massikuluga. Vedeliku pneumaatilisel pihustamisel tekkivate osakeste korral on aga otstarbekohane nimetatud kulude suhe valida võimalikult väike.

ON REMOVING CHARGED PARTICLES FROM THE GENERATOR

L. Visnapuu

Summary

The paper deals with the removal of charged particles from the generator on conditions that the generator should be in a gas jet having a uniform speed, that all the particles should possess equal radii and charges, and that the environmental resistance to the particle flow should proceed in accordance with a formula by Stokes. Considering the repellent effect of the charged particles of the electric field of the jet on the particles leaving the generator, it has been ascertained that from the standpoint of an efficient removal of charged particles the optimum operating conditions are obtained when the mass flow of the particles leaving the generator is equal to the mass flow of the gas carrying out the particles. In the case of the particles arising from the pneumatic spraying of a liquid it is expedient to take the ratio of the above flows small.

РАСПЫЛИТЕЛЬ С СОПЛАМИ БЕРГСОНА, СНАБЖЕННЫЙ СТЕРЖНЕВЫМ ИНДУЦИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Л. Ю. Виснапуу

Для получения электрически заряженного распыла Рейнет и Таммет [1] предложили установить над жидкостным соплом пневматического распылителя Бергсона [2] индуцирующий электрод в виде стержня. Это предложение реализовано в нескольких типах генераторов электроаэрозолей, успешно используемых в качестве ингаляционных аппаратов [3-5]. Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению физических характеристик названного распылителя с индуцирующим электродом в зависимости от его конструктивных и рабочих параметров.

Опыты проводили на экспериментальном устройстве, показанном в разрезе на рис. 1. Впредь будем называть это устройство генератором. Газовое сопло 1 и жидкостное сопло 2 установлены под прямым углом относительно друг друга в кронштейне 3. К нему прикреплен также изолятор 4 индуцирующего электрода 5, подвешенного на держателе 6. Электрод 5 фиксирован в держателе 6 посредством установочного винта 7, а держатель 6 соединен с изолятором 4 с помощью гайки 8. Изолятор 4, выполненный из фторопласта, имеет полость с лабиринтом, вход в который прикрыт защитной шайбой 9. Такое устройство изолятора предотвращает короткое замыкание электрода 5 по пленке жидкости, могущей образоваться на поверхности изолятора 4 в условиях повышенной влажности окружающей среды. Во избежание стекания распыливаемой жидкости по внешней стенке сопла 2 последнее снабжено козырьком 10.

Сжатый воздух, подаваемый в сопло 1, вытекает из него цилиндрической струей, проходит промежуток между соплом 2 и индуцирующим электродом 5, подсасывая через сопло 2

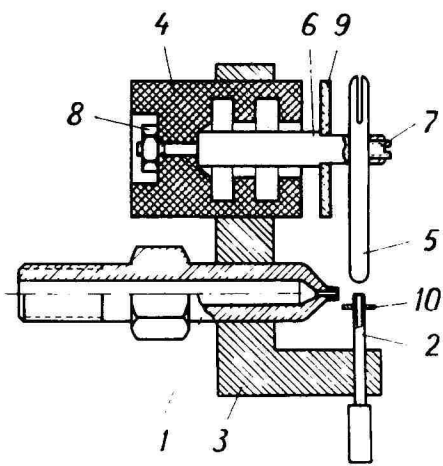


Рис. 1. Экспериментальный распылитель с соплами Бергсона, снабженный индуцирующим электродом.

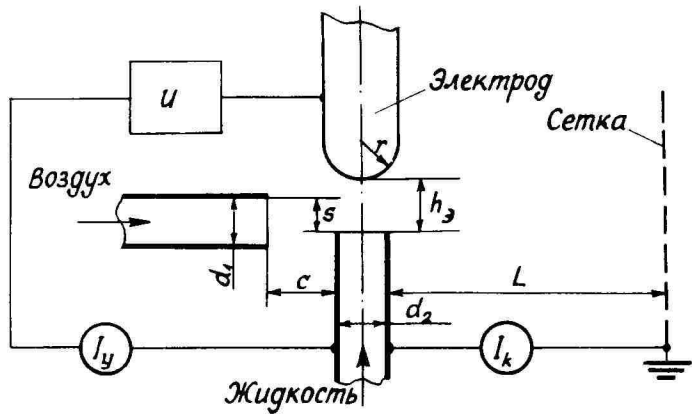


Рис. 2. Обозначения основных размеров и параметров сопел Бергсона, индуцирующего электрода и их взаимного расположения.

жидкость, и распыливает ее. При этом потенциал, сообщаемый от источника напряжения электроду 5 относительно заземленной жидкости, создает над поверхностью распадающейся на капельки жидкости электрическое поле, которое наводит на ней поверхностные заряды. Последние остаются на образующихся капелках распыла и обеспечивают электроразряженность получаемого аэрозоля.

Обозначим основные размеры и параметры описанного генератора так, как показано на рис. 2. Большинство характеристик генератора определено при $d_1 = 2,0$ мм, $d_2 = 1,2$ мм, $c = 1,0$ мм, $r = 1,5$ мм в случае распыливания водопроводной воды. Торцевые срезы всех примененных сопел перпендикулярны к их осям.

Эффективность удаления зарядов от генератора в зависимости от расстояния до сетки, служащей коллектором заряженных частиц, при различных давлениях сжатого воздуха перед газовым соплом представлена на рис. 3,а. Как видно, эффективность удаления, а следовательно, и ток конвекции значительно уменьшаются с увеличением расстояния до коллектора, причем тем быстрее, чем меньше давление газа, питающего распылитель. С повышением напряжения индуктирующего электрода происходит некоторое уменьшение эффективности удаления зарядов, объяснимое возрастающим притяжением зарядов на электрод. Приведенные графики показывают, насколько существенно учитывать расстояние до коллектора при использовании и измерении тока конвекции зарядов. В случае рассматриваемого распылителя ток конвекции составляет, например, половину производительности генератора по заряду, когда расстояние до коллектора 0,2–0,5 м соответственно избыточному давлению сжатого воздуха 1–3 ат. При расстояниях более 1 м от генератора удаляется воздушной струей в среднем менее 1/3 создаваемых зарядов, остальные возвращаются под действием объемного заряда аэрозольного облака обратно на генератор.

Относительное расположение сопел оказывает сильное влияние на основные характеристики генератора. На рис. 3,б показаны зависимости тока конвекции и расхода жидкости, а

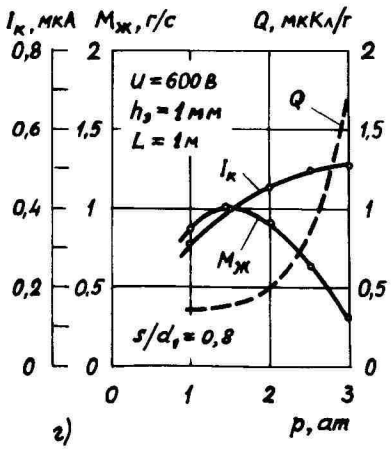
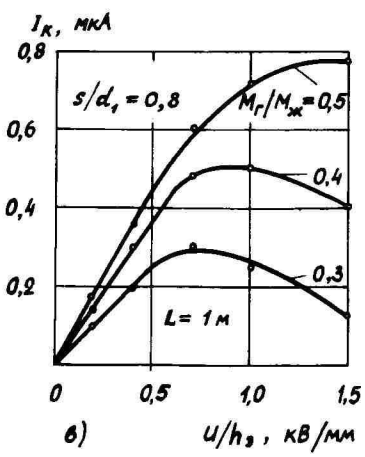
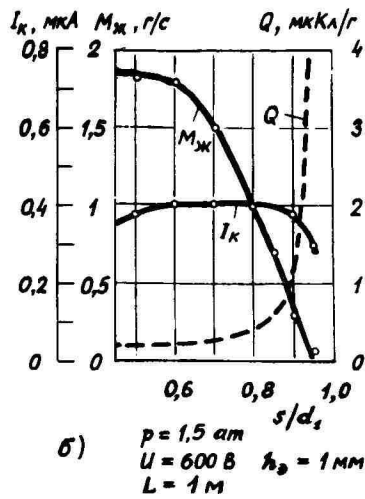
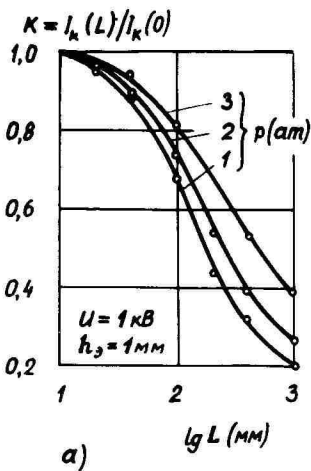


Рис. 3. Основные характеристики распылителя Бергсона с индуцирующим электродом.

также их отношения, удельного заряда, от безразмерного параметра, равного отношению высоты просвета газового сопла к его диаметру. При этом межэлектродное расстояние поддерживали постоянным, взаимно перпендикулярные оси сопел сохраняли в одной плоскости. С увеличением параметра от 0,4 до 1,0 расход жидкости непрерывно уменьшается до 0; ток конвекции вначале растет, а потом падает, имея в пределах параметра 0,6–0,8 пологий максимум; удельный заряд резко возрастает. Если нас интересует большой или малый расход жидкости при большом значении тока конвекции, то параметр следует выбрать равным соответственно 0,6 и 0,9. Для получения капель с максимальным удельным зарядом надо распыливать жидкость при минимальном расходе. Это находится в качественном согласии с результатами теоретической работы [6]. На основании графика тока конвекции можно заметить, что он не зависит от расхода жидкости, если площадь поверхности жидкости, с которой срываются капли, неизменна при прочих равных условиях. Уменьшение расхода жидкости с увеличением относительного просвета газового сопла обусловлено изменением характера обтекания торца жидкостного сопла газовой струей.

Зависимость тока конвекции от напряженности электрического поля при различных отношениях расходов газа и жидкости показана на рис. 3, в. Напряженность электрического поля над поверхностью распыливаемой жидкости изменяли изменением напряжения индуцирующего электрода при постоянном межэлектродном расстоянии. Как видно из приведенных графиков, соответствующих большому расстоянию до коллектора, ток конвекции растет с увеличением отношения расходов газа и жидкости, причем тем значительнее, чем больше напряженность поля в зоне индукции. Наблюдается максимум тока конвекции, имеющий место при тем большем значении напряженности поля, чем больше отношение расходов газа и жидкости. Таким образом, для определенного режима распыливания существует оптимальная напряженность электрического поля, при которой ток конвекции имеет максимальное значение. До некоторых значений напряженности поля зависимость тока конвекции от

нее линейная, как следует из теории [6], а с дальнейшим увеличением напряженности эта зависимость ослабевает и ток конвекции начинает даже уменьшаться. Это объясняется тем, что заряженных капель все больше и больше притягивается к индуцирующему электроду, т.е. растет ток утечки.

Зависимости основных характеристик от давления и диаметра сопла сжатого воздуха изображены на рис. 3,г и 4. Как видно по рис. 3,г с увеличением давления сжатого воздуха, подаваемого в распылитель, от 1 до 3 ат расход жидкости имеет максимум при давлении 1,5 ат. Падение расхода жидкости обусловлено возрастающим гидравлическим сопротивлением межэлектродного промежутка, снижающим эжекционную способность распылителя. После удаления индуцирующего электрода подобного снижения не наблюдается. Ток конвекции, а также удельный заряд капель с увеличением давления воздуха монотонно возрастают. Из графиков рис. 3,б и г видно, что при постоянных параметрах зоны индукции с уменьшением расхода жидкости ток конвекции может увеличиваться. Это вызвано увеличением интенсивности распада поверхности жидкости в зоне индукции.

Рис. 4 показывает, что при $c = 1$ мм с увеличением диаметра газового сопла расход жидкости растет, пока $d_1/d_2 < 1,2$. С дальнейшим увеличением d_1 заметного роста $M_{ж}$ при постоянном давлении сжатого воздуха не происходит. Это объясняется установлением неизменяющегося режима обтекания торца жидкостного сопла, который целиком охватывается ядром потока. Ток конвекции в рассматриваемом интервале диаметра, однако, постоянно растет, что обусловлено увеличением эффективности удаления заряженных капель из межэлектродного промежутка. Если по приведенным данным вычислить удельный заряд, то заметим, что он имеет максимум при наименьшем диаметре сопла ($d_1 = 0,5$ мм) и наибольшем давлении сжатого воздуха ($p_{изб.} = 2$ ат). При $d_1 = d_2$ удельный заряд минимален.

Соотношение токов конвекции и утечки в зависимости от отношения расходов газа и жидкости проиллюстрировано на рис. 5. Как видно, с увеличением отношения расходов газа

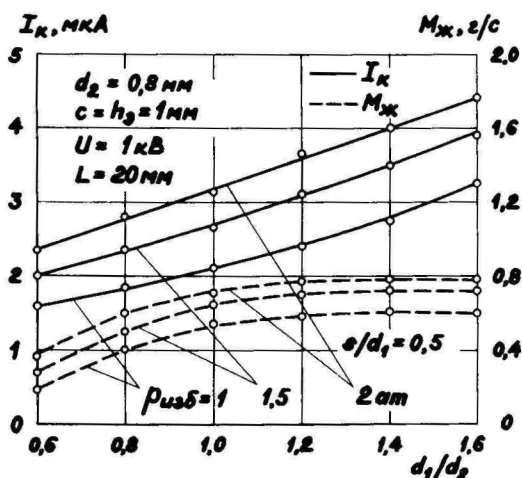


Рис. 4. Зависимости тока конвекции и расхода жидкости от отношения диаметров сопел распылителя.

и жидкости ток конвекции растет, асимптотически приближаясь к максимальному значению, определенному производительностью генератора при прочих равных условиях, а ток утечки уменьшается, приближаясь к нулевому значению. При малых относительных расходах сжатого газа, по рисунку, например, при $M_T/M_{ж} < 0,9$, ток конвекции меньше тока утечки. Это значит, что больше половины зарядов, покидающих распылитель, попадает на индуцирующий электрод. При больших относительных расходах газа, наоборот, больше половины этих зарядов выносятся струей за пределы генератора.

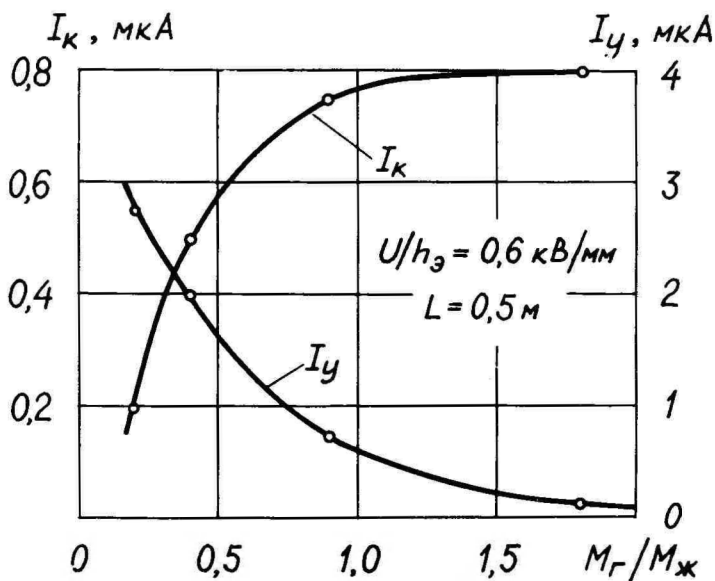


Рис. 5. Зависимости тока конвекции и тока утечки от отношения расходов газа и жидкости.

В таком случае ток заряженных частиц, создаваемых генератором, превышает ток, потребляемый им для питания индуцирующего электрода. Определенную долю тока утечки может составить ток поверхностной проводимости изолятора индуцирующего электрода, но в описанном генераторе благодаря особой конструкции изолятора этот ток был весьма мал по сравнению с током объемной проводимости межэлектродного промежутка.

Обдув распылителя потоком воздуха, как показали проведенные опыты, позволяет заметно повысить эффективность удаления заряженных частиц от распылителя, особенно при больших расстояниях до коллектора. Поток, обтекающий распылитель, создавали воздухом, вытекающим из шести параллельных отверстий диаметром 6 мм, установленных вокруг газового сопла так, что плоскость выходных сечений их нахо-

дидась позади выходного сечения сопла на 20 мм и оси их располагались на расстояниях 10 мм от оси сопла. График изменения тока конвекции в зависимости от расхода воздуха, обдувающего распылитель при указанных условиях, представлен на рис. 6. Увеличение расхода обтекающего воздуха

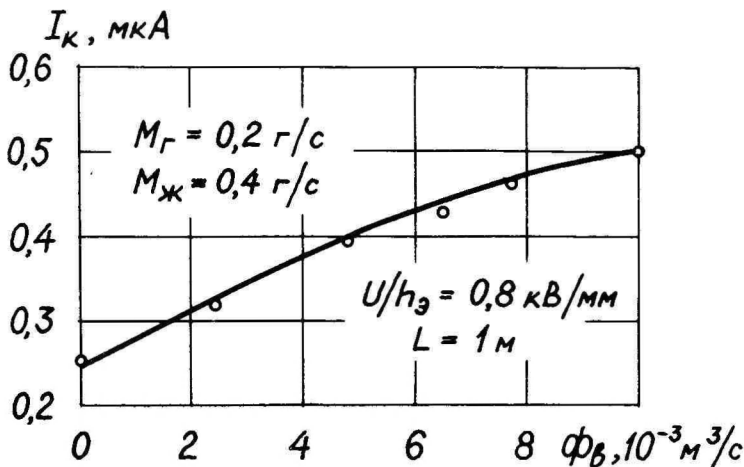


Рис. 6. Зависимость тока конвекции от расхода воздуха, обтекающего распылитель.

уменьшает рассеяние струи заряженных частиц и вместе с тем ток утечки, а также уменьшает объемную плотность заряда в струе, препятствующую выносу зарядов из генератора. Это может обеспечить увеличение тока конвекции в несколько раз. Ток конвекции растет до тех пор, пока обтекающий воздух будет уносить с собой все образующиеся заряженные частицы. Приведенный график подтверждает качественно теоретический вывод по формуле (9) работы [7], где следует учесть, что $v_{\kappa} \sim \Phi_B$. Практическое осуществление обдува целесообразно тем, что для создания необходимого потока пригодны воздушодувки с малой степенью сжатия, например, вентиляторы.

Выводы

Экспериментальное исследование физических характеристик распылителя Бергсона с индуцирующим электродом как генератора заряженных частиц показало следующее:

эффективность удаления зарядов от генератора (отношение токов конвекции, соответствующих рассматриваемому и минимальному расстояниям между выходным сечением генератора и установленной перед ним заземленной сеткой) значительно уменьшается с увеличением его расстояния до заземленной сетки, в меньшей мере она уменьшается с понижением давления сжатого воздуха, питающего генератор, и с повышением индуцирующего напряжения;

с увеличением отношения высоты просвета газового сопла к его диаметру от 0,4 до 1,0 расход жидкости непрерывно уменьшается, а ток конвекции имеет пологий максимум;

с увеличением отношения расходов газа и жидкости ток конвекции растет, причем тем значительнее, чем больше напряженность поля в зоне индукции, а ток утечки падает;

с увеличением расхода сжатого воздуха, подаваемого в распылитель, расход жидкости имеет максимум, в то время как ток конвекции монотонно растет;

с увеличением расхода воздуха, обтекающего генератор, эффективность удаления зарядов увеличивается.

Литература

1. Рейнет Я.Ю., Таммет Х.Ф. Аэрозоль-ионизатор. Авт. св. № 123636. Бюлл. изобр., М., 1959, № 21, с. 35.
2. Martini H. Richtlinien zur Aerosolbehandlung. "Deutsche Medizinische Wochenschrift", Nr.45, Stuttgart, 1953, S. 1543-1548.
3. Виснапу Л.Ю., Йентс А.К. Физические характеристики различных электроаэрозольных аппаратов, применяемых в медицинской практике. Уч. зап. Тартуского гос.ун-та,

вып. 163, Тарту, 1964, с. 404-412.

4. Якобсон А.Ф., Тамм Э.И., Рейнет Я.Ю. Генераторы электроаэрозолей к аппаратам искусственного дыхания. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 239, Тарту, 1969, с. 122-130.
5. Сийрде Э.К., Сибуль С.Ф., Йентс А.К. О применении в оториноларингологии сконструированных тартускими физиками аэроионизаторов, аэрозоль- и электроаэрозоль-аппаратов. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 283, Тарту, 1971, с. 110-117.
6. Виснапуу Л.Ю. К теории индукционной электризации распыляемых жидкостей. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 283, Тарту, 1971, с. 141-156.
7. Виснапуу Л.Ю. К вопросу об удалении заряженных частиц от генератора. Наст. сборник.

VARDAKUJULISE INDUTSEERIVA ELEKTROODIGA BERGSONI PIHUSTI

L. Visnapuu

Resüme

Ekspimentaalselt uuritakse indutseeriva elektroodiga Bergsoni pihusti tootlikkuse ja konvektiivse voolu sõltuvust tema töö- ja konstruktsiooniparameetritest. Defineeritakse generaatorist laengute eemaldamise efektiivsuse mõiste, mille all mõeldakse maandatud võrgu vaadeldavale ja minimaalsele kaugusele vastavate konvektsioonivoolude suhet. Esitatakse nimetatud seadme kui laetud osakeste generaatori mitmesugused tehnilised karakteristikud.

