

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

ALUSTATUD 1893.a. VIINIK 283. ВЫПУСК ОСНОВАНЫ В 1893.г.

# ТРУДЫ ПО АЭРОИОНИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЯМ

V



TARTU 1971

TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI TOIMETISED  
УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ  
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS  
ALUSTATUD 1893.a. VIINIK 283. ВYПУСК ОСНОВАНЫ В 1893.г.

# ТРУДЫ ПО АЭРОИОНИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЯМ

V

TARTU 1971

## КРАТКИЙ ОБЗОР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ ПО АЭРОИОНИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЯМ

Я.Д. Рейнет

Научно-исследовательские работы по аэроионизации и электроаэрозолям, проведенные в Тартуском государственном университете, являются, по данным мировой литературы, из всех осуществленных до сего времени наиболее пространственными и основательными. В 1951 г. Х.Э. Марран и Я.Д. Рейнет при помощи оригинального сконструированного в Тарту счетчика атмосферных ионов (Рейнет, 1955, 1956) провели около 20 000 визуальных измерений концентрации аэроионов от молионов до ультратяжелых ионов. Результаты их научно-исследовательских работ опубликованы в Ученых записках Тартуского государственного университета (ТГУ), Тарту, 1958, вып.59, 71-138.

С 1960 по 1963 гг. П.К. Прюллер тем же счетчиком, снабженным О.В. Саксом автоматическим фоторегистратором (Сакс, 1956) и позже динамическим электрометром и самописцем (Сакс, 1963), провел более обширные измерения концентраций атмосферных ионов (около 40 000 отдельных измерений). Итоги исследовательской работы П.К. Прюллера опубликованы в Ученых записках ТГУ, Тарту, 1970, вып.240.

Кроме указанных вышли из печати еще следующие труды по аэроионизации и электроаэрозолям: Ученые записки ТГУ, Тарту, 1963, вып.140, Ученые записки ТГУ, Тарту, 1967, вып.195. В последнем выпуске напечатана монография Х.Ф. Таммета "Аспирационный метод измерения спектра аэроионов", переведенная в США на английский язык. Следует отметить также Ученые записки ТГУ, Тарту, 1969, вып.239 и Проблемы электроаэрозолей (Материалы научно-технического совещания, Тарту, 15-17 сентября 1969 г., Тарту, 1969).

Ввиду того, что о проведенных в Проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей ТГУ (основанной в 1964 г.) ранних научно-исследовательских работах уже дан краткий обзор в Ученых записках ТГУ, Тарту, 1970, вып.240, здесь упомянем лишь вкратце о важнейших трудах, опубликованных в течение нескольких последних лет.

В области исследования ионизации атмосферы следует выдвинуть длительные измерения концентрации ионов в Тарту, проведенные П.К. Прюллером, которые еще лишний раз подтвердили результаты работы Х.Э. Маррана и Я.Ю. Рейнета и, кроме того, являются ценным сравнительным материалом по изменениям ионизации атмосферы, происходившим одновременно в городе и за его пределами. Автор также показал, что посредством измерений концентраций атмосферных ионов можно быстро оценить чистоту воздуха атмосферы, причем концентрацию аэрозолей в воздухе легко определить по концентрациям легких и тяжелых ионов.

Далее следует отметить труды Х.Ф. Таммета в области теории измерения напряженности электрического поля атмосферы и по усовершенствованию конструкции счетчика аэроионов САИ-ТГУ-66, а также работу Я.И.Сальма о кажущемся спектре аэроионов при учете тепловой диффузии, о действии турбулентности в аспирационном счетчике аэроионов и о разрешающей способности дифференциального счетчика аэроионов первого порядка в зависимости от отношения действующих емкостей.

Из работ О.В. Сакса и В.Я. Ирда необходимо выдвинуть электрометрическое нулевое устройство к счетчику аэроионов для измерения спектра аэроионов.

Заслуживают внимания теоретические и экспериментальные работы Х.Ф. Таммета, Л.Ю. Виснапуу, Я.Ю. Рейнета, Э.Ю. Ютса, А.Я. Хальясте и Э.А. Тетсова в области нейтрализаторов статического электричества, а также работы М.М. Фишера, Я.В. Юпруса и Я.Ю. Рейнета по определению заряда и массы аэрозольных частиц осцилляционным методом.

К наиболее важным трудам, опубликованным в Ученых записках ТГУ, Тарту, 1969, вып.239, следует причислить еще работы Х.Ф. Таммета о вольт-амперных характеристиках идеальной униполярной квазикоронны и вольт-амперных характеристиках тритиевого нейтронизатора статического электричества, а также работы Я.И.Сальма об экспериментальном исследовании действия турбулентной диффузии в аспирационном счетчике аэроионов, О.В. Сакса и Т.В. Мадисе по динамическому конденсатору ДК-64Т и А.Ф. Якобсона, Э.И. Тамма и Я.Ю. Рейнета над генератором электроаэрозолей к аппаратам искусственного дыхания. Новая модель генератора, обладая увеличенным расходом жидкости, пригодна как для введения лекарственных веществ трахеостомированным больным, так и для увлажнения дыхательных путей. Это устройство решено передать в серийное производство.

Э.И. Таммом и М.У. Арольдом описана возможность приспособления визуального нефелометра КОЛ-45 для фотоэлектрических измерений концентрации аэрозоля и предложена методика его калибровки.

Совместно с ВНИИ бумаги была разработана новая методика для измерения заряда волокон, транспортируемых воздушным потоком, которая позволила начать успешное изучение процесса электризации волокон (Виснапуу, Гудин, Лепик, 1970; Гудин, Виснапуу, 1971). Полученные данные позволили проектировать новую бумагоделательную машину повышенной производительности.

Л.Ю. Виснапуу исследованы различные характеристики пневматических генераторов электроаэрозолей, изучены пути увеличения их производительности и надежности работы. Результаты этих исследований нашли успешное применение при совместной работе с ВНИИ ветеринарной санитарии (Рейнет, Виснапуу, Закомырдин, Чкония, 1969), в сотрудничестве с медиками (Виснапуу, Йентс, 1969, 1970). Перспективным является использование генераторов электроаэрозолей при дезинфекции жилых помещений (Виснапуу, Ленцнер, Сийрде, 1971).

В содружестве с ВНИИ медицинского приборостроения разработан генератор электроаэрозолей (Виснапуу, Тамм, Смирнова, Горайнова, Максимова, Прошин, 1971), который в силу его экономичности по сжатому газу найдет широкое применение в медицинской практике.

На кафедре оториноларингологии ТГУ продолжают исследования биологического действия электроаэрозолей как у здоровых, так и у больных лиц, особенно при аллергических заболеваниях верхних дыхательных путей и хроническом тонзиллите. Так, например, исследовали изменения чувствительности рецепторов, температуры и тонуса кровеносных сосудов слизистой оболочки носа и глотки, а также кожи под действием электроаэрозолей (Э.К. Сийрде с соавторами, С.Ф. Сибуль); при этом обращали внимание на проблемы закаливания тела (С.Ф. Сибуль). Изменения на слизистой оболочке изучали люминесцентным методом (А.К. Йентс). В крови исследовали изменения равновесия кислотно-щелочного баланса под действием электроаэрозолей (С.Ф. Сибуль). Как раньше, так и теперь нашли, что отрицательные электроаэрозоли обладают нормализующим действием на организм при его патологических состояниях.