A BERGSON ATOMIZER WITH A RODLIKE INDUCING ELECTRODE

L. Visnapuu

Summary

The paper deals with an experimental study of the dependence of the productivity and of the convection current of a Bergson atomizer provided with an inducing electrode on its operating and design parameters. The concept of the efficiency of removing charges from a generator is defined as a ratio between the convection currents corresponding to the given distance and to the minimum distance of the earthed grid. The article also presents technical characteristics of the above device as a generator of charged particles.

АЭРОЗОЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ГРУППОВОЙ ВАКЦИНАЦИИ

Я.Ю. Рейнет, Л.Ю. Виснапуу, Э.В. Сула

В последнее время заметно увеличился интерес ветеринарных специалистов к групповой ингаляционной вакцинации сельскохозяйственных животных и птиц. Это обусловлено сравнительно высокой производительностью и эффективностью соответствующего аэрогенного метода [1], заключающегося во вдыхании аэрозоля, образованного из вакцинного препарата. Эффект применения ингаляционной вакцинации в большой мере зависит от технической характеристики аппаратуры, создающей аэрозоль. Ниже описано разработанное нами аэрозольное устройство, успешно применяемое в нескольких животноводческих и птицеводческих хозяйствах страны и подготовленное к серийному выпуску.

При разработке устройства исходили из следующих требований:

конструкция устройства должна быть по возможности простая и надежная в работе;

процесс генерирования аэрозоля не должен оказывать заметного вредного воздействия на биологические свойства диспергируемого препарата;

создаваемый аэрозоль должен быть достаточно стабильный во времени, равномерно рассеиваемый в окружающее пространство и максимально задерживаемый в органах дыхания.

Генератором аэрозолей выбран пневматический распылитель с индуцирующим электродом [2], позволяющий при большой производительности создавать мелкодисперсный распыл, при желании электрически заряженный. На рис. 1 показан поперечный разрез распылителя. Корпус 3 из диэлектрического материала имеет ступенчатую центральную полость, в которую введена втулка 5, закрепленная винтами 7, и жидкостное сопло 6, фиксированное нижней гайкой 2. Во втулку 5 ввернут

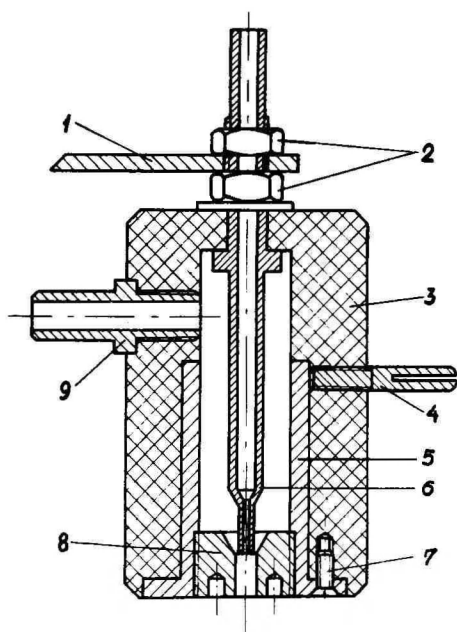


Рис. I. Распылитель.

- I - держатель,
- 2 - гайки,
- 3 - корпус,
- 4 - контакт,
- 5 - втулка,
- 6 - жидкостное сопло,
- 7 - винт,
- 8 - индуцирующий электрод,
- 9 - штуцер сжатого газа.

индуцирующий электрод 8, выполненный в виде сопла с коническим каналом, переходящим в цилиндрический. Оптимальным, с точки зрения электризации жидкости, положением электрода 8 относительно сопла 6 является такое, при котором выходное сечение сопла 6 находится во входном сечении цилиндрического канала электрода 8 [3]. При этом коническая часть канала электрода 8 и внешняя поверхность торцевой части сопла 6 образуют сужающееся кольцевое газовое сопло. Кольцевая полость между корпусом 3 и соплом 6 соединена со штуцером 9 сжатого газа. Для сообщения электроду 8 электрического потенциала, необходимого для заряжения распыла, служит контакт 4. Распылитель прикрепляется к держателю I с помощью верхней гайки 2.

При работе распылителя сжатый газ, поданный в штуцер 9, поступает в кольцевую полость корпуса 3 и кольцевой струей

обтекает срез сопла 6. В результате через отверстие сопла 6 эжектируется жидкость, в которую опущен шланг, подсоединенный ко входу этого сопла. Струей газа жидкость увлекается и дробится на капли. Заряды, наведенные электрическим полем электрода 8 на распадающейся жидкости, остаются на образующихся каплях, обуславливая их электризованность.

В случае открытого распылителя струя распыла жидкости состоит из капель различных размеров, особенно при малых отношениях расходов сжатого газа и диспергируемой жидкости. При этом крупные капли из-за сравнительно быстрого оседания обуславливают большие потери. В отношении эффективной вакцинации и малых потерь препаратов целесообразно создавать аэрозоль, частицы которого не только долго сохранялись бы в атмосфере, но и в наибольшей мере при ингаляции задерживались бы в бронхах и альвеолах. Последнему условию больше всего удовлетворяют частицы диаметром 1...2 мкм [4]. Как меньшие, так и большие частицы задерживаются в нижних дыхательных путях в меньшей степени. Следовательно, желателен аэрозоль с узким спектром распределения частиц по размерам. Поэтому для сепарации крупных капель распыла и вместе с тем повышения эффективности вакцинации описанный распылитель снабжен камерой с выходными отверстиями для аэрозоля [5]. Устройство в целом изображено на рис. 2.

Распылитель 3 посредством держателя 5 прикреплен к крышке 6 цилиндрической камеры 7. Напротив сопла распылителя 3 в крышке 6 имеется отверстие, продолжающееся внутри камеры 7 диффузором 8. Камера 7 снабжена ручкой 4, ножками II и резервуаром I2 для диспергируемой жидкости. На дно резервуара I2 опущена трубочка, которая через шланг 2 соединена с жидкостным соплом распылителя 3. Для подвода сжатого газа служит шланг I. Напряжение на индуцирующий электрод распылителя 3 подается посредством кабеля 9 от выпрямителя IO, вмонтированного в сетевую вилку.

Для получения аэрозоля вакцины большей концентрации и исключения испарения капель целесообразно устройство устанавливать в боксе, в который загоняют животных и птиц. Подав

по шлангу I сжатый воздух, по шлангу 2 засасывается раствор вакцины, налитый в резервуар I2. Струя распыла направлена в камеру 7. Крупные капли под действием инерционных и гравитационных сил оседают в нижней части камеры 7, стекая

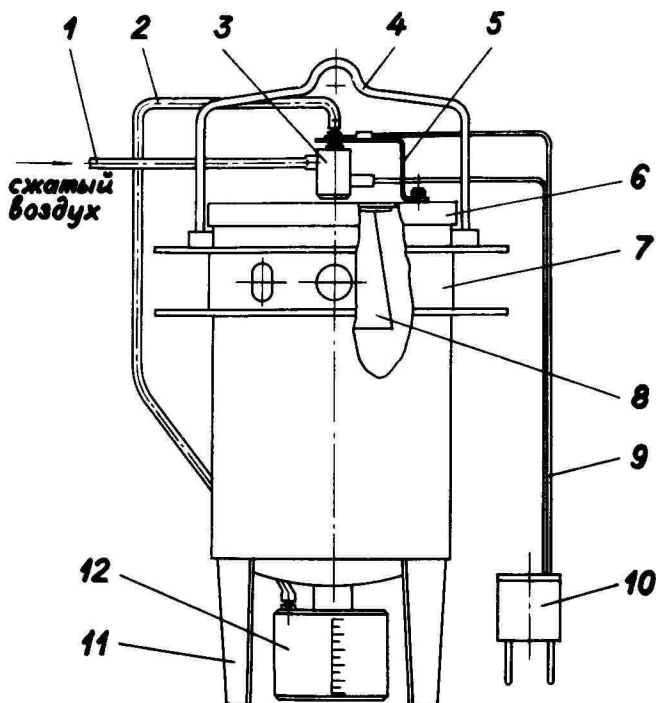


Рис. 2. Аэрозольное устройство.

I - шланг сжатого воздуха, 2 - шланг жидкости, 3 - распылитель, 4 - ручка, 5 - держатель, 6 - крышка, 7 - сепарационная камера, 8 - диффузор, 9 - кабель индуцирующего напряжения, 10 - выпрямитель напряжения, 11 - ножки, 12 - резервуар жидкости.

обратно в резервуар I2. Мелкие частицы выносятся потоком воздуха из камеры 7 через боковые отверстия в окружающую

среду. Прямой выход частиц из камеры 7 предотвращен диффузором 8. Если выпрямитель 10 включен в электрическую сеть, то капли распыла заряжены. Электризованность распыла способствует большей сепарации капель в камере, более интенсивному рассеянию выносимых капель в окружающее пространство, а также большей задержке их в органах дыхания.

Спектр размера капель аэрозоля, получаемого при распыливании воды с примесью 5% глицерина сжатым воздухом, избыточное давление которого равнялось 2 ат, определяли микроскопическим методом в двух режимах: с подачей и без подачи напряжения на индуцирующий электрод. Отбор проб аэрозоля осуществляли на расстоянии 0,1 м от выходных отверстий камеры. Пользовались вакуумным инерционным пробоотборником, в который через отверстие с большой скоростью засасывался аэрозоль. Струя аэрозоля ударялась о предметное стекло, покрытое компрессорным маслом. Полученные гистограммы дифференциального распределения капель по диаметрам представлены на рис. 3. На основании этих гистограмм массовый медианный диаметр капель незаряженного аэрозоля $4,1 \pm 0,1$ мкм, а заряженного $2,5 \pm 0,1$ мкм. Данные показывают, что электризация аэрозоля способствует большей сепарации крупных капель распыла и сужению спектра распределения выходящих из камеры капель, приближая их к оптимальным для вакцинации.

Вопрос губительного действия процесса диспергирования и электризации на активность микробов и вирусов изучали специалисты Казанского ветеринарного института им. Н.Э.Баумана, проводившие испытание рассматриваемого аэрозольного устройства. Было установлено, что это действие снижает активность микробов и вирусов не более, чем на несколько процентов.

Кроме того, их опыты показали, что среднее значение коэффициента задержки незаряженных капель аэрозоля в органах дыхания поросят составляет 0,68, а заряженных капель 0,74. При этом преобладающая часть капель осаждается в легких.

Основные технические данные аэрозольного устройства

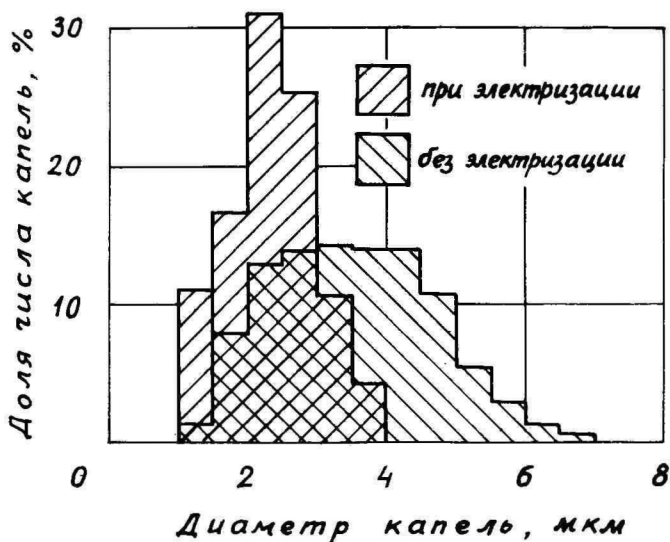


Рис. 3. Гистограммы счетных распределений капель аэрозоля в режиме электризации и без электризации.

следующие:

избыточное давление сжатого воздуха 2 ат
 расход сжатого воздуха 1,5 г/с
 расход распыливаемой жидкости 0,1 г/с
 индуцирующее напряжение 500 В
 массовый медианный диаметр капель аэрозоля
 без электризации 4,1 мкм
 при электризации 2,5 мкм
 масса устройства 4 кг

Выводы

I. Электризация капель распыла, направляемых в сепарационную камеру, способствует большей сепарации крупных

капель и сужению спектра распределения выходящих из камеры капель, что увеличивает эффективность вакцинации.

2. Процессы пневматического распыливания и индукционно-го заряжения растворов вакцин не снижают заметным образом их биологической активности.

3. Коэффициент задержки в органах дыхания ингалированных заряженных капель больше соответствующего коэффициента незаряженных капель.

Литература

1. Лебединский В.А. Ингаляционный (аэрогенный) метод вакцинации. М., "Медицина", 1971.
2. Виснапуу Л.Ю. Распылитель с индуцирующим электродом. Авт. св. № 387744. Бюлл. изобр., М., 1973, № 28, с. 27.
3. Виснапуу Л.Ю. Экспериментальное исследование моделей пневматического распылителя с индуцирующим электродом. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973, с. 187-208.
4. Спурный К., Йех Ч., Седлачек Б., Шторх О. Аэрозоли. М., Атомиздат, 1964, с. 90.
5. Рейнет Я.Ю., Сула Э.В., Бартникас И.И., Добилас Ю.М. Электроаэрозольный аппарат для вакцинации животных. Авт. св. № 389789. Бюлл. изобр., М., 1973, № 30, с. 14.

AEROSOOLISEADELDIS GRUPIVIISILISEKS VAKTSINEERIMISEKS

J.Reinet, L.Visnapuu, E.Sula

Resüme

Kirjeldatakse autorite poolt väljatöötatud aerosooli-seadeldist, mis koosneb indutseeriva elektrodiga pneumaatilisest pihustist, pingelaldist ja jämeda pihu kinniüüdmise kambri. Esitatakse seadeldise tehnilised andmed. Võrreldakse pihu elektriseerimise korral ja ilma selleta kambri väljuvate aerosooliosakeste disperssust. Leitakse, et aerosooliosakeste masskeskmine läbimõõt on esimesel juhul väiksem kui teisel juhul. On kindlaks tehtud, et vaktsiini pneumaatiline pihustamine ja elektrostaatiline laadimine ei kahjusta märgatavalt tema bioloogilisi omadusi.

AN AEROSOL DEVICE FOR GROUP VACCINATION

J.Reinet, L.Visnapuu and E.Sula

Summary

The article describes an aerosol device designed and constructed by the authors for group vaccination of farm animals. The aerosol device consists of a pneumatic atomizer with an inducing electrode, a rectifier and a separator for catching coarse particles. Technical data on the device are presented. The degree of dispersion of the aerosol particles passing out of the device is compared in cases when the spray is uncharged and when it has been imparted an electric charge. It has been ascertained that the mass median diameter of the aerosol particles in the former case is greater than in the latter case. It has been established that the pneumatic atomization and the electrostatic charging of the vaccine do not markedly damage its biological properties.

О ПРИМЕНЕНИИ АЭРОЗОЛЕЙ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ ИНКУБАЦИОННЫХ ЯИЦ

К.А. Петерсон, Л.Ю. Виснапуу, Э.Э. Пярнасте,
О.А. Рейварт, М.Э. Нурме

Данная работа посвящена экспериментальной оценке дезинфекционной эффективности электрически заряженных и незаряженных аэрозолей неомицина при обработке инкубируемых яиц.

Одним из основных источников заражения кур сальмонеллезом и колибактериозом являются инфицированные инкубационные яйца. Для их дезинфекции применяют весьма различные методы и средства. В последние годы при обработке яиц и профилактике заразных заболеваний птиц все шире используют аэрозоли [1-7]. Показано, что частицы аэрозолей адсорбируются на обрабатываемых поверхностях быстрее и действие их эффективнее, если они электрически заряжены [8, 9].

Исходя из этого, целью настоящей работы было поставлено сравнение эффективности аэрозоля и электроаэрозоля неомицина при дезинфекции куриных яиц, зараженных культурами *Salmonella gallinarum* и *Escherichia coli*, а также выяснение дозы неомицина, необходимой для полной дезинфекции.

Тестобъекты и методика эксперимента

В ходе исследования осуществлено всего 18 серий опытов на 752 куриных яйцах породы белый леггорн. Для заражения яиц использовали односуточные культуры *S. gallina-*

гus и E. coli в бульоне. Обими культурами инфицировали 376 куриных яиц. Аэрозолем неомицина обработали 400 и соответствующим электроаэрозолем 352 инфицированных яйца. При инфицировании на участок поверхности скорлупы каждого яйца 4 см² ватным тампоном наносили в равных количествах указанные культуры, предварительно разведенные в стерильном физиологическом растворе поваренной соли. Затем эти яйца, разложенные бок о бок на подставках, помещали в камеру с габаритами 2,8x1,7x1,7 м, изготовленную на базе инкубатора "Рекорд". Подставки с исследуемыми яйцами размещали между другими аналогичными подставками, расположенными друг над другом. Прорезы между горизонтальными слоями яиц составляли 20-30 мм.

Аэрозоли создавали в отдельных опытах из препаратов, полученных растворением в 250 мл водопроводной воды следующих количеств неомицина: 1,5 г (1500000 ЕД); 2,0 г (2000000 ЕД); 2,5 г (2500000 ЕД); 3,0 г (3000000 ЕД); 3,5 г (3500000 ЕД). Эти растворы диспергировали пневматическим распылителем с индуцирующим электродом [10]. Для создания электроаэрозоля на индуцирующий электрод подавали напряжение 1 кВ, а при создании аэрозоля это напряжение равнялось нулю. Распылитель питали от компрессора СО-7А. Расход сжатого воздуха составлял 7,5 г/с и медианный радиус капель распрыска 4 мкм. Ток конвекции заряженных капель равнялся 6 мкА.

Дозу препарата определяли как отношение массы диспергированного активного вещества (неомицина) к объему камеры, в которую помещали яйца.

Для оценки действия аэрозолей, образованных при распыливании растворов неомицина, через 60 и 120 мин. после подачи их в камеру с поверхности инфицированной яичной скорлупы брали пробы посредством стерильных ватных тампонов, смоченных питательной средой Эндо. Далее от этих тампонов делали посевы параллельно в питательные среды Эндо и Смирнова. Затем среды с посевами помещали в термостат, в котором поддерживали температуру 37° С. Результаты посевов проверяли после 24 и 48 часов.

Результаты исследования

При проведении опытов было замечено, что после введения в камеру незаряженного аэрозоля видимый туман держался там, не рассеиваясь, 50–60 мин, в то время как после введения заряженного аэрозоля видимый туман исчезал через 10–15 мин.

Данные по бактерицидному действию аэрозоля неомицина представлены в табл. 1 и 2, а соответствующего электроаэрозоля в табл. 3 и 4.

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что аэрозоль неомицина в дозе $0,19 \text{ г/м}^3$ за 60 мин не оказывает на *S. gallinarum* заметного бактерицидного действия, а в дозе $0,25 \text{ г/м}^3$ обеззараживает лишь 8,3% инфицированных яиц. И увеличенные дозы неомицина ($0,31 \dots 0,37 \text{ г/м}^3$) действуют за 60 мин относительно слабо, обеззараживая только 20...50% инфицированных яиц.

Относительно эффективно действует аэрозоль неомицина за 120 мин, обеззараживая при дозе $0,31 \text{ г/м}^3$ 85% и при дозе $0,37 \text{ г/м}^3$ 100% яиц.

Аналогичные результаты получены при дезинфекции аэрозодем неомицина яиц, инфицированных *E. coli* (табл. 2). И в этом случае бактерицидное действие аэрозоля неомицина за 60 мин сравнительно слабое. При дозах неомицина $0,19$ и $0,25 \text{ г/м}^3$ обеззараживаются соответственно лишь 4 и 20% инфицированных яиц, а при дозах $0,37$ и $0,43 \text{ г/м}^3$ около 40%. За 120 мин аэрозоль неомицина действует бактерицидно при дозе $0,31$ на 90% и при дозах $0,37$ и $0,43 \text{ г/м}^3$ на 100% инфицированных яиц.

Анализируя действие электроаэрозоля неомицина на инфицированные яйца, из табл. 3 и 4 следует, что он обеспечивает по сравнению с соответствующим аэрозолем повышенную эффективность дезинфекции при времени экспозиции 60 мин. Так, например, электроаэрозоль неомицина за 60 мин при дозе $0,37 \text{ г/м}^3$ обеззараживает 68,7% и при дозе $0,43 \text{ г/м}^3$ 100%

Таблица 1

Бактерицидность аэрозолей неомицина
по отношению к *S. gallinarum*

Доза неомицина, г/м ³	Общее кол-во тест- объек- тов в опыте	Из них			
		через 60 мин		через 120 мин	
		обезза- ражено, %	не обезза- ражено, %	обезза- ражено, %	не обезза- ражено, %
0,19	24 + 24	0	100	25,0	75,0
0,25	24 + 24	8,3	91,7	62,5	37,5
0,31	20 + 20	20,0	80,0	85,0	15,0
0,37	16 + 16	50,0	50,0	100,0	0
0,43	16 + 16	56,2	43,8	100,0	0

Таблица 2

Бактерицидность аэрозолей неомицина
по отношению к *E. coli*

Доза неомицина, г/м ³	Общее кол-во тест- объек- тов в опыте	Из них			
		через 60 мин		через 120 мин	
		обезза- ражено, %	не обезза- ражено, %	обезза- ражено, %	не обезза- ражено, %
0,19	24 + 24	4,2	95,8	16,7	83,3
0,25	24 + 24	20,8	79,2	70,8	29,2
0,31	20 + 20	30,0	70,0	90,0	10,0
0,37	16 + 16	37,5	62,5	100,0	0
0,43	16 + 16	43,7	56,3	100,0	0

Таблица 3

Бактерицидность электроаэрозолей неомицина
по отношению к *S. gallinarum*

Доза неомицина, г/м ³	Общее кол-во тест- объек- тов в опыте	Из них			
		через 60 мин		через 120 мин	
		обезза- ражено, %	не обезза- ражено, %	обезза- ражено, %	не обезза- ражено, %
0,25	24 + 24	33,3	66,7	58,3	41,7
0,31	32 + 32	37,5	62,5	78,1	21,9
0,37	16 + 16	68,7	31,3	100,0	0
0,43	16 + 16	100,0	0	100,0	0

Таблица 4

Бактерицидность электроаэрозолей неомицина
по отношению к *E. coli*

Доза неомицина, г/м ³	Общее кол-во тест- объек- тов в опыте	Из них			
		через 60 мин		через 120 мин	
		обезза- ражено, %	не обезза- ражено, %	обезза- ражено, %	не обезза- ражено, %
0,25	24 + 24	25,0	75,0	54,2	45,8
0,31	32 + 32	50,0	50,0	84,4	15,6
0,37	16 + 16	81,3	18,7	100,0	0
0,43	16 + 16	100,0	0	100,0	0

яиц, инфицированных *S. gallinarum*. В случае *E. coli* соответственно 81,3 и 100%. При времени экспозиции 120 мин существенной разницы в бактерицидных действиях аэрозоля и электроаэрозоля при равных дозах неомицина не наблюдается.

Выводы

1. Видимый туман при электроаэрозоле держится в камере 10–15 мин, а при аэрозоле 50–60 мин, что объясняется более быстрым рассеиванием и осаждением частиц электроаэрозоля.

2. При малом времени экспозиции бактерицидное действие электроаэрозоля сильнее, чем соответствующего аэрозоля. За 2 часа действия эффективность дезинфекции электроаэрозодем и аэрозодем практически одинакова.

3. Для дезинфекции инкубационных яиц в камере можно рекомендовать электроаэрозоль или аэрозоль неомицина в дозе 0,4 г/м³ (400000 ЕД/м³). В целях ускорения процесса предпочтительно применять электроаэрозоль.

Литература

1. Ярных В.С. Аэрозоли в ветеринарии. М., Изд-во "Колос", 1972.
2. Чкония Т.Т. Аэрозольный метод дезинфекции при аспергиллезе птиц. "Труды ВНИИВС", 1967, т. 28.
3. Криночкин А.Д., Литвиненко В.В. Аэрозоль йодистого алюминия при инфекционных болезнях птиц. "Ветеринария", 1969, № 3, с. 41–43.
4. Бессарабов Б., Дьяконова Е., Жаворонкова Л., Резвых А. Аэрозоль морфоциклина в первые часы после вывода цыплят. "Птицеводство", 1971, № 1, с. 42–43.

5. Зуев В.Е. Испытание эффективности аэрозолей йодсодержащих препаратов при инфекционном ларинготрахеите птиц. "Труды ВНИИВС", 1971, т. 37.
6. Соколов В.Д., Кошляков Д.А., Малыгин А.И., Аншаков Д.П. Методы профилактики микоплазмоза и колисептицемии цыплят. "Ветеринария", 1972, № 3, с. 56-57.
7. Исаев Ю. Обработка цыплят аэрозолем морфоциклина. "Передовые научно-производственные опыты в птицеводстве". М., 1973, № 4, с. 104.
8. Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю. О применении аэрозолей и электроаэрозолей. "Ветеринария", 1966, № 3, с. 98-99.
9. Закомырдин А.А., Виснапуу Л.Ю. Дезинфекция животноводческих помещений электроаэрозолями химических средств. "Труды ВНИИВС", 1970, т. 36, с. 227-238.
10. Виснапуу Л.Ю. Пневматический распылитель с индуцирующим электродом. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973, с. 209-216.

AEROSOOLIDE KASUTAMISEST INKUBEERITAVATE
MUNADE DESINFITSEERIMISEL

K. Peterson, L. Visnapuu, E. Pärnaste, O. Reivart, M. Nurme

Resüme

Võrdlevalt hinnatakse elektriliselt laetud ja laadimata neomütsiini aerosooli bakteritsiidset toimet *S. gallinarum* ja *E. coli* kultuuridega nakatatud munakoortele. Katsed näitavad, et elektroaerosooli toime on kiirem kui vastava aerosooli toime. Uurimistulemustest järeldatakse, et inkubatsioonikambrisse paigutatud kanamunade täielikuks desinfitseerimiseks on vajalik neomütsiini aerosooli doos 400 000 Tü/m³.

ON THE USE OF AEROSOLS IN DISINFECTING EGGS THAT ARE
BEING INCUBATED

K. Peterson, L. Visnapuu, E. Pärnaste, O. Reivart, M. Nurme

Summary

The article presents a comparative evaluation of the bactericidal action of electrically charged and uncharged neomycin aerosols on egg-shells infected with cultures of *S. gallinarum* and *E. coli*. Experiments have shown that the action of electroaerosols is faster than the action of the corresponding uncharged aerosols. It is concluded from the results of research that a dosis of 400,000 international units of neomycin aerosols per cubic meter are required to completely disinfect hen's eggs placed in an incubator.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЯ,
ПОПОЛНЯЕМОГО ЧАСТИЦАМИ

Э.В. Сула

Определение концентрации аэрозольных частиц в закрытом объеме с учетом коагуляции и осаждения частиц теоретически хорошо изучено [1-5]. Все авторы используют исправленное Гольдманом уравнение Мюллера [6], учитывающее полидисперсность аэрозоля. Экспериментальных работ по этому вопросу меньше и в основном они посвящены "старению" аэрозоля [7, 8].

Большой интерес представляет определение концентрации аэрозоля при работающем источнике аэрозоля в камере. Такая задача возникает при групповой вакцинации или терапии аэрозольным методом для определения дозы аэрозоля, полученной при ингаляции.

Пусть в тесткамере объемом V и высотой h создается с массовым расходом S_0 аэрозоль, частицы которого распределены по логарифмически нормальному закону средним геометрическим радиусом r_g и среднеквадратическим отклонением σ . Тогда число частиц радиусом r , образующихся за единицу времени,

$$S(r) = \frac{3}{4\pi r^3 \rho} \frac{S_0}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp\left(-\frac{\ln^2 r/r_g}{2\ln^2 \sigma}\right), \quad (1)$$

где ρ - плотность вещества частиц.

Запишем интегро-дифференциальное уравнение для концентрации аэрозоля в тесткамере в следующем виде [7]:

$$\frac{\partial n(r,t)}{\partial t} = \int_0^{r/\sqrt{2}} [B(r,R') + G(r,R')] n(r,t) \cdot n(R',t) \frac{r^2}{R'^2} dR' - \\ - n(r,t) \cdot \int_0^\infty n(R,t) [B(r,R) + G(r,R)] dR - n(r,t) \left[\frac{v_s(r)}{h} + \frac{\sigma^2}{V} + \frac{L}{V} \right] + S(r). \quad (2)$$

Здесь B и G - функции тепловой и гравитационной коагуляции:

$$B(R, R') = \frac{2KT}{3\eta} \left\{ \left[\frac{1}{R} \left(1 + \frac{\lambda A}{R} \right) + \frac{1}{R'} \left(1 + \frac{\lambda A}{R'} \right) \right] (R+R') \right\}, \quad (3)$$

где K - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, η - вязкость воздуха, λ - средняя длина пробега молекул воздуха, $A = 0,86$. R и R' - радиусы частиц, образующих при коагуляции частицу радиусом r ;

$$G(R, R') = \frac{2\pi g g}{9\eta} \left| R^2 - R'^2 + A(R-R') \right| (R+R')^2, \quad (4)$$

где g - ускорение свободного падения;
 v_s - стоксовая скорость частиц:

$$v_s = \frac{2r^2 g g}{9\eta} \left(1 + \frac{\lambda A}{r} \right); \quad (5)$$

Ω и L характеризуют выход аэрозоля из тесткамеры за счет взятия пробы и воздуха источника аэрозоля.

При протягивании аэрозоля с объемной скоростью Ω из тесткамеры через фильтр, не пропускающий частиц, масса аэрозольных частиц, осажденных на фильтре за время t , определяется следующей формулой

$$D(t) = 4\pi g \Omega \left[\int_0^t \int_0^\infty n(r, t) r^2 dr dt \right]. \quad (6)$$

Для проверки формулы (6) был проведен эксперимент в тесткамере с аэрозолем дибутылфталата. Аэрозоль поступил в тесткамеру объемом 84000 см^3 и высотой 76 см из генератора Рапапорт-Лассена со спектрометром Тиндала "Сова" при $S_0 = 5,15 \cdot 10^{-6} \text{ г/с}$ и $L = 31,2 \text{ см}^3/\text{с}$.

Параметры распределения σ и r_g входного аэрозоля измерялись методом Кошпера-Лэби [9-10]. Размеры частиц аппроксимированы логарифмически нормальным распределением, причем $\sigma = 1,1$ и $r_g = 0,75 \text{ мкм}$.

Для получения однородного по всему объему аэрозоля, аэрозоль в тесткамере во время опыта перемешивался. Так как

наибольшая линейная скорость была меньше 1,5 м/с, то коагуляцией при перемешивании можно пренебречь [10] .

Количество частиц аэрозоля, осажденных на фильтре, определялось по методу, описанному в работе [11] . Данная методика пригодна при постоянных параметрах распределения. Уравнение (2) решалось на ЭВМ "Минск 32(22)" при помощи СТП "МАЛГОЛ 73". Для использования формулы Ньютона-Котеса спектр частиц разбивался на 150 отрезков длиной 20 нм. Длина отрезка времени была 20 с. Решение уравнения (2) показывает, что в условиях настоящего эксперимента \bar{b} и $\bar{\tau}_g$ не изменяются во времени.

Данные измерений перепада давления $\Delta p = \Delta p(t)$ на фильтре по методу [12] аппроксимированы по методу наименьших квадратов полиномом третьего порядка

$$\Delta p = a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + a_4, \quad (7)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 - постоянные, и по калибровочной кривой $D = A \cdot \Delta p$ (A - постоянная) вычислена масса частиц аэрозоля, задержанных фильтром за время t ,

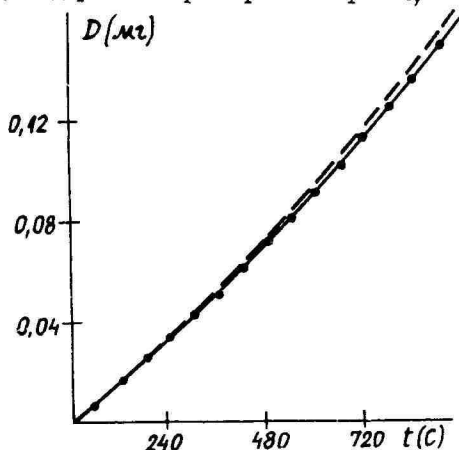


Рис. 1. Изменение массы аэрозоля во времени.
 ————— - опытная кривая
 - - - - - вычисленная по формуле (6)

$$D(t) = A (a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + a_4). \quad (8)$$

Из уравнения (8) дифференцированием можно вычислить массовую концентрацию аэрозоля. Данная методика позволяет непрерывно измерять $D(t)$.

На рис. I приведены данные измерений $D(t)$ в тест-камере и $D_{теор}(t)$, вычисленная на ЭВМ по формуле (6). Из рис. I видно, что уравнение (2) хорошо описывает физические процессы в аэрозоле при заполнении тесткамеры частицами.

Литература

1. Zebel G. "Kolloid Z.", 1958, Bd. 156, Nr.2, 102-107.
2. Zebel G. Aerosol Science. Academic Press, London-New York, 1966, 31-58.
3. Lindauer G.C., Castleman A.W. "J. Aerosol Sci.", 1971, Vol.2, 85-91.
4. Burgmeier J.W., Blifford I.H., Gillette D.A. "Water, Air and Soil Pollution", 1973, Vol.2, No.1, 97-104.
5. Kasahara M., Takahashi K. Techn. Rep. Inst. Atom Energy Kyoto Univ., 1974, No.165.
6. Müller H. "Kolloid Beih.", 1928, Bd. 27, 223.
7. Greenfield M.A., Koontz R.L., Hausknecht D.F. "J. Coll. Int. Sci", 1971, Vol.35, No.1, 102-113.
8. Hauck H. "Staub", 1973, Bd.33, No.8, 313-317.
9. Тамм Э.И., Фишер М.М. Определение размеров и зарядов аэрозольных частиц в пределах радиусов от 0,35 до 1,2 мкм ультрамикроскопическим (траекторным) методом. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып.320, с. 101-109.
10. Фишер М.М., Таммет Х.Ф., Тамм Э.И. Полуавтоматическая проекционно-измерительная установка. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 129-139.
11. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. Изд. АН СССР, М., 1955, с. 303.

12. Сула Э.В., Тамме В.Б. Об определении массовой концентрации аэрозоля измерением перепада давления на фильтре. Наст. сб.

OSAKESTEGA TÄITUVA AEROSOO LI KONTSENTRATSIOONI
MÄÄRAMISEST

E. Sula

Resümee

Artiklis on toodud tulemused aerosooli kontsentratsiooni mõõtmisest testkambris töötava dibutüülftalaadi aerosooli allika korral, mis annab log-normaa lselt jaotunud aerosooli keskmise raadiusega $0,75 \mu\text{m}$ ja ruutkeskmise hälbe-
ga 1,1. Mõõtmistulemused on heas kooskõlas Mülleri võrrandist elektronarvutil arvutatutega.

On näidatud, et antud katsetingimuste korral σ ja r_g on ajas muutumatud.

DETERMINATION OF THE AEROSOL CONCENTRATION
REINFORCED WITH PARTICLES

E. Sula

Summary

The article presents the results of the measurements of dibutylphthalate aerosol concentrations carried out in a testchamber. The aerosol concentrations have been reinforced by particles having a log-normal distribution with $\sigma = 1,1$ and $r_g = 0,75 \mu\text{m}$.

The measurements are in good agreement with calculations from an equation by H. Müller performed by means of a computer. It has been shown that under experimental conditions σ and r_g are constant in time.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЯ
ИЗМЕРЕНИЕМ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА ФИЛЬТРЕ

Э.В. Сула, В.Б. Тамме

Поскольку метод осаждения проб и измерения веса осадка не пригоден для непрерывного измерения массовой концентрации аэрозоля, то можно использовать метод измерения падения давления за фильтром при фильтрации исследуемого аэрозоля [1-3].

Если мы фильтруем аэрозоль (рис. 1) массовой концентрацией C , являющейся постоянной во времени t , то

$$C = \frac{M}{\Omega}, \quad (1)$$

где M - масса осажденного аэрозоля,

Ω - объем воздуха, проходящего через фильтр за время t .

Измеряя перепад давления p на фильтре (при известном C), можно получить калибровочную кривую $M = f(p)$ для данного фильтра.

Вычислим количество воздуха, проходящего через фильтр, если известна эмпирическая зависимость $p = p(t)$.

Известно, что

$$p = kTn \quad (2)$$

где n - число молекул в единице объема,

k - постоянная Больцмана,

T - абсолютная температура.

Измерение концентрации молекул воздуха в объеме между фильтром и насосом описывает дифференциальное уравнение

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{\mathcal{Z}}{V} n(t) + \frac{p}{kTV} \omega(t), \quad (3)$$

где \mathcal{Z} - производительность насоса,

V - объем между фильтром и насосом,

$\omega(t)$ - объемная скорость воздуха через фильтр.

Учитывая (2), из уравнения (3) получим

$$\omega(t) dt = Z dt + \frac{V}{p} dp. \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4), получим

$$\Omega = Zt + V \ln \frac{p}{p_0}, \quad (5)$$

где p_0 - перепад давления при $t=0$.

Для определения соотношения $p = p(t)$ был проведен эксперимент (рис. I).

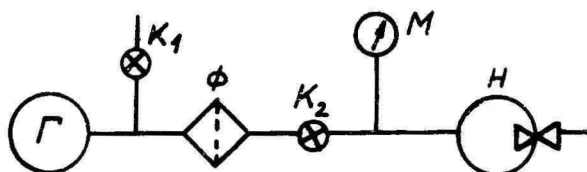


Рис. I. Принципиальная схема опыта.

Г - генератор аэрозоля, Ф - фильтродержатель с фильтром, М - микроманометр, Н - насос, K_1 - кран (открытый во время опыта), K_2 - кран для регулировки объемной скорости через фильтр.

Генератором аэрозоля служил генератор монодисперсного аэрозоля Раппопорт-Лассена со спектрометром Тиндаля "Сова". Устройством для протягивания аэрозоля через фильтр служил насос предварительного вакуума. Давление измерялось микроманометром, объемная скорость воздуха через фильтр - ротаметром PG-02. Применяли целлюлозные фильтры ГДР *Filtrak* № 390 (толщина 0,17 мм, плотность 2,1 мг/см²) и № 91 (толщина 0,15 мм, плотность 2,0 мг/см²). Эффективность фильтрации проверялась нефелометром и составляла 1,0 для использованных частиц.

Для определения массы аэрозоля, осажденного на фильтре, осадок дибутилфталата растворяли в определенном количестве эталона, а концентрация дибутилфталата в эталоне определялась спектрофотометром *Perkin-Elmer* по поглощению на длине волны 276 нм [4].

Данные измерений перепада давления аппроксимированы линейной функцией

$$p = p_0 - at \quad (6)$$

по методу наименьших квадратов на ЭВМ "Минск-32 (22)", при помощи СТП "МАЛГОЛ-73" (рис. 2 и 3).

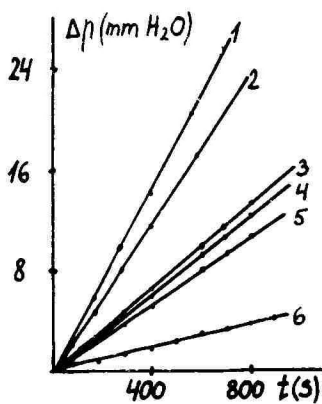
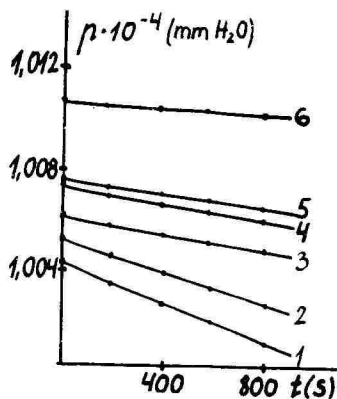


Рис. 2. Изменения Δp во времени.

Кривые 1 - 5 *Filtrak* № 390, 6 - *Filtrak* № 91.
 Кривые 3 - 6: $C = 0,13$ мг/л, $\bar{r} = 0,5$ мкм.
 Кривые 1 - 2: $C = 0,17$ мг/л, $\bar{r} = 0,6$ мкм.

Рис. 3. Изменение падения давления во времени.



Ошибки аппроксимации, определенные при помощи теста Стюдента - Лорда, приведены в табл. Подставляя (6) в (5), получим

$$\Omega = Zt + V \ln \left(1 - \frac{at}{p_0} \right). \quad (7)$$

Конкретный расчет показывает, что второй член является бесконечно маленьким по сравнению с первым ($\frac{at}{p_0} \ll 1$) и

$$\Omega = Zt. \quad (8)$$

Учитывая это, из формулы (1) получим

$$M = \frac{CZ}{a} \Delta p, \quad (9)$$

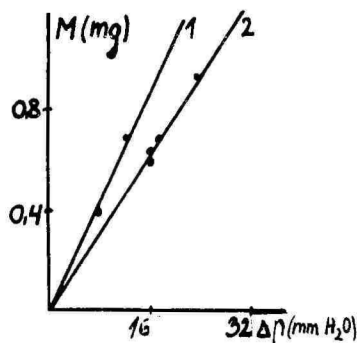
где $\Delta p = p - p_0$.

Из рис. 1 видно, что параметры a и p_0 , определяющие фильтр, зависят от плотности последнего. Для сравнения разных фильтров определим "эталонный фильтр" по параметрам a_3 и p_{03} и калибровочной кривой

$$M = \frac{CZ}{a_3} \Delta p_3. \quad (10)$$

Для иллюстрации на рис. 4 приведены калибровочные кривые эталонных фильтров при двух режимах работы генератора ($\alpha_3 = 0,03$ мм Н₂О/с, $p_{03} = 10058$ мм Н₂О, $Z = 8,3 \cdot 10^{-6}$ м³/с). Кривая 1 получена при $C = 0,17$ мг/л, $\bar{r} = 0,6$ мкм, а кривая 2 при $C = 0,13$ мг/л и $\bar{r} = 0,5$ мкм.

Рис. 4. Калибровочная кривая "эталонного" фильтра. Точки 1 - 6 соответствуют преобразованию опытных фильтров (рис. 2) на "эталонные".



Таблица

Параметры опытных фильтров

№ фильтра	1	2	3	4	5	6
σ_a (%)	3,0	2,7	3,0	2,1	2,4	4,5
σ_{p_0} (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
a (mm H ₂ O/s)	0,016	0,014	0,016	0,048	0,030	0,036
$p_0 \cdot 10^{-4}$ (mm H ₂ O)	10,072	10,084	10,082	10,011	10,065	10,058

По кривой (10) можно найти $M(t)$, если известны параметры опытного фильтра a и p_0 . Для использования кривой (10) проведем мысленный эксперимент: профильтруем аэрозоль опытным и "эталонным" фильтрами. По формуле (6)

$$\Delta p_3 = a_3 t, \quad (11)$$

где

$$a_3 = a + \Delta a \quad (12)$$

и

$$\Delta p = at. \quad (13)$$

Формулы (11 - 13) дают алгоритм для преобразования опытного фильтра в "эталонный".

$$\Delta p_3 = \Delta p + \Delta a \cdot t, \quad (14)$$

откуда следует методика для измерения массовой концентрации. Сначала определяются параметры опытного фильтра a и p_0 при постоянной C , затем его преобразуют по формуле (14) на "эталонный" и этот же фильтр готов для измерения $C(t)$,

где

$$C(t) = \frac{dM(t)}{dQ(t)} \quad (15)$$

или учитывая (8)

$$c(t) = \frac{1}{Z} \frac{dM(t)}{dt} . \quad (16)$$

Настоящая методика исследования удобна для непрерывного измерения массовой концентрации аэрозоля, когда распределение частиц по размерам не изменяется.