Приняв во внимание плодотворные результаты применения электроаэрозолей в медицине, в будущем намечено расширить использование этого метода как при лечении, так и профилактике. Ведутся работы по созданию устройств для групповой ингаляции и вакцинации. В частности, соответствующие исследования по внедрению указанного способа в ветеринарную практику проводятся Литовским НИИ ветеринарии.

В конце настоящей статьи приведен библиографический список наших последних работ, являющийся продолжением перечня литературы в Ученых записках ТГУ, Тарту, 1970, вып.240, стр. 14-28.

## Л и т е р а т у р а

### Автореферат диссертации

Салым Я.И. Диффузионные искажения при измерении спектра аэроионов. - Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Вильнюс, 1970.

### Статьи

Арольд М.У. Фотоэлектрический метод определения концентрации аэрозоля на основе нефелометра КОД-45. - Материалы 24-й научной студенческой конференции, Тарту, 1969, 9.

Веймер В.А. Наблюдения фаз развития униполярного ВЧ разряда. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 57-67.

Веймер В.А., Куду К.Ф. Об импульсном ВЧ разряде в воздухе в промежутке острие-плоскость. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 215-220.

Виснапуу Л.Ю. Измерения распределения объемной плотности заряда по оси струи пневматического электроаэрозольного генератора. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 14-16.

Виснапуу Л.Ю. О возможностях увеличения удельного заряда аэрозоля, создаваемого пневматическим электроаэрозольным генератором. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 16-17.

Виснапуу Л.Ю. Расчет напряженности электрического поля осесимметричной струи электроаэрозоля и ее взаимодействия на образование заряженных частиц. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 148-155.

Виснапуу Л.Ю., Гуштин А.Е., Лепик М.Э. Об измерениях электростатических зарядов волокнистых материалов, транспортируемых воздушным потоком. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 271-278.

Виснапуу Л.Ю., Йентс А.К. Определение баланса электрических зарядов при ингаляции электроаэрозолей. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 17-18.

Виснапуу Л.Ю., Йентс А.К. О рабочем режиме аэрозольных ингаляторов. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 305-310.

Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю. О создании электрически заряженных аэрозолей в камерах. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 297-304.

Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю., Тетсов Э.А. Сравнительное исследование эффективности нейтрализации электростатических зарядов посредством генераторов аэроионов и электрически заряженного аэрозоля. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 262-270.

Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю., Ютс Э.Ю. Коронный нейтрализатор со сквозным потоком воздуха. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 243-251.

Ирд В.Я. Автоматический счетчик аэроионов с перфорегистратором. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 198-208.

Ирд В.Я. Трехдиапазонный регистратор наличия гроз. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 102-105.

Ирд В.Я. Электрический анеморумбометр с кодовым выходом. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 92-101.

Ирд В.Я., Лепик М.Э. Регистратор автоматического счетчика аэроионов. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 185-191.

Ирд В.Я., Якобсон А.Ф. О применении полупроводниковых логических и функциональных элементов (ЭТ) в автоматическом счетчике аэроионов. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 209-214.



Йентс А.К. Исследование ингалированных в виде аэрозолей и электроаэрозолей люминесцирующих веществ в организме. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 26-28.

Йентс А.К. Об оценке результатов лечения воспалений верхних дыхательных путей люминесцентным методом. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 28-30.

Йентс Э., Каяк Р. Действие однократного применения электроаэрозолей на содержание катехоламинов, связанных с белками плазмы крови, у больных с легочными патологиями. - Материалы докладов X студенческой научной конференции высших учебных медицинских заведений Прибалтийских советских социалистических республик и Белорусской ССР, Рига, 1968, 85-86. - То же. - Материалы 23-й научной студенческой конференции. Часть первая. Медицина, биология, география, геология, физкультура. Тарту, 1969, 21-22.

Куду К.Ф., Веймер В.А. Об условиях возникновения стримеров положительной короны. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 221-233.

Линдмяэ Х., Виснапуу Л. Об аэрозольном способе выявления следов папиллярных узоров. - Сборник материалов научно-практической конференции по процессуальным и методическим вопросам судебной экспертизы. Таллин, 1971, 68-74.

Лоолайд В.Э., Микельсаар Р.Н. О влиянии электроаэрозолей на кислотно-щелочной баланс крови у новорожденных детей. - "Вопросы охраны материнства и детства", М., 1969, № 7, 53-57.

Прюллер П.К. Исследование спектра атмосферных ионов, гигиеническое и биометеорологическое значение ионизации атмосферы по данным измерений в г. Тарту. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 61-139.

Прюллер П., Рийв Я. Погода и здоровье. - Сб. "Погода и здоровье". Общество естествоиспытателей при АН Эст.ССР, Таллин. 1970. 257-271.(На эст. яз.).

Прюллер П.К., Сакс О.В. Счетчик атмосферных ионов с автоматическим фоторегистратором и динамическим электрометром. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 32-60.

Prüller P., Reinert J. Biometeorological Significance of the Study of Atmospheric Ionization and the Phenomena of Fluctuation. - Труды 5-ой Международной конференции по биометеорологии. Монтрё, Швейцария, 31.VIII-6.IX.69.

Раудам Э.И., Рейнет Я.О. Новые аэрозольные генераторы для аппаратов искусственного дыхания. - Материалы Второй конференции нейрохирургов Прибалтийских республик, Тарту, 1969, 169-171.

Раудам Э.И., Рейнет Я.О., Кросс Э.О., Тикк А.А. О применении генераторов аэрозолей и электроаэрозолей совместно с аппаратами искусственного дыхания. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 73-75.

Раудам Э.И., Тикк А.А. Лечение в респираторном центре больных полиомиелитом, осложненным витальными нарушениями. - "Труды Талл. научно-исслед. ин-та эпидемиол., микробиол. и гигиены", Таллин, 1968, вып.2, 215-230.

Raudam E.J., Tikk A.A., Kross E.O. Management of Very Severe Cranioserebral Trauma in the Intensive Care Unit. - IV Symposium Anaesthesiologiae Internationalis. Proceedings, Varna, 1969, VIII, 667-681.

Рейнет Я.О. Универсальный камерный генератор электроаэрозолей для электроаэрозольной терапии и профилактики. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 78-80.

Рейнет Я.О. Краткий обзор научно-исследовательских работ по аэроионизации и электроаэрозолям, проведенных в г. Тарту. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 3-31.

Рейнет Я.О., Виснапуу Л.О., Закомырдин А.А., Чкония Т.Т. Исследование электроаэрозолей дезинфицирующих и инсектицидных препаратов. - "Труды ВНИИ ветеринарной санитарии", М., 1969, т.32, 537-551.

Сакс О.В., Ирд В.Я. Электрометрическое нулевое устройство к счетчику аэроионов. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 192-197.

Сакс О.В., Мадисе Т.В. Динамический конденсатор ДЖ-64 Т. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 106-120.

Салым Я.И. Кажущийся спектр аэроионов при учете тепловой диффузии. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 164-173.

Салым Я.И. Об оптимальном расходе при измерении с помощью счетчика аэроионов. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 80.

Салым Я.И. О действии турбулентности в аспирационном счетчике аэроионов. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 174-180.

Салым Я.И. О стационарной зарядке аэрозолей в несимметричной биполярной ионной атмосфере. - "Физика атмосферы и океана", М., 1971, т.7, № 4, 468-469.

Салым Я.И. Плотность конвективного тока в конденсаторе при наличии диффузии носителей заряда. - "Изв. АН Эст.ССР, Физика, Математика", Таллин, 1970, вып.1, 118-120. (На эст. яз.).

Салым Я.И. Разрешающая способность дифференциального счетчика аэроионов первого порядка в зависимости от отношения действующих емкостей. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 181-184.