Л и т е р а т у р а

1. Ingels M.J. "J. Am. Soc. Heat. and Vent. Eng.", 1923, 29, p. 177-193.
2. Рёкк Е.В. Отопление и вентиляция, Минск, 1934, № 4, с. 20-27.
3. Метод определения весовой концентрации аэрозолей с помощью фильтра АФА-В-18. М., 1961.
4. Gordon R.J. Atm. Environ., 1974, 8, № 2, p.189-191.

AEROSOOLI MASSKONTSENTRATSIOONI MÄÄRAMISEST
RÕHULANGU KAUDU FILTRIL

E.Sula, V.Tamme

Resüme

Artiklis kirjeldatakse masskontsentratsiooni mõõtmis-
metoodikat, mis põhineb ajas muutumatu jaotusfunktsiooniga
aerosooliosakeste filtrile sadestumisel tekitatud rõhulan-
guse mõõtmisel. On toodud algoritm erinevate paberfiltrite
teisendamiseks nn. etaloonfiltriks.

DETERMINATION OF THE AEROSOL MASS CONCENTRATION FROM
MEASUREMENTS OF PRESSURE DROP ON A FILTER

E.Sula and V.Tamme

Summary

The paper carries a description of the aerosol
particle mass concentration measuring methods which are
based on the measurement of the resistance produced by the
deposition of aerosol particles on the filter which are as-
sumed to have a constant distribution function in time. An
algorithm has been presented on the transformation of dif-
ferent paper filters into a reference filter.

ДИНАМИКА ПОМЕЩЕНИЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ИОНОВ *

И.П. Никульча, П.Н. Монтик

Использование искусственно ионизированного воздуха в сельском хозяйстве, пищевой, текстильной и других отраслях промышленности, а также в медицине вызывает необходимость автоматически регулировать ионный состав воздуха в помещениях. В связи с этим возникает задача исследования динамических свойств последних. В данной работе используется аналитический метод решения задачи.

Будем рассматривать помещение, в которое подается приточный ионизированный воздух и удаляется - вытяжной вентиляцией.

При выводе дифференциального уравнения, описывающего динамику ионного состава воздуха в помещении, были приняты следующие допущения, оправданные в инженерных решениях:

- поверхности стен и пола помещения являются проводящими;
- влагосодержание, температура и давление в помещении поддерживаются постоянными, что имеет место в кондиционируемых помещениях;
- концентрация ионов и нейтральных частиц равномерно распределена по объему помещения;
- движение тяжелых ионов и нейтральных частиц подчинено закону Стокса;
- будем считать, что коэффициент униполярности постоянен во времени;
- концентрация тяжелых ионов и нейтральных частиц в приточном воздухе пренебрежимо мала;
- изменением концентрации тяжелых ионов в помещении под действием сил поля электростатического рассеяния, диффузии, коагуляции и инерции пренебрегаем;

* Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова и публикуется в порядке дискуссии.

- коэффициент униполярности тяжелых ионов, выдыхаемых обитателями, принимается равным единице [4] .

На основании закона сохранения количества зарядов для помещения объемом V , в которое подается биполярно ионизированный воздух, можно записать:

для установившегося состояния -

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{пр} \cdot n_{вхр} - Q_{выт} \cdot n_o - V\beta n_o^2 - An_o - M n_o m_o - V\mu n_o N_o = 0; \end{array} \right. \quad (1a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Bm - Q_{выт} N_o - EN_o - M m_o N_o = 0; \end{array} \right. \quad (2a)$$

для неустановившегося состояния -

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{пр} n_{вх} - Q_{выт} n - V\beta n^2 - An - M n m - V\mu n N = V \frac{dn}{dt}; \end{array} \right. \quad (1б)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B \cdot m - Q_{выт} N - EN - M m N = V \frac{dN}{dt}. \end{array} \right. \quad (2б)$$

В уравнениях (1а, 1б, 2а, 2б) приняты следующие обозначения:

- n - концентрация легких отрицательных или положительных ионов в помещении (усредненная по объему помещения);
- $n_{вх}$ - то же в воздухе, подаваемом в помещение (в приточном воздухе);
- N - суммарная концентрация тяжелых ионов и нейтральных частиц в помещении (усредненная по объему помещения);
- m - количество обитателей в помещении;
- $n_o ; n_{вх,о} ; N_o ; m_o$ - установившиеся значения соответствующих величин;
- $Q_{пр}$ - объемный расход приточного воздуха;

$Q_{\text{выт}}$ - объемный расход воздуха, удаляемого из помещения (вытяжной вентиляцией);
 A, B, E, M, β, μ - постоянные коэффициенты.

В уравнениях (1а) и (1б) третьи члены левой части учитывают ион-ионную рекомбинацию и электростатическое рассеяние, четвертые - диффузионное осаждение на поверхностях стен и оборудования, пятые - вдыхание легких ионов обитателями помещения, а шестые - осаждение легких ионов на тяжелых и нейтральных частицах. В уравнении (2а) и (2б) первые члены левой части отражают образование тяжелых ионов и нейтральных частиц в воздухе, выдыхаемом обитателями; четвертые члены - их убывание вследствие вдыхания последними, а третьи - учитывают их гравитационное осаждение.

С целью линеаризации уравнений (1б) и (2б) разложим их нелинейные члены в ряд Тейлора. Тогда, пренебрегая членами разложения с малостями второго и выше порядка, получим:

$$\begin{aligned} n^2 &\approx n_0^2 + 2n_0 \Delta n; \\ nm &= n_0 m_0 + n_0 \Delta m + m_0 \Delta n; \\ Nn &= N_0 n_0 + N_0 \Delta n + n_0 \Delta N; \\ Nm &= N_0 m_0 + N_0 \Delta m + m_0 \Delta N. \end{aligned} \quad (3)$$

После вычитания (1а) из (1б) и (2а) из (2б) с учетом (3), а также равенства $Q_{np} = Q_{\text{выт}} = Q$ получим уравнение в отклонениях:

$$\begin{cases} V \frac{d(\Delta n)}{dt} = Q \Delta n_{\text{вх}} - Q \Delta n - V \beta (2n \Delta n) - A \Delta n - M(m_0 \Delta n + n_0 \Delta m) - \gamma \mu (n_0 \Delta N + N_0 \Delta n), \\ V \frac{d(\Delta N)}{dt} = B \Delta m - Q \Delta N - E \Delta N - M(m_0 \Delta N + N_0 \Delta m), \end{cases} \quad (4)$$

где $n - n_0 = \Delta n$ - малое отклонение n от n_0 ;
 $n_{\text{вх}} - n_{\text{вх},0} = \Delta n_{\text{вх}}$ - " " " $n_{\text{вх}}$ от $n_{\text{вх},0}$;
 $N - N_0 = \Delta N$ - " " " N от N_0 ;
 $m - m_0 = \Delta m$ - " " " m от m_0 .

После некоторых преобразований система (4) примет вид:

$$\begin{cases} V \frac{d(\Delta n)}{dt} + (Q + 2V\beta n_0 + A + Mm_0 + V\mu N_0) \Delta n = \\ = Q \Delta n_{\text{вх}} - V\mu N_0 \Delta N - M n_0 \Delta m; \\ V \frac{d(\Delta N)}{dt} + (Q + E + Mm_0) \Delta N = (B - MN_0) \Delta m. \end{cases} \quad (4a)$$

или

$$\begin{cases} V \frac{d(\Delta n)}{dt} + C_1 \Delta n = Q \Delta n_{\text{вх}} - C_4 \Delta N - C_5 \Delta m; \\ V \frac{d(\Delta N)}{dt} + C_2 \Delta N = C_3 \Delta m. \end{cases} \quad (5)$$

где:

$$C_1 = Q + 2V\beta n_0 + A + Mm_0 + V\mu N_0;$$

$$C_2 = Q + E + Mm_0;$$

$$C_3 = B - MN_0; \quad (6)$$

$$C_4 = V\mu n_0;$$

$$C_5 = M n_0.$$

Определяя из первого уравнения системы (5) ΔN и подставляя его во второе уравнение, после некоторых преобразований получим:

$$\begin{aligned} & \frac{V^2}{C_1 C_2} \frac{d^2(\Delta n)}{dt^2} + \frac{VC_1 + VC_2}{C_1 \cdot C_2} \cdot \frac{d(\Delta n)}{dt} + \Delta n = \\ & = \frac{QV}{C_1 C_2} \cdot \frac{d(\Delta n_{\text{вх}})}{dt} + \frac{Q}{C_1} \Delta n_{\text{вх}} - \frac{VC_5}{C_1 C_2} \frac{d(\Delta m)}{dt} - \frac{C_2 C_5 + C_3 C_4}{C_1 C_2} \Delta m. \end{aligned} \quad (7)$$

Введем некоторые обозначения и перепишем уравнение (7) в таком виде:

$$\begin{aligned} & T_1 T_2 \frac{d^2(\Delta n)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d(\Delta n)}{dt} + \Delta n = \\ & = T_3 \frac{d(\Delta n_{\text{вх}})}{dt} + K_3 \Delta n_{\text{вх}} - \left(T_4 \frac{d(\Delta m)}{dt} + K_4 \Delta m \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{V}{C_1} = \frac{V}{Q + 2V\beta n_0 + Mm_0 + V\mu N_0 + A} ; \\
 T_2 &= \frac{V}{C_2} = \frac{V}{Q + E + Mm_0} ; \\
 T_3 &= \frac{V}{C_2} = \frac{QV}{(Q + 2V\beta n_0 + Mm_0 + A + V\mu N_0)(Q + E + Mm_0)} ; \\
 T_4 &= \frac{VC_2}{C_1 C_2} = \frac{VMn_0}{(Q + 2V\beta n_0 + Mm_0 + A + V\mu N_0)(Q + E + Mm_0)} ; \\
 K_4' &= \frac{C_2 C_5 + C_3 C_4}{C_1 C_2} = \frac{(Q + E + Mm_0)Mn_0 + (B - MN_0)V\mu n_0}{(Q + 2V\beta n_0 + Mm_0 + A + V\mu N_0)(Q + E + Mm_0)} ; \\
 K_3' &= \frac{Q}{C_1} = \frac{Q}{Q + 2V\beta n_0 + A + Mm_0 + V\mu N_0} .
 \end{aligned} \tag{9}$$

Для перехода к относительным величинам введем следующие обозначения:

$$\frac{\Delta n}{n_0} = \bar{n} ; \quad \frac{\Delta n_{\theta x}}{n_0} = \bar{n}_{\theta x} ; \quad \frac{\Delta m}{m_0} = \bar{m} . \tag{10}$$

Тогда уравнение (8) с учетом (10) примет вид:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \bar{n}}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\bar{n}}{dt} + \bar{n} = T_3 \frac{d\bar{n}_{\theta x}}{dt} + K_3 \bar{n}_{\theta x} - (T_4 \frac{d\bar{m}}{dt} + K_4 \bar{m}) , \tag{11}$$

$$\text{где } T_3 = T_3' \frac{n_0}{n_0} = T_3' ;$$

$$K_3 = K_3' \frac{n_0}{n_0} = K_3' ; \tag{12}$$

$$T_4 = T_4' \frac{m_0}{n_0} ;$$

$$K_4 = K_4' \frac{m_0}{n_0} .$$

Перепишем уравнение (II) в операторной форме, для чего сделаем замену $\frac{d}{dt} = p$ при нулевых начальных условиях:

$$[T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1]n = (T_3 p + K_3)\bar{n}_{вк} - (T_4 p + K_4)\bar{m}. \quad (I3)$$

Образует передаточную функцию помещения по каналу управления

$$W_1(p) = \frac{\bar{n}}{\bar{n}_{вк}} = \frac{T_3 p + K_3}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1} = \frac{T_3 p + K_3}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}. \quad (I4)$$

Или с учетом (9) и (I2)

$$W_1(p) = \frac{\frac{n_{вк0}}{n_0} \left[\frac{qV}{C_1 C_2} p + \frac{q}{C_1} \right]}{\left(\frac{V}{C_1} p + 1 \right) \left(\frac{V}{C_2} p + 1 \right)} = \frac{\frac{n_{вк0} q}{n_0} \left(\frac{V}{C_2} p + 1 \right)}{\left(\frac{V}{C_1} p + 1 \right) \left(\frac{V}{C_2} p + 1 \right)} = \frac{K_3}{T_1 p + 1}. \quad (I5)$$

Следовательно, помещение как объект автоматического управления концентрацией легких ионов по каналу изменения входной концентрации является аperiodическим звеном первого порядка.

Образует передаточную функцию помещения по каналу возмущения:

$$W_2(p) = \frac{\bar{m}}{\bar{n}} = \frac{T_4 p + K_4}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1} = \frac{T_4 p + K_4}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (I6)$$

откуда видно, что по этому каналу помещение является звеном второго порядка с форсированием.

Перейдем к определению β , μ , A , B , E , M , вошедших в коэффициенты уравнения (II).

Слагаемое уравнение (4), содержащее β , учитывает ион-ионную рекомбинацию и электростатическое рассеяние. Согласно [2, 5] для легких отрицательных ионов:

$$\beta^{(-)} = \alpha \varphi + \frac{qk}{\epsilon_0} \left(1 - \frac{1}{\varphi} \right); \quad (I7)$$

для легких положительных ионов:

$$\beta^{(+)} = \frac{\alpha}{\beta} + \frac{qk}{\epsilon_0} \left(1 - \frac{1}{\varphi} \right), \quad (I7)$$

где α - коэффициент рекомбинации,
 φ - коэффициент униполярности легких ионов,
 q - заряд легкого иона, равный одному элементарному заряду [3],
 k - подвижность легких ионов.

$$\begin{aligned} \alpha &= 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}; \quad q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \quad k = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с}); \\ \beta^{(-)} &= 1,6 \cdot 10^{-12} + 4 \cdot 3,14 [1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} (1 - \varphi)] = \\ &= [1,6 \cdot 10^{-12} \varphi + 10,04 \cdot 10^{-23} (1 - \varphi)] \text{ м}^3/\text{с}; \\ \beta^{(+)} &= 1,6 \cdot 10^{-12} / \varphi + 10,04 \cdot 10^{-23} (1 - 1/\varphi) \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned} \quad (18)$$

Член уравнения (4), содержащий μ , учитывает воссоединение легких ионов с тяжелыми противоположного знака и прилипание первых к нейтральным частицам. Согласно [5, 6]

$$\mu = \frac{2\theta\xi}{2\xi + \theta}, \quad (19)$$

где θ - коэффициент воссоединения легких ионов с тяжелыми противоположного знака,
 ξ - коэффициент прилипания легких ионов к нейтральным частицам.

$$\theta = 9,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}; \quad \xi = 7,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Следовательно, $\mu = 5,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$. (20)

Коэффициент A , входящий в член уравнения (4), который учитывает диффузионное осаждение, согласно [3] определяется выражением

$$A = 0,664 S \left(\frac{D}{\nu}\right)^{2/3} \sqrt{\frac{\nu \omega}{h}}, \quad (21)$$

где D - коэффициент молекулярной диффузии,
 S - поверхность осаждения,
 ω - средняя скорость движения воздуха в помещении,
 ν - кинематическая вязкость воздуха,
 h - размер стенки в направлении движения воздуха.

Выражение (21) записано при следующих предположениях:

- осаждение ионов, радиус которых $r \ll 10^{-7}$ м, при перемешивании воздуха (принудительном и конвекционном) происходит, в основном, на боковых стенах помещения [2];

- осаждение обусловлено действием тепловой диффузии в пристенном ламинарном слое (по Прандтлю-Тейлору), а вне этого слоя искусственное перемешивание и конвективная диффузия постоянно выравнивает концентрацию ионов в объеме помещения.

Если $D = 1,29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, тогда

$$A = 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{\omega/h} \text{ м}^3/\text{с}. \quad (22)$$

Образование тяжелых ионов и нейтральных частиц в выдыхаемом обитателями воздухе учитывается коэффициентом В, который может быть определен по такому выражению:

$$B = \frac{a}{60} \cdot b, \quad (23)$$

где a - количество выдыхов одного обитателя в мин, b - количество тяжелых ионов и нейтральных частиц, образующихся при одном выдохе.

В частном случае, когда обитателями являются люди [4], $a = 16 \text{ мин}^{-1}$, $b = 1,5 \cdot 10^8$ положительных тяжелых ионов + $0,5 \cdot 10^8$ нейтральных частиц.

Следовательно, $B = 5,3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. (24)

Коэффициент М равен объему воздуха, вдыхаемого одним обитателем в течение 1 с, и определяется выражением:

$$M = \frac{a}{60} \cdot U, \quad (25)$$

где U - объем воздуха на один вдох и согласно [4] $U = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Следовательно,

$$M = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}. \quad (26)$$

Коэффициент Е входит в слагаемое выражения (3), учитывающее гравитационное осаждение тяжелых ионов и нейтральных частиц. Согласно [2]

$$E = v_g S_r = \frac{2gt^2 r^2}{9\eta} S_r, \quad (27)$$

где v_g - скорость осаждения под действием гравитационных сил,

g - ускорение силы тяжести,

γ - плотность частицы радиуса,

η - динамическая вязкость воздуха,

S_r - суммарная площадь горизонтальных поверхностей.

Для нормальных условий и $r = 5 \cdot 10^{-7}$ м

$$E = 5 \cdot 10^{-10} \cdot S_r. \quad (28)$$

Определим значения T_1 ; T_2 ; T_3 ; T_4 ; K_3 и K_4 при следующих исходных данных:

$$\varphi = 0,5; \quad S_r = 25 \text{ м}^2; \quad V = (5 \cdot 5 \cdot 2,8) = 70 \text{ м}^3;$$

$$Q = 19,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}; \quad \omega = 0,2 \text{ м}/\text{с}; \quad S = 56 \text{ м}^2;$$

$$n_0 = 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}; \quad m_0 = 10 \text{ человек}; \quad N_0 = 2,7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}.$$

Из выражений (9), (12), с учетом (18), (20), (22), (24), (26), (28), получим:

$$T_1 = 47,46 \text{ с}; \quad T_2 = 375 \text{ с};$$

$$T_3 = 47,46 \text{ с}; \quad K_3 = 0,126;$$

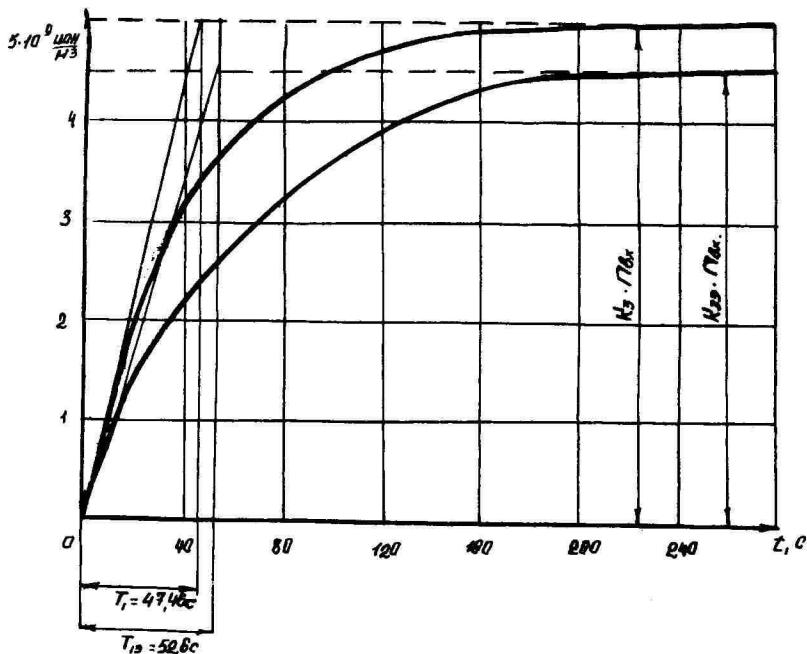
$$T_4 = 0,32 \text{ с}; \quad K_4 = 0,58.$$

Тогда передаточные функции (15) и (16) можно записать в виде:

$$W_1(p) = \frac{0,126}{47,46p + 1};$$

$$W_2(p) = \frac{0,32p + 0,58}{(47,46p + 1)(375p + 1)}. \quad (29)$$

Откуда видно, что канал управления является менее инерционным по сравнению с каналом возмущения, но коэффициент усиления по первому каналу меньший, чем по второму.



На рисунке приведены теоретическая и экспериментальная переходные характеристики по каналу управления.

Определим по экспериментальной кривой постоянную времени $T_{\text{э}}$, коэффициент усиления $K_{\text{э}}$ и вычислим погрешности

$$\Delta T = \frac{T_{\text{э}} - T_{\text{I}}}{T_{\text{э}}} \cdot 100\% = 9,7\%;$$

$$\Delta K = \frac{K_{3\text{э}} - K_3}{K_{3\text{э}}} \cdot 100\% = 11\%.$$

Следовательно, расхождение между теоретической и экспериментальной характеристиками не превышает 11%.

Выводы

1. Помещения с искусственно ионизированным воздухом, подаваемым принудительно, как объект автоматического управления концентрацией ионов обладает инертностью, о характере которой можно судить по выражениям (13) или (15) и (16). Постоянные времени и коэффициенты усиления определяются выражениями (9), (12), (18), (20), (22), (24), (26), (28).

2. Полученная в работе математическая модель динамики помещения по концентрации ионов описывает объект с достаточной для инженерных целей точностью (расхождение не превышает 11%).

3. Выведенное уравнение динамики помещения может быть использовано при синтезе системы автоматического управления концентрации ионов.

Литература

1. Чермак И., Петерка В., Заборка И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии. М., 1972.
2. Фукс Н.А. Механика аэрозольей. М., 1955.
3. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М., 1959.
4. Чижевский А.П. Аэроионификация в народном хозяйстве. М., 1960.
5. Наремский Н.К., Никульча И.П., Монтик П.Н., Тарнорукский Р.Б. Транспортные потери легких ионов в воздуховодах. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, Тарту, 1973, с. 265-275.

**RUUMI KUI IOONIDE KONTSENTRATSIOONI AUTOMAAT-
REGULEERIMISE OBJEKTI DÜNAAMIKA**

I. Nikultsa, P. Montik

Resüme

Matemaatiliselt on kirjeldatud ruumi kui ioonide kontsentratsiooni automaatregeerimise objekti dünaamikat. On lahendatud diferentsiaalvõrrand, mis arvestab teatud õhuvahtuse kordsusega ruumi ioonkoostise muutumist elektrostaatiliste, gravitatsiooniliste, difusioonsete jõudude, rekombinatsiooniliste efektide ja asukate poolt ioonide eraldamise ning neelamise arvel. On saadud automaatregeerimise ja mõjutuste kanalite ülekandefunktsioonid ruumile.

THE DYNAMICS OF A CLOSED ROOM AS AN OBJECT OF AUTOMATICALLY CONTROLLING ION DENSITY IN IT

I.V. Nikulcha and P.N. Montik

Summary

The article deals with the mathematical description of the dynamics of a closed room as an object of automatically controlling the density of ions in the room.

The differential equation obtained takes into account a change in the ion composition of the room with a specific frequency of air exchange due to the action of electrostatic, gravitational and diffusion forces, recombinational effects, inhalation and exhalation of ions by inhabitants.

The transfer functions have been obtained for a closed room along the control and disturbance channels.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

А.М. Илюкович

За последние 5-10 лет резко увеличилось количество находящейся в эксплуатации электрометрической аппаратуры. Серийно выпускаются электрометры ВК2-16, электрометрические усилители У1-6 и У1-7, тераомметры ЕК6-7 и ЕК6-11 и т.п. Много приборов такого рода закуплено в ГДР, Венгрии, Японии.

Исполнение электрометрических приборов в целом практически не отличается от общепринятого для обычных радиотехнических или электроизмерительных приборов и это нередко служит причиной того, что при эксплуатации не учитывается специфика электрометрической аппаратуры. Инструкции же по эксплуатации к конкретным приборам, как правило, не содержат достаточных разъяснений на этот счет. В результате возможности аппаратуры нередко используются далеко не полностью.

В данной статье сформулированы некоторые общие правила обращения с электрометрической аппаратурой. Отличительной особенностью такого рода аппаратуры является очень малый уровень сигналов в высокоомных цепях. С ее помощью измеряются малые постоянные и медленно меняющиеся напряжения в высокоомных цепях, малые токи, малые заряды и большие сопротивления. Наиболее качественные электрометрические приборы имеют порог чувствительности по напряжению около 10 мкВ , по току 10^{-17} А , по заряду 10^{-16} Кл , по сопротивлению 10^{18} Ом . В связи с этим свести мешающие влияния до уровня, меньшего порога чувствительности, не просто.

Особое внимание при хранении и эксплуатации электрометрической аппаратуры должно обращать на состояние входных изоляторов. Поскольку к другим высокоомным элементам

входных цепей электрометров обычно доступа нет, они меньше подвержены нежелательным влияниям. Входной же изолятор легко загрязняется и запыляется, на нем может образоваться влага. Как правило, это приводит к резкому снижению сопротивления входных изоляторов и тем самым нарушается правильность функционирования прибора. Однако наиболее неприятным следствием загрязнения и увлажнения изоляторов является увеличение паразитного тока изоляторов. Паразитный ток свойствен всем изоляторам. Причина его образования в стекании зарядов, накопленных на поверхности и в объеме изолятора, на изолируемую проводящую цепь. Эти заряды могут образовываться в результате трения, пьезоэффекта, электрохимических явлений и т.п. Паразитный ток зависит от материала и конструкции изолятора, его объема, состояния поверхности, влажности, окружающей температуры и пр. В лучшем случае он лежит на уровне $(2-5) \cdot 10^{-17}$ А. При загрязнении и увлажнении паразитный ток может увеличиваться на 1-2 порядка.

Во избежание этого не следует касаться изоляторов руками, нельзя производить вблизи входных разъемов пайку оловом, у неработающего прибора для предупреждения запыления разъем должен быть обязательно закрыт защитным колпачком. Если же загрязнения изолятора избежать не удалось, необходимо прочистить или даже промыть его. Процесс промывки электрометрических изоляторов требует известной осторожности. Неправильная промывка может привести к результату, обратному желаемому, т.е. к уменьшению сопротивления утечки и увеличению паразитного тока. Например, если в чистый спирт, который чаще всего рекомендуется для промывки, попали примеси. После испарения спирта примеси образуют на поверхности изолятора пленку, что и вызывает нежелательные и достаточно стойкие эффекты.

Если входной блок электрометра выполнен негерметичным, то влага и пыль могут оказаться не только на входном, но и на других изоляторах. Иногда для предупреждения влагообразования во входной блок вводят влагопоглотитель, который нуждается в систематическом обновлении. Эффективный способ

удаления накопившейся влаги - выдержка входного блока в вакуумном сушильном шкафу. При этом температура не должна превышать допустимую для прибора, иначе могут произойти необратимые изменения свойств прибора. Например, изменение сопротивлений высокоомных резисторов (в частности, типа КВМ). Кроме того, в приборах применяются изоляционные материалы, не выдерживающие сколь-либо высоких температур, типа полистирола.

Перед использованием электрометрической аппаратуры, особенно если она до этого долгое время не включалась, желательно хотя бы ориентировочно определить состояние, в котором она находится. В связи с тем, что именно неправильное хранение или эксплуатация электрометрического прибора чаще всего приводят к изменению характеристик входных элементов, прежде всего следует определить дрейф нуля, паразитный ток и входное сопротивление прибора.

Дрейф в режиме измерения напряжения и в режиме измерения тока определяется с помощью самописца, при этом можно оценить и флуктуации выходного прибора. Паразитный ток проще всего обнаруживается по разнице показаний в режиме измерения тока при закороченном измерительном резисторе и при включенном, которая равна падению напряжения на измерительном резисторе, вызванному паразитным током. В процессе этих же измерений можно оценить и еще одну характеристику прибора, - заряд, генерируемый при коммутации в высокоомных цепях прибора. Он пропорционален изменению показаний выходного прибора сразу же после момента коммутации. При большом генерированном заряде некоторое время после коммутации измерения производить нельзя, кроме того следствием генерации заряда нередко является большой паразитный ток даже после того, как закончится экспоненциальный процесс стекания заряда.

При проверке сопротивления изоляции не следует пользоваться стандартными тераомметрами, потому что они, как правило, имеют большие испытательные напряжения - от 100 В и выше, причем можно повредить входные элементы аппаратуры,

например, полевой транзистор с изолированным затвором. В лучшем случае после такой проверки входные изоляторы окажутся сильно поляризованными и будут иметь повышенный паразитный ток в течение длительного времени. Возможно также осаждение пыли на изоляторы под влиянием высокой напряженности поля. К тому же сопротивление изоляции может зависеть от приложенного напряжения и измерения при больших напряжениях могут быть не показательны.

Наиболее простой способ оценки сопротивления изоляции входной цепи таков: сначала электрометром измеряется напряжение от низкоомного источника (например, от сухой батареи), а затем от того же источника, но при подключении его через резистор с сопротивлением 10^{10} – 10^{12} Ом. Разница в показаниях прибора дает возможность судить о его входном сопротивлении. При этом, конечно, ток через резистор от источника должен быть значительно больше собственного паразитного тока электрометра, иначе можно сделать неверные заключения.

При использовании электрометрической аппаратуры особое внимание следует обращать на качество исполнения контролируемого объекта. Нередко забывают, что объект может быть не только источником сигнала, который необходимо определить, но и источником помех, которые могут помешать измерениям или даже сделать их невозможными. Например, при определении удельных сопротивлений изоляционных материалов сам образец и изоляторы используемых при измерениях электродов являются источниками паразитных токов. При неблагоприятном стечении обстоятельств эти токи могут быть значительными. Определять на их фоне существенно меньшие токи проводимости через образец дело мало перспективное. Случаи, когда ограничения по чувствительности ставятся не измерительной аппаратурой, а состоянием контролируемого объекта, могут иметь место, конечно, не только при измерении сопротивлений, но и при всех других видах измерений в электрометрическом диапазоне. Поэтому предполагаемые источники собственных помех в объекте измерения должны подвергаться тща-

тельному изучению и контролю. В частности, выходные изоляторы контролируемого объекта (ионизационной камеры, аспирационного счетчика ионов, ячейки для измерения удельных сопротивлений и т.п.) должны подлежать такому же скрупулезному исполнению и проверке на сопротивление утечки и паразитные токи, как и входные изоляторы электрометрической аппаратуры.

С этих же позиций следует подходить и к сочленению контролируемого объекта с электрометрической аппаратурой. Узел сочленения чаще всего бывает источником различного рода помех. Объясняется это тем, что объект измерений и измеритель обычно представляют собой стандартные, серийно выпускаемые блоки, а узел сочленения почти всегда изготавливается экспериментатором самостоятельно. К тому же входные разъемы электрометрической аппаратуры не стандартизованы и каждый завод-изготовитель применяет те конструкции входных разъемов, которые ему кажутся наиболее целесообразными. Тем самым исключается определенность в исполнении соединительных узлов и, тем самым, увеличивается вероятность неправильных решений.

Наиболее часто ошибки при исполнении соединительных узлов происходят из широко распространенного неверного представления о том, что единственным условием нормального функционирования электрометрической аппаратуры является высокое сопротивление изоляции. Исходя из этого, например, выполняют изоляторы из фторопласта, а объем изолятора делают для надежности большим. Однако фторопласт имеет повышенную склонность к генерации паразитных токов и их уровень примерно пропорционален объему изолятора. Это искажает результаты не только при измерениях токов, но и при измерениях напряжений, зарядов, сопротивлений.

Наиболее общим признаком правильности исполнения соединительного узла является, пожалуй, его простота. Объем и количество изоляторов должны быть минимально необходимыми. Если возможно, лучше всего обойтись без дополнительных изоляторов, используя изоляторы прибора и контролируе-

мого объекта. Правило "лучшая изоляция - это отсутствие изоляции" здесь полностью применимо. Если изоляторы исключить из конструкции не удастся, то к выбору материала изолятора надо подходить с известной осторожностью. Наиболее проверенным на практике материалом является янтарь. При небольшом объеме и хорошо отполированных поверхностях он имеет паразитные токи порядка $(2-5) \cdot 10^{-17}$ А. При измерениях с предельно возможной чувствительностью за рубежом используется сапфир.

Нежелательно иметь в соединительном узле какие-либо, особенно самоделные, коммутирующие устройства, потому что они неизбежно вносят дополнительные изоляторы. Кроме того, при неспециализированном исполнении трудно избежать больших генерируемых зарядов при коммутациях. Обычно не дает хороших результатов и применение серийных коммутационных элементов, например магнитоуправляемых контактов или обычных реле с заменой изоляции между контактами. Правильней всего для этих целей использовать специализированные электрометрические реле РВ-2, РВ-3, РВ-4.

Желательно, чтобы соединительный узел был по возможности жестким и надежным, а его изоляторы не несли каких-либо механических нагрузок. Естественно, что высокоомное соединение объекта и прибора должно быть хорошо экранировано, а экран соединен с корпусами объекта и прибора. При некачественном экранировании неизбежны электростатические наводки, наиболее опасные ввиду высокоомности измерительных цепей.

При очень чувствительных измерениях следует позаботиться о том, чтобы воздушные объемы внутри экранов были не очень большими. В противном случае радиоактивная загрязненность воздуха и материалов может создавать паразитные токи, соизмеримые с сигналами. Радиоактивность воздуха составляет около 30 α -частиц в час на каждые 100 см³, каждая из α -частиц создает при ионизации воздуха заряд порядка $2 \cdot 10^{-14}$ Кл. Помехи этого типа носят импульсный характер. Если предельная чувствительность не требуется, может оказаться достаточным использовать один экранирующий ящик для

всех элементов измерительной цепи, включая объект, измеритель и соединение между ними.

Кроме электростатических наводок случаются и другие. Например, бывает, что электрометр реагирует на включение близлежащего паяльника. В причинах подобного рода наводок разобраться не всегда просто. Возможны влияния по питающей сети, возможны магнитные наводки. Магнитные импульсные наводки (от паяльника) случаются, если в измерительной установке имеются замкнутые контуры, пусть даже в невысокоомных цепях. Эдс, наводимые импульсными магнитными полями в этих контурах, приводят к возникновению помех во входных цепях электрометрической аппаратуры. Причиной, в частности, может быть питание узлов установки от различных розеток сети переменного тока.

Причины помех, конечно, должны изучаться и устраняться, так как попытка измерения малых сигналов в присутствии сильных помех редко приводит к сколь-либо надежным результатам. Обычно влияния по питающей сети и импульсные магнитные наводки устраняются при использовании электрометра с автономным питанием.

Специфические вопросы возникают, если объект и измеритель не могут соединяться непосредственно и приходится использовать кабель. Например, при обследовании с помощью пьезодатчиков космических ракет расстояние от объекта до пульта с измерительной аппаратурой может составлять сотни метров. Аналогичные ситуации возникают и при измерении токов ионизационных камер, в частности установленных на ядерных реакторах. Соединительный кабель должен иметь хорошую изоляцию, например, из полиэтилена, полистирола, фторопласта. Этому требованию удовлетворяют радиочастотные коаксиальные кабели, однако они имеют высокий уровень собственных помех. Паразитные токи таких кабелей составляют до 10^{-15} А и выше, им свойственны низкочастотные шумы и особенно вибрационные шумы. Поэтому кабель должен быть по возможности коротким и жестко закреплен. Меньший уровень собственных помех, в том числе и меньшие паразитные токи, имеют специальные антивибрационные кабели.

Приступая к измерениям с помощью электрометрической аппаратуры, также необходимо учитывать ряд обстоятельств. Первое из них сводится к тому, что любое электрическое или механическое воздействие на электрометрические элементы измерительной установки (в основном на изоляторы) может вызвать длительное последствие. Например, сразу же после соединения объекта с прибором, когда неизбежны какие-то механические нагрузки и наводки на изоляторы, паразитный ток будет, как правило, большим и достигнет установившегося значения лишь после определенной выдержки системы в стабильном состоянии. Та же картина наблюдается после поляризации изоляторов при электрической перегрузке. Уровень этих последствий и скорость их затухания не одинаковы для различных типов приборов, так как зависят от материала изоляторов, их конструкции, входных элементов и т.п. Например, своеобразным эффектом памяти обладают электрометрические лампы, после перегрузки они длительное время имеют повышенный дрейф и увеличенный сеточный ток. В лучшем случае последствия могут проходить за минуты — десятки минут, в худшем — время восстановления может доходить до суток.

Второе обстоятельство заключается в том, что большинство электрометрических приборов в первое время после подключения электропитания имеет повышенный дрейф по напряжению и по току. В этом можно убедиться, если просмотреть кривые записи дрейфа электрометров с динамическим конденсатором или на электрометрической лампе. Обычно через 1-2 часа после включения наступает режим, который можно назвать установившимся.

Из сказанного вытекает основное правило проведения измерений с помощью электрометрической аппаратуры — неторопливость. Всегда желательно стремиться к тому, чтобы вся совокупность условий измерений установилась достаточно неизменной во всяком случае за несколько часов до начала измерений. Заметим, что электрометрическая аппаратура может быть чувствительна к изменениям окружающей температуры. Иногда по записи дрейфа электрометрического измерителя можно

определить момент, когда в помещении открыли форточку. Поэтому неизменность, стабильность условий является лучшей гарантией правильности измерений.

Подчеркнем, что соблюдение всех рассмотренных выше правил особенно важно, когда при измерениях стремятся получить предельно высокую чувствительность, т.е. когда токи измерительных цепей лежат на уровне 10^{-17} – 10^{-16} А. Если токи составляют 10^{-15} – 10^{-14} А, то задача упрощается, а при токах 10^{-13} – 10^{-12} А специальных мер, кроме защиты от электростатических помех, может и совсем не потребоваться.

И еще одно замечание. Как бы тщательно ни готовился эксперимент, лишь в том случае можно получить хорошие результаты, если электрометр имеет достаточно высокие характеристики. Поэтому в процессе эксперимента необходимо уделять внимание выяснению свойств самого прибора. При этом нужно иметь в виду, что бывают случаи, когда при нормировании характеристик слишком большой акцент делается на вопросы рекламы в ущерб существу дела. Например, иногда наиболее чувствительные пределы измерения выбираются соизмеримыми с уровнем дрейфа и не учитывается влияние наводок, микрофонный эффект; нормирование свойств производится для идеальных условий и т.п. Такие случаи единичны, но к сожалению еще встречаются. Не следует впадать и в другую крайность, когда неудача плохо поставленного эксперимента целиком относится за счет измерительной аппаратуры.

В заключение следует вкратце остановиться на проверке электрометрической аппаратуры. Наиболее просто этот вопрос решается для электрометрических измерителей напряжений и зарядов. Электрометрические измерители напряжений поверяются с помощью тех же средств, что и обычные, неэлектрометрические измерители. Внутреннее сопротивление источника сигнала может быть имитировано с помощью высокоомного резистора. При этом достаточно убедиться в работоспособности измерителя на различных шкалах при включении его с высокоомным источником напряжения, а после этого произвести проверку во всех требуемых точках от низкоомного источника.

Для поверки электрометрических измерителей зарядов используют калиброванные источники зарядов, представляющие собой сочетание источника известного постоянного напряжения и высококачественного конденсатора с известной емкостью. Поверка измерителей напряжений и измерителей зарядов может быть организована без большого труда, так как не требует специальных средств.

Сложнее обстоит дело с поверкой измерителей малых токов и измерителей больших сопротивлений. Поверка измерителей токов предполагает использование калиброванных источников малых токов. Пока такими средствами располагают лишь центральные метрологические институты: ВНИИМ и ВНИИФТРИ. Еще более сложную научно-техническую задачу представляет собой поверка измерителей больших сопротивлений. Пока что эта задача не решена полностью даже в научно-техническом плане, работы в этом направлении ведутся в ряде организаций, в том числе и во ВНИИФТРИ.

Литература

1. Грибанов Ю.И. Измерение слабых токов, зарядов и больших сопротивлений. М.-Л., 1962, 80 с.
2. Сб. "Исследования в области электрометрии. Труды ВНИИФТРИ, М., 1970, вып. I (3I). Часть I, 212 с.; часть 2, 174 с.
3. Илюкович А.М. Измерение больших сопротивлений. М., 1971, 128 с.
4. Илюкович А.М. Электрометрия. Состояние и тенденции развития. Сб. "Метрология и измерительная техника", т. 2. М., ВИНТИ, 1972 (Итоги науки и техники), с. 147-188.
5. Сб. "Методы и аппаратура для измерений сверхмалых сигналов постоянного тока в высокоомных цепях". Труды ВНИИФТРИ, серия "Электрометрия". М., 1973, вып. 10 (40), 200 с.

6. Александров В.С., Прянишников В.А. Электронные гальванометры постоянного тока. Л., 1974, 168 с.
7. Илюкович А.М., Всеволожский Л.А. Измерительные усилители малых токов с логарифмической характеристикой. М., 1974, 104 с.
8. Илюкович А.М. Основы электротриии. М, 1975 (в печати).

ELEKTROMEETRILISE APARATUURI EKSPLUATATSIOONI
ISEÄRASUSI

A.M. Iljukovitš

Resümees

On esitatud üldised nõuded ja reeglid töötamiseks elektromeetrilise aparatuuriga. Käsitamist leiavad sisendisolaatorite hooldamise, mõõteseadme ja objekti omavahelise ühendamise, ekraneerimise jm. küsimused. Antakse üldisi juhtnõore ka elektromeetrilise aparatuuri tööks ettevalmistamise ja kontrollimise kohta.

PECULIARITIES OF THE EXPLOITATION OF ELECTROMETRIC
EQUIPMENT

A.M. Ilyukovich

Summary

The article presents general requirements and rules on how to work with electrometric equipment. It deals with the maintenance of input insulators, the establishment of connection between the measuring instrument and the object, the problem of shielding, etc. General instructions are given on the preparation of equipment for operation and on checking it.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ
МНОГОКАНАЛЬНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМЕТРА

Х.Ф. Таммет

I. Введение.

Динамический электрометр состоит из электрометрического усилителя, принцип действия которого основан на методе электростатической модуляции сигнала, и показывающего, регистрирующего или исполняющего прибора. Объектом нашего исследования будет только электрометрический усилитель. Поэтому ниже, ради краткости, под термином "электрометр" и понимается электрометрический усилитель.

Многоканальный электрометр имеет несколько входных и столько же выходных клемм. По назначению своему он должен заменить несколько обычных одноканальных электрометров. Если бы стоимость и габариты не были препятствием, то аппаратура, содержащая десятки и сотни электрометрических каналов, нашла бы, очевидно, обширное применение. Приведем некоторые примеры соответствующих устройств:

- установки для изучения электрических полей в плохо проводящей среде,
- емкостные запоминающие устройства и интеграторы с многоминутным и многочасовым циклом,
- аналоговые вычислители и функциональные генераторы с многоминутным и многочасовым циклом,
- масс-спектрометры и спектрометры подвижностей аэроионов.