Салым Я.И. Экспериментальное исследование действия турбулентной диффузии в аспирационном счетчике аэроионов. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 68-91.

Сибуль С.Ф. Об изменениях чувствительности рецепторов слизистой оболочки носа под влиянием лечения патологических процессов верхних дыхательных путей. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.249, 491-494.

Сибуль С.Ф. О действии электроаэрозолей и аэроионов на температуру слизистой оболочки носа в связи с охлаждением и согреванием рук. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 81-82.

Сибуль С.Ф. О действии электроаэрозолей на кислотно-щелочное равновесие крови у больных аллергической ринопатией. - Проблемы электроаэрозолей. Тарту, 1969, 83.

Сибуль С.Ф. О диагностике и лечении аллергического насморка (ринопатии). - "Ньюкогуде Ээсти Төрвисхойд", Таллин, 1969, № 5, 336-339. (На эст. яз.).

Сибуль С.Ф. Хронаксиметрические исследования при аллергических заболеваниях в оториноларингологии. - Аллергия и реактивность организма, Львов, 1969, т.2, 178-179.

Сийрде Э.К. О функциональных изменениях под действием электроаэрозолей при аллергических явлениях верхних дыхательных путей. - Труды VI съезда оториноларингологов СССР, М., 1970, т.1, 105-106.

Сийрде Э.К., Палы Д.Т., Сийрде Т.Э. Об изменениях чувствительности рецепторов слизистой оболочки в области небных миндалин под действием электроаэрозолей. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 84-87.

Сула Э.В. К общей теории электростатического флюксметра. - "Труды Главной геофизической обсерватории им. Воейкова", Л., 1969, вып.242, 40-44.

Сула Э.В., Рейнет Я.Ю. Некоторые проблемы конструирования медицинских электроаэрозольных генераторов. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 131-140.

Сулби Л.А. О физических основах оценки химического влияния ультразвука. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, 311-322.

Тамм Э.И. Генерирование монодисперсных монозаряженных аэрозолей. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 55-56.

Тамм Э.И., Арольд М.У. Об определении концентрации аэрозоля нефелометрическим методом. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 141-147.

Тамм Э.И., Виснапуу Л.Ю. Пневматический электроаэрозольный генератор с регулируемой дисперсностью аэрозолей. - Проблемы электроаэрозолей. Материалы научно-технического совещания, Тарту, 1969, 56.

Таммет Х.Ф. Вольт-амперные характеристики идеальной униполярной квазикоронны. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 3-34.

Таммет Х.Ф. Вольт-амперные характеристики тритиевого нейтрализатора статического электричества. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 41-46.

Таммет Х.Ф. Вольт-амперные характеристики униполярного коронного разряда. - "Электричество", М., 1970, № 12, 82-83.

Таммет Х.Ф. Действующая ширина идеального проволочного нейтрализатора статического электричества. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 47-52.

Таммет Х.Ф. К теории измерения напряженности атмосферного электрического поля. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 140-156.

Таммет Х.Ф. Счетчик аэроионов САИ-ТГУ-66. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 157-163.

Таммет Х.Ф. Теория простейшей модели плоского нейтрализатора статического электричества. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 234-242.

Таммет Х.Ф., Гросс Л.Г. Краевой эффект в плоском нейтрализаторе статического электричества. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 53-56.

Фишер М.М. Об определении заряда частиц аэрозолей осцилляционным методом. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 290-296.

Хальясте А.Я., Рейнет Я.Ю. Нейтрализаторы статических зарядов. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 252-261.

Идусе Я.Э., Рейнет Я.Ю. Некоторые проблемы в теории фотোগрафического осцилляционного метода, связанные с напряжением, подаваемым на электроды киветы. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1970, вып.240, 279-289.

Якобсон А.Ф., Тамм Э.И., Рейнет Я.Ю. Генераторы электроаэрозолей к аппаратам искусственного дыхания. - "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", Тарту, 1969, вып.239, 122-130.

### Изобретения

Виснапуу Л.Ю. Распылитель. - Авт. св. № 239505 (заявка от 29 марта 1968 г.). Бюлл., 1969, № 11, 76.

Виснапуу Л.Ю., Салльс Я.Ю. Устройство для получения конденсационного тумана. - Авт. св. № 251772 (заявка от 22 мая 1967 г.). Бюлл., 1969, № 28, 62.

Виснапуу Л.Ю., Тамм Э.И., Смирнова Л.А., Горайнова А.А., Максимова О.Н., Пронин В.А. Генератор электроаэрозолей. - Авт. св. № 305080 (заявка от 11 марта 1970 г.). Бюлл., 1971, № 16, 25.

Ирд В.Я., Орав А.Э., Порила Э.Э. Увлажнитель воздуха. - Авт. св. № 226897 (заявка от 19 июля 1967 г.). Бюлл., 1968, № 29, 85.

Рейнет Я.Ю., Виснапуу Л.Ю. Способ нанесения покрытий. - Авт. св. № 240505 (заявка от 3 февраля 1965 г.). Бюлл., 1970, № 27, 223.

Рейнет Я.Ю., Виснапуу Л.Ю. Установка для нанесения покрытий. - Авт. св. № 260154 (заявка от 15 июля 1968 г.). Бюлл., 1970, № 3, 95.

Салым Я.И. Конденсатор счетчика аэроионов. - Авт. св. № 249027 (заявка от 18 апреля 1966 г.). Бюлл., 1969, № 24, 102.

Салым Я.И. Электрический рукоосушитель. - Авт. св. № 269447 (заявка от 17 января 1969 г.). Бюлл., 1970, № 15, 88.

Салым Я.И., Лепик М.Э. Спектрограф аэроионов. - Авт. св. № 236065 (заявка от 6 марта 1967 г.). Бюлл., 1969, № 6, 99.

Сулъби Л.А. Генератор кавитации. - Авт. св. № 237817 (заявка от 9 октября 1967 г.). Бюлл., 1969, № 9, 15.

#### LÜHIÜLEVAADE AERIOONISATSIOONI- JA ELEKTROAERO- SOOLIDE-ALASTEST uurimistöödest

J. Reinet

Resümee

Antakse lühiülevaade tähtsamatest aerioonisatsioon- ja elektroaerosoolide-alastest uurimistöödest, mis on teostatud peamiselt Tartu Riiklikus Ülikoolis.

#### SHORT SURVEY OF INVESTIGATIONS ON AIR IONIZATION AND ELECTROAEROSOLS

J. Reinet

Summary

Below a short survey will be given of the most important investigations on air ionisation and electro-aerosols carried out chiefly at Tartu State University.

РАСЧЕТ АСПИРАЦИОННОГО КОНДЕНСАТОРА  
НА МАКСИМУМ УДЕЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ  
ОСАЖДЕНИЯ АЭРОИОНОВ

Х.Ф. Таммет

1. Введение. Удельной интенсивностью осаждения называется среднее число аэроионов, достигающих за единицу времени единицу площади собирающего электрода измерительного конденсатора. Если спектр определяется анализом осадка, накопленного на собирающем электроде, то удельная интенсивность осаждения может иметь решающее значение для качества спектрометра аэроионов.

Оптимизационный расчет измерительного конденсатора, как и любого прибора, заключается в выявлении таких значений конструкционных параметров, которые технически допустимы и при которых достигается наилучшая возможная комбинация эксплуатационных параметров. Для формирования соответствующей задачи математического планирования (программирования) определяется компромиссная количественная характеристика качества прибора и устанавливается зависимость качества от конструкционных параметров (функция цели). Физическая и техническая часть оптимизации заключаются в составлении формулы качества и неравенств ограничений, все остальное лишь более или менее стандартная вычислительная процедура.