Если многоканальный электрометр составлен путем механического объединения нескольких одноканальных электрометров, то его математическое описание тривиально. Специфические проблемы возникают тогда, когда электрометр со-

держит общие для всех каналов узлы, почему он и не может рассматриваться как простая совокупность независимых друг от друга одноканальных электрометров. Наиболее интересное техническое решение — многоканальный электрометр с общим промежуточным усилителем, в котором каналы разделены по времени или частоте. Совмещение тракта основного усиления призвано обеспечить снижение стоимости и уменьшение габаритов аппаратуры на один усилительный канал. Успех на этом пути зависит от того, насколько удастся упростить индивидуальные входные и выходные блоки каждого канала при условии сохранения параметров электрометра. Узловой проблемой будет выбор способа модуляции и демодуляции совокупности сигналов. Здесь трудно обойтись без метода теоретического расчета характеристик многоканального электрометра.

Настоящее исследование исходит из задачи построения простейшей математической модели многоканального электрометра, способной описать зависимость основных статических характеристик электрометра от способа модуляции и демодуляции сигналов. Переходные процессы остаются вне сферы нашего внимания.

В первой половине статьи (п. 2–5) приводятся общие определения и соотношения. Дальнейшее изложение посвящено одной конкретной системе многоканального электрометра. Во второй половине статьи предполагается, что читатель предварительно знаком с теорией циркуляционных матриц, изложенной, например, в работе [3]. Терминология и символика, определенные в указанной работе, используются в п. 6–10 без дополнительных объяснений.

2. Линейная математическая модель электрометра.

Структура электрометрического усилителя изображена на рис. I.

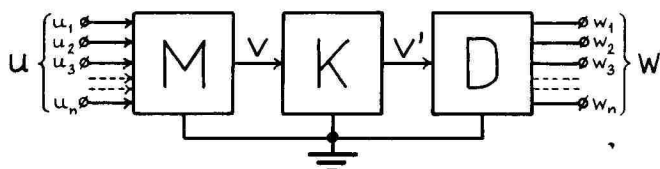


Рис. I. Блок-схема электрометра

u - входной сигнал, M - модулятор, K - промежуточный усилитель, D - детектор, w - выходной сигнал.

Совокупность входных напряжений u_i и совокупность выходных напряжений w_j рассматриваются как векторы-столбцы u и w . В статической линейной модели полное усиление напряжения описывается уравнением

$$w = Gu, \quad (I)$$

где G - передаточная матрица электрометра или, короче, матрица электрометра. Если все входные напряжения, кроме j - того, равны нулю, то $w_i = G_{ij} u_j$. Элементы матрицы G_{ij} интерпретируются как частные коэффициенты усиления от i -той входной клеммы к j -той выходной клемме.

Электрометр можно назвать идеальным при условии $G_{ij} = \gamma \delta_{ij}$, тогда $w_i = \gamma u_i$, где γ - скалярный коэффициент усиления электрометра. Матрица вида $\{\gamma \delta_{ij}\}$ называется скалярной матрицей. Если диагональные элементы матрицы электрометра не равны между собой, то это означает неоднородность усиления по каналам, а если внедиагональные элементы отличны от нуля - паразитную связь или переслышимости между каналами.

Модулятор описывается в линейной модели совокупностью модуляторных функций $m_i(t)$, каждая из которых определяется

как выходной сигнал модулятора при условии $u_j = \delta_{ij}$, $j = 1 \dots n$.
 В общем случае выходной сигнал модулятора будет

$$v(t) = \sum_{i=1}^n u_i m_i(t). \quad (2)$$

Предполагается, что существует общий период для всех модуляторных функций. Наименьший положительный общий период называется периодом модулятора и обозначается T .

Импульсная передаточная функция промежуточного усилителя $k(t-t')$ определяется как выходное напряжение $v'(t)$ при входном напряжении $v(t) = \delta(t-t')$. Линейный промежуточный усилитель описывается уравнением

$$v'(t) = \int_{-\infty}^t k(t-t') v(t') dt'. \quad (3)$$

Промежуточный усилитель называется идеальным, если $k(t-t') = k \cdot \delta(t-t')$ и $v'(t) = k \cdot v(t)$, где k - скалярный коэффициент усиления.

Образы модуляторных функций

$$m'_i(t) = \int_{-\infty}^t k(t-t') m_i(t') dt' \quad (4)$$

будут называться вторичными модуляторными функциями.

Линейный синхронный детектор или демодулятор выделяет из сигнала $v'(t)$ каждую составляющую w_i по своей ключевой функции $d_i(t)$:

$$w_i = \frac{1}{T} \int_T d_i(t) v'(t) dt. \quad (5)$$

Предполагается, что период модулятора является периодом и для всех ключевых функций. Символ T под знаком интеграла отмечает, что область интегрирования является один период модулятора.

Используя выражения (2) и (5), найдем

$$G_{ij} = \frac{1}{T} \int_T d_i(t) m'_j(t) dt. \quad (6)$$

Интеграл (6) совпадает со стандартным определением скалярного произведения двух функций. Поэтому будем говорить, что ключевые функции идеального электрометра ортогональны ко всем вторичным модуляторным функциям за исключением функций одного и того же индекса.

Для идеального электрометра с идеальным промежуточным усилителем можно определить напоминающее к.п.д. отношение

$$\eta = \frac{\gamma}{k}, \quad (7)$$

которое будет называться эффективностью системы модуляции или, короче, эффективностью электрометра. Если отклонение от идеальности состоит лишь в том, что усиления по каналам $\gamma_i = G_{ii}$ не равны, то будем говорить об эффективности каналов $\eta_i = \gamma_i / k$. При помощи уравнения (6) легко найти

$$\eta_i = \frac{1}{T} \int d_i(t) m_i(t) dt. \quad (8)$$

3. Порог и коэффициент чувствительности.

Определим порог чувствительности i -того канала δ_i как изменение сигнала u_i , при котором выходное напряжение w_i изменяется на стандартное отклонение шума b_i на выходе того же канала.

Стандартное отклонение шума зависит от времени усреднения или сглаживания выходного сигнала. Если нет другого указания, то примем за время усреднения один период модулятора T .

Шум исходит, как правило, одновременно от многих источников, его частотный спектр может быть разным. Мы ограничимся рассмотрением простейшего случая, когда шум на выходе промежуточного усилителя $n'(t)$ можно принять за аддитивный белый шум с интенсивностью ν . Тогда стандартное отклонение усредненного через один период шума равно $\epsilon' = \sqrt{\nu/T}$, а шум на выходе канала $\frac{1}{T} \int d_i(t) n'(t) dt$ имеет стандартное отклонение

$$\sigma_i = \varepsilon' \sqrt{\frac{1}{T} \int_T d_i^2(t) dt} \quad (9)$$

Согласно определению найдем

$$\delta_i = \varepsilon' \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_T d_i^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_T d_i(t) m_i'(t) dt} \quad (10)$$

В случае электрометра с идеальным промежуточным усилителем приведенный к входу усилителя уровень шума ε определяется так, что $\varepsilon' = k\varepsilon$, и в формуле (10) можно вычеркнуть штрихи над буквами ε и m . Введем теперь напоминающий к.п.д. коэффициент чувствительности канала

$$\eta_i^* = \frac{\varepsilon}{\delta_i} \quad (11)$$

Этот коэффициент зависит только от системы модуляции-демодуляции и имеет выражение

$$\eta_i^* = \frac{\eta_i}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_T d_i^2(t) dt}} \quad (12)$$

Коэффициент чувствительности является второй фундаментальной характеристикой системы модуляции-демодуляции, использованной в электрометре.

4. Дифференциальный электрометр.

Многоканальный электрометр называется дифференциальным, если его выходной сигнал не реагирует на равный прирост потенциалов всех входных клемм одновременно. Недифференциальный электрометр называется абсолютным электрометром. В математической теории дифференциальный электрометр отличается свойством

$$\sum_{j=1}^n G_{ij} = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (13)$$

Матрица дифференциального электрометра вырождена и выходной сигнал имеет лишнюю степень свободы. Предположим,

что детектор дифференциального электрометра не имеет внутренней гальванической связи с заземленной нулевой шиной, показанной на рис. 1, и напряжение между одной из выходных клемм и землей можно задать произвольно. При изменении этого произвольного напряжения потенциалы всех выходных клемм изменяются одинаково и напряжения между клеммами сохраняются. Это означает, что в случае дифференциального электрометра к уравнению (1) можно добавить произвольное равноэлементное слагаемое c :

$$w = Gu + c, \quad c_1 = c_2 = \dots = c_n. \quad (14)$$

Практические приложения дифференциальных электрометров немногочисленны. Свойство дифференциальности обычно возникает без намерения, сопровождая определенные способы реализации многоканального электрометра. Примером может служить электрометр с циркуляционной системой модуляции-демодуляции, описываемой во второй половине настоящей статьи.

Дифференциальный электрометр может быть использован как абсолютный с ценой потери одного или нескольких сигнальных каналов, выделяемых в нулевые каналы. Входные и выходные клеммы нулевых каналов заземляются. Передаточная матрица для сигнальных каналов абсолютного электрометра имеет соответственно меньшую размерность и не страдает свойством (13).

Обозначим множество номеров нулевых каналов Z и число нулевых каналов z . Предположим, что в случае замыкания нескольких выходных клемм общее их напряжение будет арифметическим средним напряжений тех же клемм, определенных до замыкания. Тогда ключевые функции абсолютного электрометра вычисляются по исходным ключевым функциям дифференциального электрометра следующим образом:

$$d_i^*(t) = d_i(t) - \sum_{l \in Z} d_l(t)/z. \quad (15)$$

Модуляторные функции сохраняются, а элементы новой передаточной матрицы будут

$$G_{ij}^* = G_{ij} - \sum_{\ell \in Z} G_{i\ell} / \alpha. \quad (16)$$

Сохраним обозначение n для общего числа каналов дифференциального электрометра. Число сигнальных каналов и размерность матрицы G^* будут $n^* = n - z$.

Для устранения неопределенного равноэлементного слагаемого измеряемого сигнала достаточно заземлить один канал. Заземление нескольких каналов может иметь целью подавление шума.

Матрица дифференциального электрометра не может быть скалярной. Будем считать дифференциальный электрометр идеальным в том случае, когда сокращенная передаточная матрица (16) скалярна, и примем за скалярный коэффициент усиления идеального дифференциального электрометра диагональный элемент G_{ii}^* .

Пример. Пусть исходная матрица электрометра имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 5 & -I & -3 & -I \\ -I & 5 & -I & -3 \\ -3 & -I & 5 & -I \\ -I & -3 & -I & 5 \end{pmatrix}$$

После заземления первого канала получим для оставшихся сигнальных каналов хорошо обусловленную передаточную матрицу

$$\begin{pmatrix} 6 & 2 & -2 \\ 0 & 8 & 0 \\ -2 & 2 & 6 \end{pmatrix},$$

а после заземления двух первых каналов матрицу

$$\begin{pmatrix} 7 & I \\ I & 7 \end{pmatrix}.$$

5. Подавление паразитной связи.

Возможная паразитная связь или переслышимость между каналами — одно из главных возражений против общего промежуточного усилителя в многоканальном электрометре. При практической реализации ортогональных ключевых функций могут возникнуть разные затруднения. Да и теоретически ортогональные функции на практике реализуются с некоторой ошибкой, откуда всегда появляется, хоть и слабая, переслышимость.

Эффективным средством подавления переслышимости оказывается отрицательная обратная связь. Помимо этой специфической роли, отрицательная обратная связь во многоканальном электрометре выполняет все те же известные функции, что и в обычном одноканальном электрометре.

Резюмируем элементарную теорию скалярной обратной связи в многополюснике. Пусть на вход модулятора подается напряжение $u + \beta w$, коэффициент обратной связи β выбран общий для всех каналов. Тогда $w = G(u + \beta w)$, а отсюда вытекает $w^* = (G^{-1} - \beta E)^{-1} u$, где G — передаточная матрица электрометра без обратной связи и E — единичная матрица. Передаточная матрица электрометра, охваченная обратной связью, следовательно, имеет вид

$$G^* = (G^{-1} - \beta E)^{-1}. \quad (17)$$

Предполагается, что электрометр, охваченный обратной связью, является стабильным. Обеспечение стабильности тем сложнее, чем сильнее первоначальная переслышимость. Вопрос об условиях стабильности выходит за рамки статической теории и здесь не рассматривается.

В случае отрицательной обратной связи ($\beta < 0$) матрица G^* , очевидно, ближе к диагональной матрице, нежели G , что и означает подавление переслышимости. Рассмотрим простейший численный пример. Пусть

$$G = \begin{pmatrix} 110 & 10 \\ -10 & 90 \end{pmatrix}$$

и требуется подавление переслышимости, которая составляет $\sim 10\%$, без существенного изменения среднего прямого усиления. Для этого повысим коэффициент усиления промежуточного усилителя в 10 раз, так что элементы матрицы G умножатся на 10, а затем введем обратную связь с $\beta = -0,009$. В результате получим

$$G^* = \begin{pmatrix} 101 & 1 \\ -1 & 99 \end{pmatrix},$$

переслышимость уменьшилась до одного процента, в то же время выравнялось и усиление по каналам.

6. Циркуляционный детектор.

Перейдем теперь к изучению многоканального динамического электрометра с циркуляционной системой модуляции и демодуляции. Для простоты везде предположим, что промежуточный усилитель является идеальным и полностью описывается скалярным коэффициентом усиления k .

Модулятор и детектор будут рассмотрены на основе примеров простейшей технической реализации. Несовершенство выбранных конструкций не мешает нам при построении формального математического описания, которое будет действительным и для других конструкций.

Устройство детектора поясняет рис. 2.

Циркуляционный детектор делит период T на равнодлинные шаги, в течение одного шага каждая выходная клемма находится в контакте с одной пластиной коллектора. На примере период состоит из пяти шагов.

В описываемом детекторе точка нулевого потенциала выбирается произвольно и ключевые функции вычисляются с точностью до неопределенного постоянного слагаемого. Ключевые функции состоят из равнодлинных ступеней, соответствующих шагам детектора. Обозначим значение функции $d_i(t)$ на j -том шагу через D_{ij} . Все числа D_{ij} образуют циркуляционную матрицу D , которую назовем детекторной матрицей. Детекторная матрица дифференциального электрометра вычисляется с точностью до неопределенного равноэлементного слагаемого.

Циркуляционная матрица D порождается своим первым столбцом, который называется детекторным вектором и обозначается d . Элементы детекторного вектора равны коэффициентам передачи выходного делителя напряжения промежуточного усилителя, записанным по очереди нумерации выходных клемм. На примере рис. 2 мы получим детекторный вектор $(1/2 \ 1 \ 1/4 \ 3/4 \ 0)$ и матрицу

$$\begin{pmatrix} 1/2 & 0 & 3/4 & 1/4 & 1 \\ 1 & 1/2 & 0 & 3/4 & 1/4 \\ 1/4 & 1 & 1/2 & 0 & 3/4 \\ 3/4 & 1/4 & 1 & 1/2 & 0 \\ 0 & 3/4 & 1/4 & 1 & 1/2 \end{pmatrix}.$$

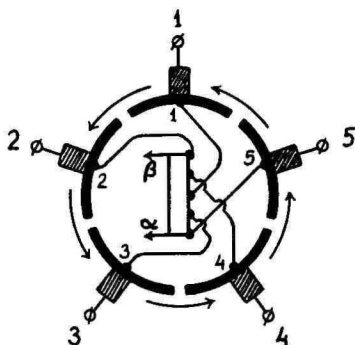


Рис. 2. Устройство простейшего пятиканального циркуляционного детектора

В центре - выходной делитель напряжения промежуточного усилителя (например, вторичная обмотка выходного трансформатора), выводы a и b подключены через не показанные на рисунке контактные кольца к промежуточному усилителю. Черные пластины 1-5 составляют коллектор, похожий на коллектор электродвигателя, вращающийся с периодом T в направлении, показанном стрелками. Заштрихованные контактные щетки неподвижны и подключены к выходным клеммам 1-5.

В простейшем циркуляционном детекторе одна коллекторная пластина подключается к одной выходной клемме промежуточного усилителя, а все остальные замыкаются между собой и подключаются к другой выходной клемме промежуточного усилителя. При этом детекторная матрица будет единичной матрицей $D_{ij} = \delta_{ij}$ и детектор — называться дельта-детектором.

Для использования циркуляционного детектора в абсолютном электрометре следует один или несколько каналов выделить в нулевые каналы. Если нулевых каналов несколько, то соответствующие клеммы заземляются через резисторы, образующие усредняющий делитель напряжения. Новая детекторная матрица не содержит неопределенного слагаемого и будет прямоугольной, поскольку сигнальных каналов останется меньше, чем шагов детектора.

Если на рис. 2 заземлить клемму I, то получим прямоугольную детекторную матрицу, подходящую для абсолютного электрометра:

$$\begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 & -3/4 & 1/2 & -3/4 \\ -1/4 & 1 & -1/4 & -1/4 & -1/4 \\ -1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & -1 \\ -1/2 & 3/4 & -1/2 & 3/4 & -1/2 \end{pmatrix}.$$

7. Циркуляционный модулятор. Пример устройства циркуляционного модулятора изображен на рис. 3.

При вращении ротора меняется емкость между каждым отдельным входным сектором и ротором, и если входные напряжения не равны между собой, то на роторе индуцируется переменный сигнал $\psi(t)$. Описываемый модулятор дифференциальный. Вид модуляторной функции зависит от числа и расположения лопастей и от ширины одной лопасти.

Простейший модулятор, снабженный однолопастным ротором, называется дельта-модулятором. Обозначим отношение угловой ширины лопасти ротора к угловой ширине одного входного сектора через λ и отношение емкости между одной лопастью ротора и входными секторами к общей емкости ротора через ρ .

Предположим, что щели между входными секторами малы и $\lambda \ll 1$. Тогда первая модуляторная функция дельта-модулятора имеет вид, показанный на рис. 4.

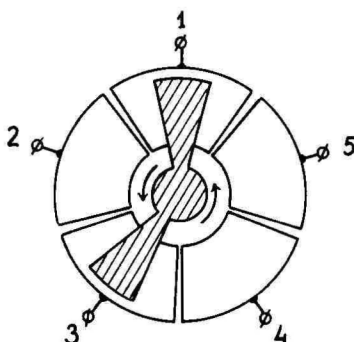


Рис. 3. Устройство простого пятиканального емкостного циркуляционного модулятора

Изолированные друг от друга плоские входные секторы неподвижны и подключены к входным клеммам 1-5. Заштрихованные секторы расположены над плоскостями входных секторов, они являются лопастями ротора, вращающегося в направлении стрелок синхронно с коллектором детектора. Ротор подключается к входу промежуточного усилителя. Предполагается, что входные секторы достаточно зашунтированы и напряжения на них не зависят от времени.

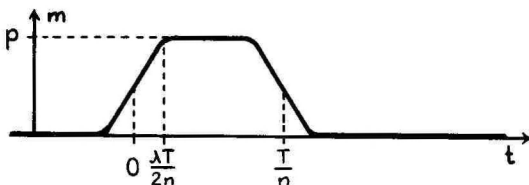


Рис. 4. Небалансированная модуляторная функция дельта-модулятора

Модуляторная функция рис. 4 вычислена с точностью до неопределенного постоянного слагаемого. Назовем модуляторную функцию, содержащую лишнее постоянное слагаемое, небалансированной. Медленный переходный процесс в реальном модуляторе определяет постоянное слагаемое так, что

$$\int_T m_i(t) dt = 0. \quad (18)$$

Модуляторные функции, удовлетворяющие требованию (18), назовем балансированными.

Если сигнал усиливается идеальным промежуточным усилителем и демодулируется циркуляционным детектором, который имеет ступенчатые ключевые функции, то детальный ход модуляционной кривой несуществен, а матрица электрометра зависит только от интегралов или средних значений модуляторных функций через шаги детектора. Достаточное описание модулятора дает тогда модуляторная матрица M , где первый индекс указывает номер шага, второй индекс — номер входной клеммы или канала, а элемент M_{ij} равен среднему значению j -той модуляторной функции на i -том шагу цикла детектора. Модуляторная матрица циркуляционного модулятора является циркуляционной, ее порождающий вектор m называется модуляторным вектором. Модуляторный вектор состоит из средних значений первой модуляторной функции через все шаги детектора.

Модуляторный вектор дельта-детектора имеет элементы:

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \left(1 - \frac{\lambda}{4}\right)\rho - \frac{\rho}{n} \\ m_2 &= m_n = \frac{\lambda}{8}\rho - \frac{\rho}{n} \\ m_3 &= m_4 = \dots = m_{n-1} = -\frac{\rho}{n} \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Слагаемое $-\rho/n$ появляется в результате балансирования.

Структуру составного ротора, состоящего из нескольких равношироких лопастей, можно описать вектором структуры, каждый элемент которого указывает на наличие (значение 1) или отсутствие (значение 0) лопасти в очередной позиции. Позиции перечисляются в очереди прохождения лопастей над первым входным сектором. Ротор рис. 3 имеет структуру 10010. Модуляторный вектор составного ротора является суммой модуляторных векторов дельта-модулятора, взятых с циклическим сдвигом в соответствии с позицией лопасти.

Пример. Пусть $\lambda = 0,4$ и $\rho = 0,2$. Тогда матрица модулятора рис. 3 имеет вид

$$\frac{1}{100} \begin{pmatrix} 10 & -6 & 10 & -7 & -7 \\ -7 & 10 & -6 & 10 & -7 \\ -7 & -7 & 10 & -6 & 10 \\ 10 & -7 & -7 & 10 & -6 \\ -6 & 10 & -7 & -7 & 10 \end{pmatrix} .$$

8. Передаточная матрица циркуляционного электрометра.

При идеальном промежуточном усилителе и ступенчатых ключевых функциях выражению (6) можно придать вид

$$G_{ij} = \frac{k}{T} \sum_{l=1}^n D_{il} \int_{\Delta T_l} m_j(t) dt , \quad (20)$$

где ΔT_l - шаг детектора. По определению модуляторной матрицы $\int_{\Delta T_l} m_j(t) dt = \frac{T}{n} M_{jl}$, откуда вытекает выражение матрицы электрометра через детекторную и модуляторную матрицы:

$$G = \frac{k}{n} DM . \quad (21)$$

Если множители циркуляционны, то и матрица электрометра циркуляционная. Соотношение (21) для порождающих векторов записывается через циркуляционную свертку

$$g = \frac{k}{n} d * m . \quad (22)$$

Дифференциальный электрометр является идеальным, когда его передаточная матрица отличается от скалярной матрицы на произвольную равноэлементную матрицу. Условие идеальности дифференциального электрометра можно записать в виде

$$\frac{k}{n} DM = \gamma E + c_1 Y, \quad (23)$$

где γ - скалярный коэффициент усиления,
 E - единичная матрица,
 Y - матрица, все элементы которой равны единице,
 c_1 - произвольная скалярная постоянная.

Уравнение (23) можно удовлетворить путем подбора матрицы D , матрицы M или обеих матриц одновременно. При проектировании электрометра обе матрицы подбираются одновременно, а при уточнении конструкции, как правило, подбирается детекторная матрица, которая легко корригируется подрегулировкой выводов делителя напряжения на рис. 2.

При определении детекторной матрицы наряду с уравнением (23) должны быть соблюдены условия

$$\left. \begin{array}{l} \min_i d_i = 0 \\ \max_i d_i = 1 \end{array} \right\} \quad (24)$$

Модуляторная матрица вырождена и поэтому уравнение (23) прямым способом решить не удастся. Поскольку произведение циркуляционной матрицы с равноэлементной матрицей всегда равноэлементно, уравнению (23) можно придать равносильный вид

$$\frac{k}{n} D(M + c_2 Y) = \gamma E + c_3 Y, \quad (25)$$

где c_2 и c_3 - новые скалярные постоянные. Если модулятор циркуляционный, то решение уравнения (25) - всегда циркуляционная матрица, реализуемая циркуляционным детектором. Учитывая только уравнение (25), приходим к выражению

$$D = \gamma \frac{n}{k} (M + c_2 Y)^{-1} + c_4 Y, \quad (26)$$

где c_4 - новая скалярная постоянная. В полученном решении три неизвестные постоянные - γ , c_2 и c_4 . Из них c_2 выбирается произвольно, запрещено только $c_2 = 0$. Постоянные γ и c_4 необходимо выбирать так, чтобы удовлетворить условиям (24). Обозначим порождающий вектор матрицы $(M + c_2 Y)^{-1}$ через q . Тогда

$$d_i = \frac{q_i - \min_j q_j}{\max_j q_j - \min_j q_j} \quad (27)$$

Легко доказать, что результат не зависит от выбора c_2 .

В вычислительной практике вектор q удобно определять по вектору m при помощи преобразования Фурье. Проблема выбора постоянной c_2 здесь обходится. Неопределенный элемент фурье-образа вектора q , соответствующий нулевой частоте, приравнивается нулю, а остальные вычисляются по формуле $\tilde{q} = 1/\tilde{m}$. Такой алгоритм может быть интерпретирован как выбор бесконечно большого c_2 .

Пример. Если D и M равны матрицам, приведенным как примеры в двух предыдущих пунктах, и $k = 400$, то матрица электрометра имеет вид

$$\begin{pmatrix} -3 & 0 & 3 & -10 & 10 \\ 10 & -3 & 0 & 3 & -10 \\ -10 & 10 & -3 & 0 & 3 \\ 3 & -10 & 10 & -3 & 0 \\ 0 & 3 & -10 & 10 & -3 \end{pmatrix}$$

Детектор явно не согласован с модулятором. Чтобы получить идеальный электрометр, следует согласно (26, 27) выбирать следующую детекторную матрицу:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0,94 \\ 0,94 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0,94 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0,94 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,94 & 1 \end{pmatrix}$$

Скалярный коэффициент усиления будет теперь 14,4.

9. Эффективность и чувствительность циркуляционного электрометра

Ниже мы рассмотрим только идеальный электрометр, предполагая, что детекторная матрица определена по заданной модуляторной матрице. При этом эффективность электрометра однозначно определяется модуляторным вектором, а коэффициент чувствительности — модуляторным вектором и множеством нулевых каналов.

Нам не удается получить зримого результата, при котором эффективность и коэффициент чувствительности были бы выражены непосредственно через модуляторный вектор. В формулах фигурирует также детекторная матрица, которая лишь в стадии численного расчета определялась по модуляторному вектору с применением для этого алгоритма, изложенного в предыдущем пункте.

Отношение разности диагонального и недиагонального элементов к диагональному элементу матрицы идеального дифференциального электрометра равно $n/(n-1)$. Поэтому скалярный коэффициент усиления будет $(n/(n-1))$ — кратное диагонального элемента матрицы дифференциального электрометра. Исходя из определений и предыдущих результатов, приходим к формуле эффективности, которая не зависит ни от режима электрометра, ни от множества нулевых каналов

$$\eta = (d * m)_i / (n-1) = (d_1 m_1 + d_n m_2 + d_{n-1} m_3 + \dots + d_2 m_n) / (n-1). \quad (28)$$

Наша нумерация элементов, в отличие от используемой в работе [3], начинается с единицы.

Коэффициенты чувствительности каналов могут оказаться различными в зависимости от расположения канала по отношению к нулевым каналам. Применяя (12) и (15), можно вывести формулу

$$\nu_i^q = \frac{\eta}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (D_{ij} - \sum_{\ell \in Z} D_{\ell j} / z)^2}} \quad (29)$$

Обычно расхождения между коэффициентами чувствительности каналов малы и электрометр можно описать при помощи среднего коэффициента чувствительности сигнальных каналов \bar{v} и коэффициента неоднородности чувствительности μ :

$$\left. \begin{aligned} \bar{v} &= \frac{\sum_{i \in Z} v_i}{n - z} \\ \mu &= \frac{\max_{i \in Z} v_i - \min_{i \in Z} v_i}{\bar{v}} \end{aligned} \right\} (30)$$

Из формул (28, 29) нельзя вывести никакого простого рецепта оптимизации электронов. Однако кое-какие общие тенденции, важные для конструктора, все же отметить можно. Алгоритм построения детекторной матрицы всегда обеспечивает ортогональность ключевых функций абсолютного режима к модуляторным функциям "чужих" каналов. Из формул (8, 28) видно, что эффективность будет хорошей, если ключевые функции в то же время приблизительно коллинеарны к модуляторным функциям "своих" каналов. Поскольку в n -мерном пространстве можно расположить максимально n взаимно-ортогональных векторов, то описанная идеальная ситуация возможна лишь при условии, что модуляторные функции образуют приблизительно ортогональную систему. Ключевые функции будут тогда автоматически приблизительно коллинеарны модуляторным функциям.

Простейшая система приблизительно ортогональной модуляции получается при использовании дельта-модулятора с параметром $\lambda \ll 1$.

С другой стороны, формула (28) указывает, что эффективность выше, если векторы m и d лучше "заполнены", т.е. содержат меньше нулевых или малых элементов. В этом отношении дельта-модулятор - наилучший вариант. Наилучшее "заполнение" векторов без потери ортогональности обеспечивают мультиплексные структуры (см., например, [1, 2]), из которых циркуляционной симметрией обладают структуры, основанные на псевдошумовых последовательностях. Качество

электрометра зависит, однако, еще от отношения емкостей ρ , которое лучше, если лопасти ротора широкие и число их мало. Удовлетворительной теории оптимизации циркуляционного электрометра не существует, а модулятор, который в общем случае снабжен ротором с разноширокими лопастями, имеет слишком много степеней свободы, чтобы возлагать надежды на универсальные алгоритмы численной оптимизации. Практические задачи, очевидно, приходится решать методом поиска структуры и параметров модулятора в диалоговом режиме вычислений на ЭВМ, что позволяет максимально использовать опыт и математическую интуицию конструктора.

10. Примеры расчета циркуляционного электрометра.

Ниже приводятся некоторые результаты вычисления характеристик 15-канального циркуляционного электрометра при условиях, близких к условиям, встречающимся в практических задачах. Предполагается, что конструктор электрометра должен выбирать структуру модулятора, относительную ширину лопасти λ и число нулевых каналов z . Для простоты в примерах рассматриваются только конструкции ротора с равноширокими лопастями. Допускаются числа нулевых каналов 1, 3 или 5, и предполагается, что заземленные клеммы распределены равномерно по кругу. Общее число каналов считается фиксированным, число сигнальных каналов будет $15 - z$. Отношение паразитной емкости ротора модулятора к полезной емкости одной лопасти с относительной шириной $\lambda = 1$ обозначается ℓ , это число должно быть задано. Если ротор имеет r лопастей, то отношение емкостей $\rho = \lambda / (r\lambda + \ell)$.

Детекторная матрица во всех примерах вычислена так, чтобы получить идеальную передаточную матрицу электрометра.

Табл. 1-3 демонстрируют зависимость характеристик электрометра от относительной ширины лопасти ротора и паразитной емкости сравнительно для модуляторов с дельта-структурой и псевдодумовой структурой. Преимущества псевдодумовой структуры значимы лишь при большой паразитной емкости. При малой паразитной емкости псевдодумовая структура

сохраняет преимущество в эффективности, но уступает дельта-структуре по чувствительности. Однородность чувствительности для обеих рассмотренных структур точно одинакова.

Таблица 1

Эффективность электрометра (в процентах)

Структура ротора	ℓ	λ				
		0,1	0,5	0,8	0,95	1
1000000000000000	1	0,58	1,80	2,04	2,03	2,01
	5	0,12	0,49	0,63	0,67	0,67
	15	0,04	0,17	0,23	0,25	0,25
101100101000011	1	1,49	2,23	1,97	1,79	1,72
	5	0,44	1,18	1,23	1,17	1,15
	15	0,16	0,54	0,63	0,63	0,62

Таблица 2

Коэффициент чувствительности электрометра $\bar{\nu}$
(в процентах) при $z = 3$

Структура ротора	ℓ	λ				
		0,1	0,5	0,8	0,95	1
1000000000000000	1	1,97	6,32	7,40	7,49	7,46
	5	0,43	1,72	2,30	2,45	2,49
	15	0,14	0,61	0,84	0,92	0,93
101100101000011	1	2,56	4,22	4,03	3,82	3,73
	5	0,76	2,23	2,51	2,51	2,49
	15	0,28	1,03	1,29	1,35	1,36

Таблица 3

Коэффициент однородности чувствительности электрометра
(в процентах) для структур
1000000000000000 и 101100101000011 при $z = 3$

λ	0,1	0,5	0,8	0,95	1
μ	0,65	3,79	6,85	8,64	9,28

В табл. 4 показана зависимость чувствительности электрометра от числа нулевых каналов. Хотя чувствительность при увеличении числа нулевых каналов и растет, и выравнивается, нельзя забывать, что это сопровождается уменьшением числа сигнальных каналов. Поскольку увеличение общего числа каналов уменьшает чувствительность, то на практике конструирования электрометра следует изучить зависимость чувствительности от числа нулевых каналов при фиксированном числе сигнальных каналов.

Таблица 4

Характеристики электрометра (в процентах)
при $\ell = 10$ и $\lambda = 1$

Структура ротора		z		
		1	3	5
1000000000000000	η	0,37	0,37	0,37
	$\bar{\eta}$	1,12	1,36	1,42
101100101000011	μ	18,2	9,3	0
	$\bar{\eta}$	1,45	1,76	1,84
	η	0,81	0,81	0,81

Таблица 5

Характеристики электрометра (в процентах)
при $z = 1$, $l = 10$ и $\lambda = 1$

№	Структура ротора	η	$\bar{\nu}$	μ
1	1000000000000000	0,37	1,12	18,2
2	101100101000011	0,81	1,45	18,2
3	1000000000000000	0,39	1,18	20,1
4	1000100001000000	0,46	1,07	36,4
5	1010000010000000	0,47	1,15	27,5
6	1010010001100000	0,28	0,66	78,9
7	101001000100001	0,69	1,41	23,8
8	101001000100000	0,80	1,55	5,5

Табл. 5 подробно иллюстрирует свойства разных структур ротора модулятора. Две первые строки содержат данные для дельта-структуры и псевдошумовой структуры. Структуры 3-7 выбраны почти наугад и не имеют теоретического обоснования. Соответствующие строки таблицы должны показать, что сугубо эмпирический поиск структуры не отличается результативностью. Восьмая строка таблицы доказывает существование структур, предпочтительных дельта-структуре и псевдошумовой структуре.

В табл. 6 представлены модуляторный и детекторный векторы для электрометра со структурой ротора, описанной в восьмой строке табл. 5.

Таблица 6

Модуляторный и детекторный векторы электрометра
со структурой ротора модулятора
101001000100000 при $\ell = 10$ и $\lambda = 1$

i	$1000 m_i$	$100 d_i$
1	35	97
2	-1	18
3	35	6
4	-10	0
5	-10	5
6	35	14
7	-10	88
8	-19	17
9	-10	14
10	35	18
11	-10	91
12	-19	26
13	-19	28
14	-19	100
15	-10	36

Литература

1. Сороко Л.М. Псевдошумовые последовательности и применение их для мультиплексных систем регистрации частиц. - "Сообщ. ОИЯИ", 1971, P13-5722, 15 с.
2. Сороко Л.М. Мультиплексные системы регистрации частиц. - "ПТЭ", 1973, № 5, с. 7-19.

3. Таммет Х.Ф. Циркуляционные матрицы и преобразование Фурье. В кн.: Введение в линейную конечномерную теорию спектрометрии, Таллин, 1975, с.84-92.

PALJUKANALILISE DÜNAAMILISE ELEKTROMEETRI ELEMENTAAR- TEOORIA

H. Tammet

Resüme

Artiklis esitatakse joon. 1 kujutatud struktuuriga elektromeetri lihtsaim matemaatiline mudel. See mudel kirjeldab ainult staatilist režiimi lineaarses lähenduses, üleminekuprotsessid ja stabiilsuse probleemid jäävad vaatluse alt välja. Artikli esimeses osas defineeritakse üldmõisted ja tuletatakse põhiseosed, teises osas (p.6...10) rakendatakse neid tsirkulatsioonielektromeetri omaduste uurimisel.

Elektromeetri väljundpingete vektori sõltuvust sisendpingete vektorist kirjeldatakse võrrandiga (1). Modulaatorit, vahevõimendit ja detektorit iseloomustatakse funktsioonide $m(t)$, $k(t)$ ja $d(t)$ abil (vt. valemid 2, 3, 5). Võrrand (6) avaldab elektromeetri maatriksi nimetatud funktsioonide kaudu. Modulatsiooni-demodulatsioonisüsteemi kvaliteeti iseloomustatakse süsteemi efektiivsuse η (7, 8) ja tundlikkusteguri ν (11, 12) abil. Neljandas ja viiendas punktis uuritakse diferentsiaalelektromeetri kasutamist absoluutrežiimis ning kanalitevahelise parasiitsidestuse summutamist negatiivse tagasisidestuse abil.

Kuues ja seitsmes punkt on pühendatud tsirkulatsioonielektromeetri detektori ja modulaatori uurimisele. Funktsiooni $d(t)$ astmelisus lubab siin ka elektromeetrisiseseid protsesse kirjeldada algebraliste meetodite abil, iseloomustades modulaatorit ja detektorit maatriksitega M ja D . Kaheksandas punktis avaldatakse elektromeetri maatriks G

detektori- ja modulaatorimaatriksi kaudu ning tuletatakse algoritm ideaalse elektromeetri detektori struktuuri määramiseks modulaatori struktuuri ja parameetrite järgi. Järgnevas leitakse tsirkulatsioonelektromeetri efektiivsuse ja tundlikkusteguri avaldised ning analüüsitakse näidete varal elektromeetri kvaliteedi sõltuvust modulaatori struktuurist ning parameetritest.

ELEMENTARY THEORY OF A MULTI-CHANNEL ELECTROMETER

H. Tammet

Summary

The paper presents the simplest mathematical model of an electrometer having the structure indicated in Fig. 1. This model describes only a static regime in a linear approximation; transition processes and problems of stability will not be discussed. The first part of the article defines general concepts and derives basic relationships; these are applied in the second part of the paper (sections 6 to 10), which deals with the properties of a circulatory electrometer.

The dependence of the output voltage vector of an electrometer on the input voltage vector is described by means of equation (1). The modulator, the intermediate amplifier and the detector are characterized by the functions $m(t)$, $k(t)$ and $d(t)$ (see formulas 2, 3 and 5). Equation (6) expresses the matrix of the electrometer through the medium of the functions mentioned. The quality of modulation and demodulation systems is characterized by means of efficiency η (7, 8) and the sensitivity factor ν (11, 12). Sections 4 and 5 discuss the use of a differential electrometer in the capacity of an absolute electrometer and the damping of the parasitic connection between the channels by means of a negative feedback.

Sections 6 and 7 are devoted to the study of the detector and the modulator of a circulatory electrometer. The

stepwise increase of the function $d(t)$ enables one to describe also the processes proceeding inside the electrometer by algebraic methods by characterizing the modulator and the detector with matrices M and D . Section 8 is concerned with the expression of matrix G of the electrometer through the medium of the detector and modulation matrices and presents the derivation of an algorithm for the determination of the structure of the detector of an ideal electrometer according to the structure and the parameters of the modulator. In the following sections the expression of the efficiency and that of the sensitivity factor of the circulatory electrometer are ascertained and the dependence of the quality of the electrometer on the structure and on the parameters of the modulator are analyzed.

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ СПЕКТРЫ РЯДА ВИНИЛОВЫХ СУЛЬФИДОВ

Р.И. Пиквер, У.Х. Мельдер

Бурное развитие метода фотоэлектронной спектроскопии в последние годы открыло новые возможности исследования электронной структуры молекул. Этот метод основан на селекции фотоэлектронов по энергиям и дает довольно конкретную информацию о заполненных молекулярных орбиталях молекулы [1]. .

В настоящей работе был использован фотоэлектронный спектрометр, построенный в Лаборатории электротриемии Тартуского государственного университета; его аналог описан ранее другими авторами [2] . Электростатический анализатор электронов типа задерживающего поля обеспечивает предельное разрешение 0,06 эВ (для электронов с энергией 5 эВ). Ионизирующим излучением служит резонансная линия He I с энергией кванта 21,2 эВ. В качестве внутреннего эталона для калибровки спектров применялся аргон.

В таблице приведены значения вертикальных потенциалов ионизации четырех виниловых сульфидов и тиоанизола, определенные по расположению пиков на фотоэлектронных спектрах. Точность определения - от 0,05 до 0,1 эВ. В скобках указаны соответствующие первые адиабатические потенциалы ионизации. Значения последних проверялись методом фотоионизации. Результаты совпали с точностью $\pm 0,03$ эВ.

На рис. 1 приведены фотоэлектронные спектры исследуемых молекул.

Алкильные сульфиды имеют несложный спектр фотоэлектронов [3] . Ярко выраженная линия неподеленной пары электронов, локализирующихся на атоме серы, отстоит далеко

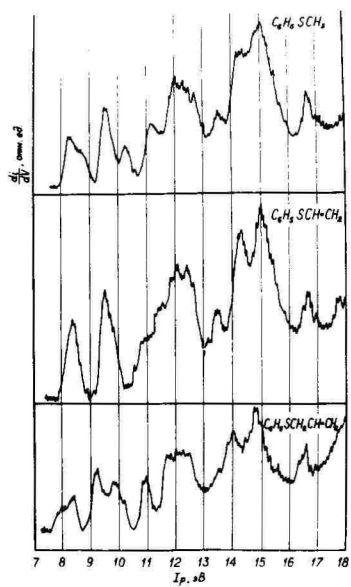
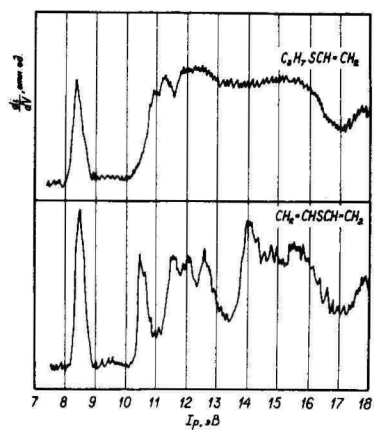


Рис. 1. Фотоэлектронные спектры

от других линий спектра и является, таким образом, хорошим объектом для изучения влияния заместителей на энергию этих электронов. Хотя всякое замещение у атома серы приводит к делокализации несвязывающих электронов серы и смешиванию орбиталей, такие эффекты часто не являются определяющими.