В настоящей статье описывается вариант оптимизационного расчета дифференциального цилиндрического измерительного конденсатора с внутренним собирающим электродом и разделенным потоком воздуха (используется терминология, определенная в работе [Таммет, 1967]). Предпочтительное



внимание обращено на увеличение удельной интенсивности осаждения аэроионов.

## 2. Основные параметры измерительного конденсатора.

К числу основных отнесем следующие параметры:

- $k_0$  - расчетная подвижность,
- $R$  - разрешающая сила для аэроионов с подвижностью  $\sim k_0$ ,
- $j$  - плотность электрического тока над поверхностью внутреннего электрода в области осаждения аэроионов с подвижностью  $\sim k_0$ ,
- $l$  - длина внутреннего электрода от начала до центра осаждения аэроионов с подвижностью  $k_0$  (если  $l$  - полная длина внутреннего электрода, то  $k_0$  - средняя предельная подвижность),
- $r_1$  - радиус внутреннего электрода,
- $r_2$  - радиус внешнего электрода,
- $U$  - напряжение между электродами,
- $\Phi$  - общий расход воздуха через измерительный конденсатор,
- $f$  - отношение расхода исследуемого воздуха (внешний слой) к общему расходу, включающего расход деионизированного воздуха (внутренний слой).

Три первых параметра из списка имеют эксплуатационное значение. Третий из них -  $j$  - рассматривается как количественная характеристика удельной интенсивности осаждения аэроионов.

Шесть последних параметров определяют конструкцию измерительного конденсатора на уровне полноты описания, принятой в настоящей статье. Все остальные конструкционные параметры - функции перечисленных.

Некоторые из конструктивных параметров имеют одновременно и эксплуатационное значение, что будет учтено в формуле качества.

3. Качество измерительного конденсатора. Принимаем качество измерительного конденсатора отличным от нуля лишь тогда, когда действительная расчетная (предельная) подвижность  $k_0$  равна требуемой расчетной подвижности  $k_{\infty}$  и действительная разрешающая сила  $R$  не хуже требуемой разрешающей силы  $R_0$ . Это соглашение позволяет учитывать параметры  $k_0$  и  $R$  лишь в системе ограничений, и основным аргументом качества остается мера удельной интенсивности осаждения аэроионов -  $j$ . Естественно считать качество  $Q$  пропорциональным плотности тока:  $Q \sim j$ .

Плотность тока определяется интегралом

$$j \approx E \int_{k_2}^{k_1} \lambda(k) = E (k_2 - k_1) \tilde{\lambda}(k), \quad (I)$$

где  $E$  - напряженность электрического поля над поверхностью внутреннего электрода,  $(k_1, k_2)$  - промежуток подвижностей около  $k_0$ , ширина которого пропорциональна отношению расходов  $f$ ,  $\lambda(k)$  - спектральная функция проводимости и  $\tilde{\lambda}(k)$  - ее среднее значение в промежутке  $(k_1, k_2)$ . Поскольку  $\lambda(k)$  не зависит от измерительного конденсатора, а  $(k_2 - k_1) \sim f$ , то можно принимать соотношения пропорциональности  $j \sim Ef$  и  $Q \sim Ef$ .

Введем в формулу качества еще следующие множители:

$p_1(r_1)$  - для учета разного удобства разных радиусов внутреннего электрода,

$p_2(r_2)$  - то же для внешнего электрода.

$\frac{1}{1 + (l/l_{cr})^2}$  - для учета неудобств при большой по сравнению с размером  $l_{cr}$  длине измерительного конденсатора,

$\frac{1}{1 + (U/U_{cr})^2}$  - для учета неудобств при высоком напряжении,

$\frac{1}{1+(t/t_{cr})^2}$  - для учета нежелательности большого времени заполнения измерительного конденсатора  $t$ .

Функции  $p_1$  и  $p_2$  и критические значения параметров  $l_{cr}$ ,  $U_{cr}$  и  $t_{cr}$  конкретизируются лишь при решении конкретных задач.

Собирая все множители, получим следующее выражение качества измерительного конденсатора:

$$Q = E f p_1(r_1) p_2(r_2) \frac{1}{1+(l/l_{cr})^2} \frac{1}{1+(U/U_{cr})^2} \frac{1}{1+(t/t_{cr})^2} \cdot (2)$$

4. Ограничения. Два ограничения

$$k_o = k_{oo} \quad (3)$$

$$R > R_o \quad (4)$$

введены уже в предыдущем пункте. Установим еще следующие ограничения:

$$r_1 \in \{R1\}, \quad (5)$$

где  $\{R1\}$  - конечный набор технически возможных значений радиуса внутреннего электрода,

$$r_2 \in \{R2\} \quad (6)$$

аналогично для внешнего электрода,

$$r_2 - r_1 > d_{min}, \quad (7)$$

$$l \leq l_{max}, \quad (8)$$

$$l(r_2 - r_1) \leq (l/d)_{max}, \quad (9)$$

$$v > v_{min}, \quad (10)$$

где  $v$  - средняя линейная скорость воздуха (ограничение необходимо для предотвращения конвекции и других побочных явлений),

$$v \leq v_{\max}, \quad (II)$$

$$Re = \frac{\phi}{\pi v r_2} \leq Re_{\max}, \quad (I2)$$

где  $v$  - кинематическая вязкость воздуха,

$$\phi \leq \phi_{\max}, \quad (I3)$$

$$u \leq u_{\max}, \quad (I4)$$

$$E \leq g E_p, \quad (I5)$$

где  $E_p$  - напряженность коронирования по Пику,

$$E_p = \left( 100 + \frac{30}{\sqrt{r_1; \text{см}}} \right) c g s E_E. \quad (I6)$$

Значение множителя  $g$  определяется по потере надежности работы измерительного конденсатора при напряжениях, превышающих  $g E_p$ . Множитель  $g$  зависит от назначения измерительного конденсатора и в некоторой степени от скорости потока  $v$  и радиусов электродов. Обоснованное значение множителя  $g$  можно пока установить лишь в процессе опытной эксплуатации измерительного конденсатора или его макета. Сведений, помогающих при предварительной оценке величины  $g$ , мало. В работе [ Герасимова, 1939 ] рекомендуется для измерительных конденсаторов с токовым выходом  $g \approx 0,03$ . Известно, что измерительный конденсатор для изучения радиоактивных аэрозлей надежно работал при  $E/E_p \approx 0,3$  [ Стыро, Пестов, 1968 ] .

Кроме перечисленных основных ограничений полезно ввести еще два дополнительных формальных ограничения

$$l \geq l_{\min}, \quad (I7)$$

$$u \geq u_{\min}, \quad (I8)$$

которые позволяют при желании жестко фиксировать параметры  $l$  или  $u$ , принимая, например,  $l_{min} = l_{max}$ .

5. Вспомогательные формулы. Эксплуатационные параметры (кроме разрешающей силы) и вторичные конструкционные параметры, встречающиеся в (2-15), можно выразить через основные конструкционные параметры следующим образом:

$$E = \frac{u}{r_1 \ln(r_2/r_1)}, \quad (19)$$

$$t = \frac{x(r_2^2 - r_1^2) l}{\Phi}, \quad (20)$$

$$k_0 = \frac{\Phi (1-f/2) \ln(r_2/r_1)}{2\pi l u}, \quad (21)$$

$$v = \frac{\Phi}{x(r_2^2 - r_1^2)}. \quad (22)$$

Здесь принято упрощающее предположение

$$l \gg r_2 - r_1, \quad (23)$$

справедливость которого необходимо проверить после решения каждой конкретной задачи.