Таблица

Вертикальные потенциалы ионизации I_p (эВ)

I_p	$C_3H_7SCH=CH_2$	$(CH_2=CH)_2S$	$C_6H_5SCH_3$	$C_6H_5SCH_2CH=CH_2$	$C_6H_5SCH=CH_2$
1	8,34(8,16)	8,44(8,22)	8,12(7,96)	8,38(7,85)	8,27(7,92)
2	10,8	10,35	9,33	9,18	9,42
3	11,17	11,38	10,09	9,81	10,9
4		11,88	10,07	10,97	11,6
5		12,48	11,92	11,8	11,98
6		13,90	13,41	14,00	12,37
7			14,06	14,73	13,39
8			14,90	16,60	14,27
9			16,71		14,99
10					16,61

Виниловые сульфиды, на примере пропил-винилового сульфиды, также имеют типичную симметрическую линию неподеленной пары. Смещение линии в сторону меньшей энергии связи по сравнению с соответствующей линией в спектре диметилового сульфиды можно понять, учитывая то, что двухвалентная сера является сильным акцептором σ -, так и π -электронов. Вторую линию (10,8 эВ) можно, очевидно, отнести к π -электронам двойной связи. Повышение энергии

этого уровня по сравнению с энергией π -электронов в этилене (10,51 эВ) связано с уменьшением плотности заряда на π -связи. Схема уровней приведена на рис. 2.

В спектре дивинилового сульфида линия неподеленной пары (8,44 эВ) не имеет, во всяком случае при разрешении нашего прибора, никакой структуры и ее сдвиг, по сравнению со спектром диметилового сульфида (8,67 эВ), небольшой (0,23 эВ). Следующие уровни (10,35 эВ и 11,38 эВ), видимо, представляют собой расщепленный π -электронный уровень.

Расшифровка фотоэлектронных спектров фенильных сульфидов намного сложнее. В спектре фенил-метилового сульфида (тиоанизола) происходит смешивание орбитали неподеленной электронной пары серы с симметричной компонентой вырожденной верхней π -орбитали бензола [4], образуя орбитали, обозначенные на рис. 2 π_1 и π_3 соответственно. Расщепление почти симметричное, что указывает на незначительность других эффектов. Таким образом, первая орбиталь имеет частично связывающий характер, на что указывает и форма линий в спектре. Антисимметричная компонента π_2 незначительно смещается за счет индукционного эффекта группировки $-SCH_3$.

Замещение метиловой группы на аллильную не должно существенно менять эту схему. Действительно, соответствующие линии в спектре фенилаллилового сульфида появляются и, судя по форме первой линии, происходит смешивание орбиталей. Но кроме того, в спектре появляется линия (9,81 эВ), которая мало отличается по энергии от π -электронной линии в пропилене (9,88 эВ).

Интересно, что в спектре фенил-винилового сульфида первая линия симметрична и не имеет структуры. Это говорит в пользу несвязывающего характера соответствующей орбитали. Повышение энергии связи на 0,15 эВ по сравнению с энергией соответствующего уровня с тиоанизоле, видимо, обусловлено индукционным влиянием винильной группы. Линии, соответствующие π -электронам бензольного кольца (9,42 эВ) и винильной группы (10,9 эВ), смещены в сторону больших

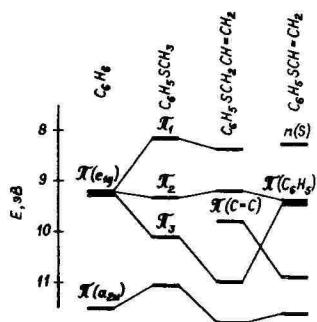
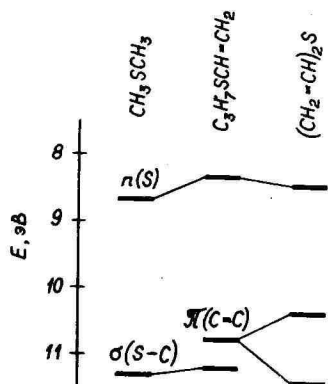


Рис. 2. Корреляция уровней энергии

энергии связи, что можно объяснить вышеупомянутыми свойствами серы. Неучастие π -орбиталей бензола в смешивании в фенол-виниловом сульфиде, возможно, связано с особенностями геометрии этой молекулы.

Л и т е р а т у р а

1. Bock H. and Ramsey B.G. *Angew. Chem. Internat. Edit.*, vol.12, 734 (1973).
2. Вилесов Ф.И., Лопатин С.Н. *ЖТФ*, т. 42, 176 (1972).
3. Wagner G., Bock H. *Chem. Ber.*, Bd.107, 68 (1974).
4. Bock H., Wagner G., Kroner, J. *Chem. Ber.*, Bd.105, 3850 (1972).

REA VINÜLSULFIIDIDE FOTOELEKTRONIDE SPEKTRID

R. Pikver, U. Mölder

Resüme

Artiklis analüüsitakse viie sulfiidi $C_3H_7SCH=CH_2$, $(CH_2=CH)_2S$, $C_6H_5SCH_3$, $C_6H_5SCH_2CH=CH_2$, $C_6H_5SCH=CH_2$ fotoelektronide spektreid, mis on saadud He I resonantsjoonega ergastamisel. Spektritest määratud vertikaalsed ionisatsioonipotentsiaalid esitatakse tabelina. On uuritud ülemiste energianivoode korrelatsiooni.

PHOTOELECTRON SPECTRA OF A SERIES OF VINYL SULPHIDES

R. Pikver, U. Mölder

Summary

This paper discusses the photoelectron spectra of five sulphides $C_3H_7SCH=CH_2$, $(CH_2=CH)_2S$, $C_6H_5SCH_3$,

$C_6H_5SCH_2CH=CH_2$, $C_6H_5SCH=CH_2$. The spectra have been obtained by means of the resonance line of He I. The vertical ionization potentials determined from the spectra have been listed in a table. The correlation of the upper energy levels has been studied.

СОДЕРЖАНИЕ

ТАММЕТ Х.Ф. Зависимость спектра подвижностей легких аэроионов от микропримесей воздуха	3
ЯКОБСОН А.Ф., САЛЫМ Я.И., ТАММЕТ Х.Ф. Некоторые результаты испытания многоканального автоматического спектрометра аэроионов	16
МАТИЗЕН Р.Л., ЮТС Э.Ю. Счетчики аэроионов УТ-6914 и УТ-7406	24
ТАММЕТ Х.Ф. Об электрической гранулометрии аэрозолей	30
ТАММ Э.И. О функциональной зарядке аэрозольных частиц	35
ВИСНАПУУ Л.Ю. Электрическое заряджение частиц аэрозоля с применением коронного разряда	56
ВИСНАПУУ Л.Ю. К вопросу об удалении заряженных частиц от генератора	86
ВИСНАПУУ Л.Ю. Распылитель с соплами Бергсона, снабженный стержневым индуцирующим электродом	92
РЕЙНЕТ Я.Ю., ВИСНАПУУ Л.Ю., СУЛА Э.В. Аэрозольное устройство для групповой вакцинации	104
ПЕТЕРСОН К.А., ВИСНАПУУ Л.Ю., ПЯРНАСТЕ Э.Э., РЕЙВАРТ О.А., НУРМЕ М.Э. О применении аэрозолей для дезинфекции инкубационных яиц	112
СУЛА Э.В. Об определении концентрации аэрозоля, пополняемого частицами	120
СУЛА Э.В., ТАММЕ В.Б. Об определении массовой концентрации аэрозоля измерением перепада давления на фильтре	125
НИКУЛЬЧА И.П., МОНТИК П.Н. Динамика помещения как объекта управления концентрацией ионов	132
ИЛЮКОВИЧ А.М. Особенности эксплуатации электрометрической аппаратуры	144
ТАММЕТ Х.Ф. Элементарная теория многоканального динамического электрометра	155
ПИКВЕР Р.И., МЕЛЬДЕР У.Х. Фотоэлектронные спектры ряда виниловых сульфидов	182

SISUKORD

TAMMET, H. Kergete aeroioonide liikuvusspektri sõltuvus õhu mikrolisandeist	13
JAKOBSON, A., SALM, J., TAMMET, H. Mitmekanalilise automaatse aeroioonide spektromeetri katsetamise tulemusi	21
MATISEN, R., ÜTS, E. Aeroioonide loendurid UT-6914 ja UT-7406	29
TAMMET, H. Aerosoolide elektrilisest granulomeetriast	34
TAMM, E. Aerosooliosakeste funktsionaalsest laadimisest	53
VISNAPUU, L. Aerosooliosakeste elektriline laadimine koroonalahenduse abil	84
VISNAPUU, L. Laetud osakeste eemaldamisest generaatorist	90
VISNAPUU, L. Vardakujulise indutseeriva elektroodiga Bergsoni pihusti	102
REINET, J., VISNAPUU, L., SULA, E. Aerosooliseadeldis grupiviisiliseks vaktsineerimiseks	111
PETERSON, K., VISNAPUU, L., PÄRNASTE, E., REIVART, O., NURME, M. Aerosoolide kasutamisest inkubeeritavate munade desinfitseerimisel	118
SULA, E. Osakestega täitva aerosooli kontsentratsioonini määramisest	124
SULA, E., TAMME, V. Aerosooli masskontsentratsioonini määramisest rõhulangu kaudu filtril	131
NIKULTŠA, I., MONTIK, P. Ruumi kui ioonide kontsentratsioonini automaatreguleerimise objekti dünaamika	143
ILJUKOVITŠ, A.M. Elektromeetrilise aparatuuri ekspluatatsioonini iseärasusi	154
TAMMET, H. Paljukanalilise dünaamilise elektromeetri elementaarteooria	179
PIKVER, R., MÖLDER, U. Rea vinüülsulfiidide fotoelektronide spektrid	187

CONTENTS

H.TAMMET. The dependence of the mobility spectrum of small air ions on trace admixtures in the air	14
A.JAKOBSON, J.SAIM and H.TAMMET. Results of experimentation with the multichannel automatic spectrometer of air ions	22
R.MATISEN and E.ÜTS. Air ion counters UT-6914 and UT-7406	29
H.TAMMET. On the electric granulometry of electric aerosols	34
E.TAMM. On the functional charging of aerosol particles	54
L.VISNAPUU. Electrical charging of aerosol particles by means of corona discharges	84
L.VISNAPUU. On removing charged particles from the generator	91
L.VISNAPUU. A Bergson atomizer with a rodlike inducing electrode	103
J.REINET, L.VISNAPUU and E.SULA. An aerosol device for group vaccination	111
K.PETERSON, L.VISNAPUU, E.PÄRNASTE, O.REIVART, M.NURME. On the use of aerosols in disinfecting eggs that are being incubated	119
E.SULA. Determination of the aerosol concentration reinforced with particles	124
E.SULA and V.TAMME. Determination of the aerosol mass concentration from measurements of pressure drop on a filter	131
I.V.NIKULCHA and P.N.MONTIK. The dynamics of a closed room as an object of automatically controlling ion density in it	143
A.M.ILYUKOVICH. Peculiarities of the exploitation of electrometric equipment	154
H.TAMMET. Elementary theory of a multi-channel electrometer	180
R.PIKVER, U.MÖLDER. Photoelectron spectra of a series of vinyl sulphides	187

ИОНИЗАЦИЯ, АЭРОЗОЛИ, ЭЛЕКТРОМЕТРИЯ

УИ

Ученые записки

Тартуского государственного университета

Выпуск 348

На русском языке

Резюме на эстонском и английском языках

Тартуский государственный университет

ЭССР, г.Тарту, ул.Кликооли, 18.

Ответственный редактор Л.Виснапуу

Корректор Л.Аболдуева

Сдано в печать 14/1. 1975 г. Бумага печатная №1. 30x45. 1/4.

Печ. листов 12,5. Учетно-издат. листов 9,73.

Тираж 500 экз. Зак. № 104. МВ 00156.

Типография ТТУ. ЭССР, г.Тарту, ул.Пялсоми, 14.

Цена 97 коп.

УДК 551.594.132
543.27

ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРА ПОДВИЖНОСТЕЙ ЛЕГКИХ АЭРОИОНОВ ОТ МИКРОПРИМЕСЕЙ ВОЗДУХА. Таммет Х.Ф. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 3-15.

Показано, что спектр подвижностей легких отрицательных аэроионов в воздухе с примесью паров воды содержит лишь одну дискретную линию и подходит для калибровки измерительной аппаратуры. Продемонстрирована дискретная структура и сверхчувствительность спектра легких отрицательных аэроионов к примесям электроноакцепторных газов, в частности галоидов. Метод спектрометрии подвижностей легких отрицательных аэроионов предлагается для селективного детектирования электроноакцепторных примесей воздуха с концентрацией порядка 1 мкг/м^3 .

Илл. 4. Библ. 7. Рез. эст., англ.

УДК 551.508.941
621.317.792

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО СПЕКТРОМЕТРА АЭРОИОНОВ. Якобсон А.Ф., Сальм Я.И., Таммет Х.Ф. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 16-23.

Приведены некоторые результаты испытания многоканального автоматического спектрометра аэроионов, описанного в Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 320, 1973. Программа обработки обеспечивает выдачу информации о распределении размеров частиц (спектра) субмикроскопического аэрозоля в диапазоне от 10 до 100 нм. Отмечается высокая чувствительность спектра к некоторым источникам загрязнения воздуха.

Библ. 3. Рез. эст., англ.

УДК 551.508.941.3
621.317.792

СЧЕТЧИК АЭРОИОНОВ УТ-6914 и УТ-7406. М а т и з е н
Р.Д., Ю т с Э.Ю. Уч.зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348,
Тарту, 1975, с. 24-29.

Описаны универсальные счетчики аэроионов, приспособ-
ленные для работы в тяжелых климатических условиях (при вы-
сокой относительной влажности и в широком диапазоне темпе-
ратур). С целью повышения надежности схема динамического
электрометра собрана полностью на полупроводниках, в других
блоках по сравнению с прежними моделями сделаны значитель-
ные конструктивные изменения.

Илл. 2, Библ. 2. Рез. эст., англ.

УДК 541.182.2/3
551.508

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГРАНУЛОМЕТРИИ АЭРОЗОЛЕЙ. Т а м м е т
Х.Ф. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975,
с. 30-34.

Построена одноступенчатая математическая модель, кото-
рая дает возможность приложения в электрической грануломет-
рии аэрозолей стандартных методов линейной теории спектро-
метрии. Получены общие выражения аппаратной функции и аппа-
ратной матрицы электрического гранулометра.

Рез. эст., англ.

УДК 621.319.7.001
551.508

О ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАРЯДКЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ. Т а м м
Э.И. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975,
с. 35-55.

Приводится определение функциональной зарядки аэрозо-
льных частиц, вводятся критерии для оценки качества двух
четных видов такой зарядки - аналитической и моноомобильной.
Для аналитической зарядки частиц радиусом менее 0,1 мкм це-
лесообразно применять зарядник без внешнего поля, а частиц
радиусом более 0,1 мкм - зарядник с максимальной возможной
напряженностью поля.

Илл. 1. Библ. 23. Рез. эст., англ.

УДК 621.319.7.001.6 : 541.182.2
537.241

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗАРЯЖЕНИЕ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ
КОРОННОГО РАЗРЯДА. В и с н а п у у Л.Ю. Уч. зап. Тартус-
кого гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 56-85.

Анализируются литературные данные по электризации час-
тиц аэрозоля в поле коронного разряда. Особое внимание об-
ращается на оценку эффективности зарядных устройств и на
соответствующие технические вопросы. Обобщаются зависимости
между конструктивными и рабочими параметрами устройств с
ионной зарядкой.

Библ. 62. Рез. эст., англ.

УДК 621.319.05

К ВОПРОСУ ОБ УДАЛЕНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ОТ ГЕНЕРАТОРА.
В и с н а п у у Л.Ю. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып.
348, Тарту, 1975, с. 86-91.

Рассматривается условие удаления заряженных частиц от
генератора, обтекаемого потоком газа, в предположении, что
все частицы имеют равные радиусы и заряды и что сопротивле-
ние движения частиц в среде потока выражается формулой
Стокса. Учитывая электрическое поле струи заряженных частиц,
стремящееся вернуть частицы обратно на генератор, находят,
что наиболее эффективное удаление их от генератора происхо-
дит тогда, когда массовые расходы частиц и выносящего их из
генератора газа равны. В случае частиц, образующихся при
пневматическом распыливании жидкости, для эффективного уда-
ления их от генератора целесообразно отношение названных
массовых расходов выбрать по возможности малым.

Библ. 4. Рез. эст., англ.

УДК 614.48
541.18.053

РАСПЫЛИТЕЛЬ С СОПЛАМИ БЕРГСОНА, СНАБЖЕННЫЙ СТЕРЖНЕВЫМ ИНДУЦИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ. В и с н а п у у Л.Ю. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 92-103.

Экспериментально исследованы физические характеристики распылителя Бергсона с индуцирующим электродом в зависимости от его конструктивных и рабочих параметров. Введено понятие эффективности удаления зарядов от генератора как отношение токов конвекции, соответствующих рассматриваемому и минимальному расстояниям между выходным сечением генератора и установленной перед ним заземленной сеткой.

Илл. 6. Библ. 7. Рез. эст., англ.

УДК 667.644.3.621.319.5
(088.8)

АЭРОЗОЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ГРУППОВОЙ ВАКЦИНАЦИИ.

Р е й н е т Я.Ю., В и с н а п у у Л.Ю., С у л а Э.В. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 104-111.

Описывается разработанное авторами аэрозольное устройство, содержащее пневматический распылитель с индуцирующим электродом, выпрямитель напряжения и сепарационную камеру, и приводятся его технические данные. Сравняется дисперсность капель аэрозоля, выходящего из устройства при электрическом заряде и без заряда распыла. Выясняется, что массовый медианный диаметр капель составляет в первом случае 2,5 мкм, а во втором случае 4,1 мкм.

Илл. 3. Библ. 5. Рез. эст., англ.

УДК 636.5 : 615.779.9

О ПРИМЕНЕНИИ АЭРОЗОЛЕЙ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ ИНКУБАЦИОННЫХ ЯИЦ. Петерсон К.А., Виснапуу Л. Ю., Пярнасте Э. Э., Рейварт О. А., Нурме М.Э. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 112-119.

Приведены результаты экспериментальной оценки дезинфекционной эффективности электрически заряженных и незаряженных аэрозолей неомидина при обработке инкубационных яиц. Показано, что электроаэрозоль оказывает более быстрое бактерицидное действие, чем соответствующий аэрозоль. Установлено, что для полной дезинфекции скорлупы яиц, размещенных в камере, необходимо введение в эту камеру аэрозоля неомидина в дозе 400 000 ЕД/м³.

Табл. 4. Библ. 10. Рез. эст., англ.

УДК 541.182.2/.3.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЯ, ПОПОЛНЯЕМОГО ЧАСТИЦАМИ. Сула Э.В. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 120-124.

В статье приведены данные измерений концентрации аэрозоля в тесткамере при работающем источнике аэрозоля дибутилфталата, дающем аэрозоль, распределенный логарифмически нормально с геометрическим квадратным отклонением, равным I, I_1 и средним геометрическим радиусом частиц, равным 0,75 мкм. Измерения дают хорошее согласие с теоретическими вычислениями на ЭВМ из уравнения Мюллера. Показано, что в условиях эксперимента указанные параметры распределения постоянны во времени.

Илл. 1. Библ. 12. Рез. эст., англ.

УДК 541.182.2

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЯ ИЗМЕРЕНИЕМ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА ФИЛЬТРЕ. Сула Э.В., Тамме В.Б. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 125-131.

В статье описывается методика измерения массовой концентрации аэрозоля с постоянным распределением частиц по размерам измерением сопротивления фильтра при фильтрации аэрозоля. Приводится алгоритм для преобразования опытных фильтров на "эталонный" в связи с изменением параметров разных фильтров.

Илл. 4. Табл. 1. Библ. 4. Рез. зст., англ.

УДК 537.534.1
537.222

ДИНАМИКА ПОМЕЩЕНИЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ИОНОВ. Никольча И.П., Монттик П.Н. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 132 - 143.

Приведено математическое описание динамики помещения как объекта управления концентрацией ионов. Полученное дифференциальное уравнение учитывает изменение ионного состава помещения, с определенной краткостью обмена воздуха, за счет действия электростатических, гравитационных, диффузионных сил, рекомбинационных эффектов, выделения и поглощения ионов обитателями. Получены передаточные функции для помещения по каналам управления и возмущения.

Илл. 1. Библ. 5. Рез. зст., англ.

УДК 621.317.723

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ. И л ю к о в и ч А. М. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та вып. 348, Тарту, 1975, с. 144-154.

Изложены общие требования и правила работы с электрометрической аппаратурой. Рассмотрены вопросы ухода за входными изоляторами, соединения измерительной установки с объектом и экранирования. Даны общие указания по подготовке к работе и проверке электрометрической аппаратуры.

Библ. 8. Рез. зст., англ.

УДК 621.317.723
621.376

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМЕТРА. Т а м м е т Х. Ф. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 155-181.

Предложена простейшая математическая модель, способная описать статический режим многоканального динамического электрометра в линейном приближении. Введены понятия эффективности и коэффициента чувствительности системы модуляции и демодуляции сигнала. Подробно рассмотрены многоканальные циркуляционные электрометры, теория которых изложена на языке алгебры циркуляционных матриц. На численных примерах проанализована зависимость качества электрометра от структуры и параметров модулятора.

Илл. 4. Табл. 6. Библ. 3. Рез. зст., англ.

УДК 539.194.

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ СПЕКТРЫ РЯДА ВИНИЛОВЫХ СУЛЬФИДОВ.

П и к в е р Р. И., М ё л ь д е р У. Х. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 348, Тарту, 1975, с. 182-188.

В статье анализируются фотоэлектронные спектры пяти сульфидов $C_3H_7S\ CH=CH_2$, $(CH_2=CH)_2S$, $C_6H_5SCH_3$, $C_6H_5SCH_2CH=CH_2$, $C_6H_5SCH=CH_2$, полученных при возбуждении резонансной линией He I. Вертикальные потенциалы ионизации, определенные из спектров, представлены в таблице. Проведена корреляция высших занятых уровней энергии.

Илл. 2. Табл. I. Библ. 4. Рез. зст., англ.