Теоретические сведения, необходимые для вывода формул, представленных как в этом, так и в следующем пункте, можно найти в работе [Таммет, 1967].

6. Формула разрешающей силы. Если аппаратная функция спектрометра [Салым, 1969] гауссова, то

$$R = \frac{1}{2s}, \quad (24)$$

где  $s$  - относительное стандартное отклонение (коэффициент вариации) подвижности. Относительная дисперсия подвижности  $s^2$

является суммой диффузионного слагаемого  $s_{diff}^2$ , турбулентного слагаемого  $s_{turb}^2$ , слагаемого приближенного дифференцирования по расхожу  $s_{\Delta\phi}^2$  и слагаемого приближенного дифференцирования по длине  $s_{\Delta l}^2$ . Для частных относительных дисперсий имеются формулы [Таммет, 1967]:

$$s_{diff}^2 = \left( \frac{r_2^2 - r_1^2}{2l^2} + \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) \ln \frac{r_2}{r_1} \frac{2KT}{q}, \quad (25)$$

где  $K$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура и  $q$  - заряд аэроионов,

$$s_{turb}^2 \approx \left\{ \frac{r_2^2 - r_1^2}{\sigma l^2} \left[ \left( 1 + \frac{4l^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)^2} \right)^{3/2} - \left( 1 + \frac{4l^2 r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2)^2} \right)^{3/2} \right]^2 \right\} \varepsilon^2 \frac{r_2 - r_1}{1}, \quad (26)$$

где  $\varepsilon$  - некоторая средняя интенсивность турбулентности в измерительном конденсаторе,

$$s_{\Delta\phi}^2 = f^2/12, \quad (27)$$

$$s_{\Delta l}^2 = (\Delta l/l)^2/12, \quad (28)$$

где  $\Delta l$  - длина физического усреднения вдоль внутреннего электрода. В измерительном конденсаторе с токовым выходом  $\Delta l$  - длина задней изолированной части внутреннего электрода, в измерительном конденсаторе спектрометра радиоактивных аэрозолей  $\Delta l$  - длина участка одновременного радиометрирования внутреннего электрода.

Интенсивность турбулентности  $\varepsilon$  в формуле (26) не поддается теоретическому расчету и определяется только экспериментально. Некоторые сведения об этой величине можно найти в работе [Салым, 1969]. Если величина  $\varepsilon$  измерена термоанемометром, то формула (26) - грубое приближение. Если величина  $\varepsilon$  определяется по анализу экспериментальной ап-

паратной функции, то ей можно придать модифицированный смысл, считая формулу (26) точной.

Частные аппаратные функции, зависящие от  $s_{\Delta\phi}^2$  и  $s_{\Delta l}^2$ , не гауссовы, а почти прямоугольны (целесообразны). В случае чисто прямоугольной аппаратной функции формула (24) заменяется на

$$R = \frac{1}{\sqrt{12} \sigma} \quad (29)$$

Строгое определение разрешающей силы при смешанной аппаратной функции усложнено. Поэтому используем интерполяционный прием, заключающийся в применении формулы (24) при замене слагаемых  $s_{\Delta l}^2$  и  $s_{\Delta\phi}^2$  в суммарной дисперсии выражениями  $s_{\Delta l}^2 (1 + 24 R^2 s_{\Delta l}^2)$  и  $s_{\Delta\phi}^2 (1 + 24 R^2 s_{\Delta\phi}^2)$ . Получаемое уравнение

$$\frac{1}{4R^2} = \sigma_{\text{dif}}^2 + \sigma_{\text{turb}}^2 + s_{\Delta\phi}^2 (1 + 24 R^2 s_{\Delta\phi}^2) + s_{\Delta l}^2 (1 + 24 R^2 s_{\Delta l}^2) \quad (30)$$

согласуется с формулой (24), если последние два слагаемых малы, и с формулой (29), если в сумме доминирует одно из последних слагаемых.

7. Формализация и упрощение задачи. Задачу математического планирования можно поставить так: найти значения параметров  $l$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $u$ ,  $\phi$ ,  $f$ , обеспечивающие максимальное возможное значение нелинейного выражения (2) при соблюдении равенств (3, 16, 19-22, 25-28, 30), неравенств (4, 7-15, 17, 18) и отношений включения (5, 6).

В системе ограничений аргумент  $f$  встречается лишь в равенствах (21) и (27). Роль этого аргумента в равенстве (21) второстепенна. Равенство (27) используется лишь при проверке неравенства (4), которое ограничивает значение  $f$  сверху. Поскольку качество пропорционально отношению  $f$ , то всегда выгодно наибольшее значение отношения  $f$ , допускаемое системой ограничений. Поэтому в системе ограничений неравенство (4) может быть заменено на равенство

$$R = R_0. \quad (3I)$$

Равенства (3, 16, 19-22, 25-28, 30, 3I) позволяют все конструкционные параметры выразить через  $l$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  и  $U$ , сокращая размерность задачи до четырех. Единственное усложнение возникнет при исключении величин  $f$  и  $U$  из подсистемы (2I, 27, 30). Однако частные производные выражения (2I) по  $f$  и выражения (30) по  $U$  (учитывая (25)) малы, что гарантирует исключительно быструю сходимость итерационной процедуры по Зейделю.

Если  $l$ ,  $r_1$  и  $r_2$  фиксированы, то система неравенств легко разрешается по отношению к  $U$ . Явно монотонная зависимость качества от напряжения  $U$  позволяет задачу еще упростить, приравняв напряжение всегда к наибольшему допустимому значению. В итоге размерность задачи сокращается до трех, свободными переменными останутся  $l$ ,  $r_1$  и  $r_2$ .

8. Алгоритм оптимизации. Задача, подлежащая решению, существенно нелинейна и частично дискретна. Произвол в определении функций  $p_1$  и  $p_2$  принуждает просмотреть все элементы множества  $\{R1\} \times \{R2\}$ . По третьей переменной можно предполагать унимодальность и использовать какой-нибудь экономный метод непосредственного поиска экстремума.

Разработан конкретный алгоритм, который состоит из основного алгоритма и двух самостоятельных блоков, используемых как подпрограммы:

I блок:

Входные параметры:  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $l$  и  $f$ . Учитывая (2I), из неравенств (10) и (18) определяется наименьшее допустимое значение напряжения  $U_{inf}$  и из неравенств (11-15) наибольшее допустимое значение напряжения. Если это значение ниже  $U_{inf}$ , то логической переменной "разрешение" присваивается значение "истина", иначе "ложь". Выходные параметры: наибольшее допустимое напряжение  $U$  и "разрешение".

II блок:

Входные параметры:  $l$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  и  $U$ . По формулам



(25-28, 30) вычисляется  $f^2$ . Если  $f^2$  неотрицательное реальное число, то вычисляется качество  $Q$  (2), иначе  $f$  приравнивается к нулю и переменной  $Q$  присваивается отрицательное значение, убывающее с увеличением суммы  $s_{dif}^2 + s_{turb}^2 + s_{\Delta l}^2$ . Выходные параметры:  $f$  и  $Q$ .

В обоих блоках используются глобальные постоянные  $\Delta l$ ,  $U_{min}$  и т.д.

Основной алгоритм следующий:

1<sup>0</sup>. Ввод исходных данных:  $k_{oo}$ ,  $R_o$ ,  $\varepsilon$ ,  $g$ ,  $\Delta l$ ,  $l_{min}$ ,  $l_{max}$ ,  $l_{cr}$ ,  $d_{min}$ ,  $(1/d)_{max}$ ,  $t_{cr}$ ,  $U_{min}$ ,  $U_{max}$ ,  $u_{cr}$ ,  $v_{min}$ ,  $v_{max}$ ,  $Re_{max}$ ,  $\Phi_{max}$ , множества  $\{R1\}$ ,  $p_1\{R1\}$ ,  $\{R2\}$ ,  $p_2\{R2\}$ . Переменной  $Q_{max}$  присваивается значение  $-\infty$ .

2<sup>0</sup>. Переменной  $r_1$  присваивается очередное значение из множества  $\{R1\}$  (при первом обращении первое). Вычисляются величины, зависящие только от  $r_1$ .

3<sup>0</sup>. Переменной  $r_2$  присваивается очередное значение из множества  $\{R2\}$  (при первом обращении первое). Вычисляются величины, зависящие только от  $r_1$  и  $r_2$ .

4<sup>0</sup>. Переменной  $l$  присваивается максимальное значение, допускаемое неравенствами (8, 9), и переменной  $f$  значение  $0,7 R$ . Выполняются I, II, I, II.

5<sup>0</sup>. Разыскивается наибольшее допустимое значение переменной  $l$ , по необходимости постепенно уменьшая  $l$  до достижения признака "разрешение" = "истина". На каждом четном шагу выполняется II, на каждом I. Если поиск пойдет без успеха до значения  $\max(l_{min}, R\Delta l)$ , то переход к 10<sup>0</sup>.

6<sup>0</sup>. Найденное верхнее значение переменной уточняется методом дихотомии, используя I, II и признак "разрешение". Запоминается качество.

7<sup>0</sup>. Разыскивается нижнее значение переменной  $l$ . Методом дихотомии ведется поиск в промежутке с нижней гранью  $\max(l_{min}, R\Delta l)$  на признак "разрешение". На каждом шагу выполняются II, I, в начале поиска с повторением. Поиск прек-

рещается, когда шаг станет достаточно мелким или "разрешение" = "истина" и качество хуже, чем при верхнем значении  $l$ .

8°. Разыскивается значение переменной  $l$ , обеспечивающее максимальное качество при текущих значениях  $r_1$  и  $r_2$ . Поиск осуществляется методом золотого сечения в промежутке между нижним и верхним значениями  $l$ . На каждом шагу выполняются I, II.

9°. Если  $Q > Q_{\max}$ , то запоминаются значения  $l$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $u$ ,  $f$ , и переменной  $Q_{\max}$  присваивается значение  $Q$ .

10°. Если множество  $\{R2\}$  не исчерпано, то переход к 3°.

11°. Если множество  $\{R1\}$  не исчерпано, то переход к 2°.

12°. Если  $Q_{\max} > 0$ , то вывод результатов, запомненных в 9°, иначе вывод сообщения "решения нет".

Описанный алгоритм реализован для ЭВМ типа "Минск" с использованием системы трансляции "MAlgOL-22". Время вычислений на "Минск-22" составляет около 1,6 секунд на каждую точку множества  $\{R1\} \times \{R2\}$ .

9. Примеры. Результаты решения семи тестовых задач, характеризующих влияние разных входных постоянных на оптимальные параметры измерительного конденсатора спектрометра радиоактивных аэрозолей, представлены в таблице I.

Столбец с главой 0 соответствует основной задаче, которая имела следующие исходные данные:  $k_{00} = 0,0002 \text{ см}^2 (\text{В.о})$ ,  $R_0 = 5$ ,  $\epsilon = 0,5\%$ ,  $g = 0,2$ ,  $\Delta l = 1 \text{ см}$ ,  $l_{\min} = 0$ ,  $l_{\max} = 2 \text{ м}$ ,  $l_{\text{ср}} = 3 \text{ м}$ ,  $d_{\min} = 4 \text{ мм}$ ,  $(l/d) = 100$ ,  $t_{\text{ср}} = 60 \text{ с}$ ,  $U_{\min} = 0$ ,  $U_{\max} = 6 \text{ кВ}$ ,  $U_{\text{ср}} = 6 \text{ кВ}$ ,  $v_{\min} = 1 \text{ см/с}$ ,  $v_{\max} = 10 \text{ м/с}$ ,  $Re_{\max} = 1000$ ,  $\Phi_{\max} = 10 \text{ л/с}$ ,

$$\{R1\} = \{ 15; 20; 25; 30; 40; 50; 75; 100 \text{ мкм} \},$$

$$p_1 \{R1\} = \{ 0,5; 0,8; 0,9; 0,95; 0,98; 1; 1; 1 \},$$

$$\{R2\} = \{ 5; 7; 10; 12; 15; 20 \text{ мм} \},$$

$$p_2 \{R2\} = \{ 0,85; 0,92; 0,98; 1; 1; 0,98 \}.$$

Заряд аэроионов принимался равным одному элементарному заряду.

Остальные столбцы таблицы соответствуют модифицированным задачам, каждый из которых отличается от основной задачи дважды увеличенным значением одной входной постоянной, указанной в главе столбца.

Таблица I

	0	$R_0$	$\varepsilon$	$g$	$\Delta t$	$t_{ст}$	$v_{min}$	
$l$	15,0	20,7	10,7	16,2	24,4	21,6	21,2	см
$r_1$	25	30	25	25	25	25	25	мкм
$r_2$	7	10	7	10	7	10	7	мм
$u$	591	678	591	1257	591	630	591	В
$v$	1,42	1,00	1,00	1,51	2,30	1,00	2,00	см/с
$f$	18,8	7,14	16,9	19,1	18,1	18,9	18,7	%
$E$	42	39	42	84	42	42	42	кВ/см
$Q$	6,24	2,27	5,64	13,1	6,00	6,69	6,21	кВ/см

Л и т е р а т у р а

- Герасимова М.Н. - 1939 - К методике измерения содержания ионов в атмосфере и о новом счетчике ионов. "Тр. Гл. геофиз. обсерв.", вып. 30, 86-112.
- Салым Я.И. - 1969 - Экспериментальное исследование действия турбулентной диффузии в аспирационном счетчике аэроионов. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", вып. 239, 68-88.
- Стыро Б.И., Пестов В.С. - 1968 - Исследование электрических носителей естественной радиоактивности атмосферы. "Изв. АН СССР, физ. атмосфер. и океана", 4 (№ 8), 850-857.

Таммет И.Ф. - 1967 - Аспиращонный метод измерения спектра аэронозов. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", вып. 195.

## MAKSIMAALSE AEROIOONIDE SADESTUMISE ERILISTE- SIIVSUSEGA ASPIRATSIOONIKONDENSAATORI ARVUTUS

H. Tammet

Resüme

Aeroioonide sadestumise erilistenalivuse mõõduna käsita-  
takse voolutihedust koguva elektroodi pinna kohal. Konkreet-  
seks uurimisobjektiks on silindriline koguva siiselektroodi  
ning jaotatud õhuvooluga diferentsiaalne mõõtekondensaator.  
Ülesande seade arvestab rakendusi peamiselt aerosoolide uuri-  
misel, kõigepealt radioaktiivsete aerosoolide spektromeetrias.

Mõõtekondensaatori konstruktsiooni optimeerimisülesanne  
formuleeritakse matemaatilise planeerimise ülesandena. Sihifunktsioon on valitud niiviisi, et jääb võimalus arvestada  
voolutiheduse kõrval ka kondensaatori põhimõõtmete ning töö-  
pinge tehnilist sobivust. Mõutakse piirliikuvuse ning lahutus-  
võime võrdumist etteantud väärtustega. Kitsenduste hulgas osu-  
tab kõige problemaatilisemaks väljatugevust tõkestav võrratus.  
Sihifunktsiooni koostamisel on üheks olulisemaks ja ühtaegu  
ebamäärasemaks kohaks lahutusvõime valem.

Artikli lõpul esitatakse optimeerimisülesande lahenda-  
mise algoritmi ja näidetena konkreetseid arvutustulemusi.

COMPUTATION OF THE MAXIMUM SETTLING OF AIR IONS  
FOR AN ASPIRATION CAPACITOR OF SPECIFIC INTEN-  
SITY

H. Tammet

Summary

The current density above a collecting electrode is treated as a measure of the specific intensity of the settling of air ions. The particular subject of study is a differential measuring capacitor of a cylindrical collecting internal electrode to which a divided air current is fed. The posing of the problem takes into account applications chiefly to the study of aerosols, primarily in the spectrometry of radioactive aerosols.

The optimization problem of the design of a measuring capacitor is formulated as a problem of mathematical planning. The objective function is chosen so as to provide the possibility of considering, besides the current density, the technical fitness of the main dimensions and the operating voltage of the capacitor. The equality of limiting mobility and of resolving power with the given values is postulated. The inequality bounding the field intensity is the most problematic item among the restrictions. One of the most substantial and at the same time vaguest items is the formula of the resolving power.

At the end of the article an algorithm of the optimization problem is presented and concrete results of computations are given by way of illustration.

## ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА "ОБРАТНОЙ" КВАЗИ-КОРОНЫ МЕЖДУ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

У.Ф. Таммет

1. Введение. В теории униполярного коронного разряда или квазикороны между коаксиальными цилиндрами принималось, что ионы образуются на внутреннем электроде, а внешний электрод пассивен. Задача "обратной" униполярной квазикороны, при которой ионы образуются лишь на внешнем электроде, считалась фиктивной. Оказывается, что эта задача имеет все же некоторое приложение, например, в теории нейтрализаторов статического электричества (заряд расположен на нити и радиоактивный препарат на окружающем ее цилиндре), и поэтому заслуживает определенное внимание.

Настоящая работа является дополнением к статье [Таммет, 1969]. Здесь применяются те же термины и обозначения и принимаются те же допущения, что и в упомянутой статье. Разница в том, что теперь внутренний электрод считается пассивным, а внешний электрод активным.

2. Электрическое поле. Уравнение электрического поля

$$(rE) \, d(rE) = - \frac{J}{2\pi\epsilon k} r \, dr \quad (1)$$

отличается от соответствующего уравнения (16) в статье [Таммет, 1969] знаком перед правой частью. При этом сила тока на единицу длины  $J$  имеет положительные значения, хотя ионы движутся в отрицательном направлении координаты  $r$ . Общее решение уравнения (1) полезно записать в виде

$$(rE)^2 = \frac{J}{2\pi\epsilon k} (\alpha R^2 - r)^2, \quad (2)$$

где в постоянную интегрирования включены радиус эмиттера (внешнего электрода)  $R$  и произвольная постоянная  $\alpha$ .

Учет начального условия

$$(r=R) \Rightarrow (E = E_e) \quad (3)$$

дает

$$\alpha = \frac{2\pi\epsilon k}{J} E_e^2 + 1. \quad (4)$$

Введя обозначение

$$t = \frac{r}{R}, \quad (5)$$

можно привести частное решение к виду

$$E = \frac{E_e}{t} \sqrt{\frac{\alpha - t^2}{\alpha - 1}}. \quad (6)$$

3. Вольтамперная характеристика. Уравнением вольтамперной характеристики служит интеграл напряжения

$$U = \int_R^{r_0} E dr = R \int_{\alpha}^1 E dt = \frac{RE_e}{\sqrt{\alpha - 1}} f(\alpha, \alpha), \quad (7)$$

где  $r_0$  - радиус пассивного внутреннего электрода,

$$\alpha = \frac{r_0}{R} \quad (8)$$

и

$$f(\alpha, \alpha) = \int_{\alpha}^1 \frac{\sqrt{\alpha - t^2}}{t} dt = \sqrt{\alpha - 1} - \sqrt{\alpha - \alpha^2} - \sqrt{\alpha} \ln \left( \alpha \frac{\sqrt{\alpha} + \sqrt{\alpha - 1}}{\sqrt{\alpha} + \sqrt{\alpha - \alpha^2}} \right) \quad (9)$$

В статье [Таммет, 1969] символ  $\alpha$  обозначал обратное отклонение  $R/r_0$ . Кажущееся противоречие в символике исключается, если определить параметр  $\alpha$  как отношение радиуса пассивного электрода к радиусу активного электрода.

Задачи "прямой" и "обратной" квазикоронны разграничиваются по множеству значений параметра  $\alpha$ , в настоящей статье рассматривается подмножество  $(0;1)$ .

Для численного решения уравнению (7) придается вид

$$f(\alpha, \mu) + \frac{\ln \alpha}{\mu} \sqrt{\alpha-1} = 0, \quad (10)$$

где  $\mu$  отношение эмиссионного напряжения  $U_e$  к напряжению  $U$ . Расширив функцию  $C_y(\alpha, \mu)$  на интервал  $0 \leq \alpha < 1$ , можно сохранить использованную в статье [Таммет, 1969] формулу вольтамперной характеристики

$$J = C_y(\alpha, \mu) 2\pi \epsilon k U(U - U_e) / R^2. \quad (11)$$

Функция  $C_y(\alpha, \mu)$  в новой области связана с параметром  $\alpha$  соотношением

$$C_y(\alpha, \mu) = \mu^2 / \left[ \ln^2 \alpha (1-\mu)(\alpha-1) \right]. \quad (12)$$

При табулировании можно эту функцию, как и в случае  $\alpha > 1$ , представить в виде произведения двух сомножителей

$$C_y(\alpha, \mu) = C_{y_0}(\alpha) C_1(\alpha, \mu). \quad (13)$$

4. Предельные случаи. Для осуществления процесса  $\mu \rightarrow 0$  необходимо, чтобы  $E_e \rightarrow 0$ . Тогда  $\alpha \rightarrow 1$  и

$$U = R \sqrt{\frac{J}{2\pi \epsilon k}} \int_{\alpha}^1 \frac{\sqrt{1-t^2}}{t} dt = R \sqrt{\frac{J}{2\pi \epsilon k}} \left( \ln \frac{1 + \sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha} - \sqrt{1-\alpha^2} \right), \quad (14)$$

откуда получается

$$J = \frac{2\pi \epsilon k U^2}{R^2 \left( \ln \frac{1 + \sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha} - \sqrt{1-\alpha^2} \right)^2}. \quad (15)$$



Из формулы (15) вытекает, что в интервале  $0 < \varepsilon < 1$

$$C_{y_0}(\varepsilon) = \frac{1}{\left( \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \varepsilon^2}}{\varepsilon} - \sqrt{1 - \varepsilon^2} \right)^2} \quad (16)$$

В другом важном предельном случае  $\mu \rightarrow 1$  получается

$$C_{y_0}(\varepsilon, 1) = \frac{4}{(1 - \varepsilon^2 + 2 \ln \varepsilon) \ln \varepsilon}, \quad (\varepsilon < 1). \quad (17)$$

Переход  $\varepsilon \rightarrow 0$  дает результат  $C_{y_1}(0, \mu) = 1 + \mu$ , переход  $\varepsilon \rightarrow 1$  результат  $C_{y_1}(1, \mu) = P1(\mu)$ .

5. Функции  $C_{y_0}(\varepsilon)$  и  $C_{y_1}(\varepsilon, \mu)$ . Некоторые значения функции  $C_{y_0}(\varepsilon)$ , вычисленные по формуле (16), представлены в таблице I.

$\varepsilon$	0,001	0,01	0,1	0,276	0,5	0,9
$C_{y_0}(\varepsilon)$	0,023	0,054	0,250	1	4,918	1024

В области  $\varepsilon \approx 1$  функция  $C_{y_0}(\varepsilon)$  почти симметрична:  $C_{y_0}(\varepsilon) \approx C_{y_0}(1/\varepsilon)$ . Вне этой области симметрия ухудшается. Заслуживает внимания, что  $C_{y_0}(0) = 0$ , в то время как  $C_{y_0}(\infty) = 1$ .

Функция  $C_{y_1}(\varepsilon, \mu)$  зависит от аргумента  $\varepsilon$  в области  $\varepsilon \leq 1$  относительно слабо. Некоторые значения этой функции представлены в таблице 2.

Если дополнить рис. I статьи [Таммет, 1969] графиками  $C_{y_1}(\varepsilon, \mu)$  в области  $\varepsilon < 1$ , то дополнительное семейство кривых заполняет площадь между кривой  $\varepsilon = 1$  и прямой  $1 + \mu$ , которая симметрична нижней граничной прямой, соответствующей бесконечному значению аргумента  $\varepsilon$ .

Таблица 2

$\mu$ эе	0	0,05	0,5	1
0,00	1,000	1,000	1,000	1,000
0,05	1,050	1,050	1,049	1,049
0,10	1,100	1,099	1,098	1,097
0,15	1,150	1,148	1,145	1,143
0,20	1,200	1,196	1,192	1,118
0,25	1,250	1,244	1,237	1,232
0,30	1,300	1,292	1,282	1,275
0,35	1,350	1,339	1,326	1,317
0,40	1,400	1,387	1,370	1,358
0,45	1,450	1,433	1,412	1,398
0,50	1,500	1,480	1,455	1,436
0,55	1,550	1,526	1,496	1,474
0,60	1,600	1,572	1,537	1,512
0,65	1,650	1,618	1,577	1,548
0,70	1,700	1,664	1,614	1,583
0,75	1,750	1,709	1,656	1,618
0,80	1,800	1,755	1,695	1,652
0,85	1,850	1,800	1,733	1,685
0,90	1,900	1,845	1,771	1,717
0,95	1,950	1,889	1,808	1,748
1,00	2,000	1,934	1,844	1,778

## Л и т е р а т у р а

Таммет Х.Ф. - 1969 - Вольтамперные характеристики идеальной униполярной квазикорны. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", вып. 239, 3-40.

"PÖÖRATUD" KVAASIKOROONA VOLTAMPEREKARAKTERISTIK  
SILINDRILISTE ELEKTROODIDE KORRAL

H. Tammet  
Resüme

Artikkel on täienduseks autori varasemale tööle (vt. kirjanduse loetelu). Siin uuritakse unipolaarset kvaasikoroona silindriliste elektrodide vahel juhul, kui ioone emitteerib väline elektrood. Sellel seni fiktiivseks loetud ülesandel on rakendusi staatiliste laengute neutralisaatorite teoorias. Lahenduskäigus jälgitakse täpselt viidatud varasemas artiklis kirjeldatud arvutusskeemi, kasutatakse samu tähistusi ning jälgitakse samu lihtsustavaid kokkuleppeid. Defineerides teguri  $\alpha$  passiivse ja aktiivse elektroodi raadiuste suhtena, laiendatakse funktsiooni  $C_y(\alpha, \mu) = C_{y_0}(\alpha) C_{y_1}(\alpha, \mu)$  määramispiirkonda vahemikule  $0 < \alpha < 1$ , säilitades voltamperekarakteristiku valemi endisel kujul (11). Funktsioon  $C_{y_0}(\alpha)$  avaldub uues piirkonnas valemiga (16), mõningaid selle funktsiooni väärtusi on esitatud tabelis 1. Funktsioon  $C_{y_1}(\alpha, \mu)$  pole avaldatav elementaarfunktsioonide kaudu, seda funktsiooni kirjeldab tabel 2.

VOLTAMMETER CHARACTERISTIC OF INVERSE QUASI-CORONA  
FOR CYLINDRICAL ELECTRODES

H. Tammet  
Summary

The present article is meant as a supplement to a previous paper by the author (see References). In this paper the author studies the unipolar quasi-corona between cylindrical electrodes in case an external electrode emits ions. This problem, which hitherto has been considered as fictitious, has applications in the theory of neutralizers of

static charges. In the course of the solution the author strictly follows the algorithm described in the article referred to above, uses the same notations and observes the same approximating conventions. Defining the factor  $\alpha e$  as the ratio of the radii of the passive electrode to those of the active electrode, the domain of determinacy of the function  $C_y(\alpha e, \mu) = C_{y_0}(\alpha e) C_{y_1}(\alpha e, \mu)$  is extended to the range of  $0 < \alpha e < 1$ , preserving the previous form of the formula of the voltammeter characteristic (11). The function  $C_{y_0}(\alpha e)$  is expressed in another domain by formula (16); some values of the function are presented in Table 1. The function  $C_{y_1}(\alpha e, \mu)$  cannot be expressed by elementary functions; this function is described in Table 2.

ТАБЛИЦА СПЕЦИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО  
КОРОННОГО РАЗРЯДА

И. Ф. Таммет

На следующих страницах приведена таблица функции  $C_y(x, \mu)$ , которая определена в статье [Таммет, 1969]. Эта функция используется в выражении вольтамперной характеристики идеальной униполярной квазикоронны между коаксиальными цилиндрическими электродами.

$$J = C_y(x, \mu) \cdot 2\pi\epsilon k U(U - U_e) / R^2 \quad (I)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

- $J$  - сила тока с единицы длины электрода,
- $U$  - напряжение между электродами,
- $U_e$  - эмиссионное (начальное) напряжение разряда,
- $\epsilon$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды,
- $R$  - радиус внешнего электрода,
- $r_0$  - радиус внутреннего электрода (эмиттера),
- $x = R/r_0$ ,
- $\mu = U_e/U$ ,
- $k$  - подвижность ионов.

Л и т е р а т у р а

Таммет И. Ф. - 1969 - Вольтамперные характеристики идеальной униполярной квазикоронны, "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", вып. 239, 3-40.

12	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
0,00	2,007	1,972	1,768	1,686	1,619	1,565	1,519	1,480	1,446	1,417
0,02	2,046	1,908	1,802	1,719	1,651	1,595	1,548	1,508	1,474	1,444
0,04	2,084	1,944	1,836	1,751	1,682	1,625	1,577	1,536	1,501	1,470
0,06	2,121	1,978	1,868	1,781	1,711	1,653	1,604	1,562	1,527	1,496
0,08	2,157	2,011	1,899	1,811	1,739	1,680	1,630	1,588	1,551	1,519
0,10	2,192	2,043	1,929	1,839	1,766	1,706	1,655	1,612	1,575	1,542
0,12	2,226	2,074	1,958	1,867	1,792	1,731	1,679	1,635	1,597	1,564
0,14	2,259	2,105	1,987	1,893	1,818	1,755	1,702	1,658	1,619	1,585
0,16	2,290	2,134	2,014	1,919	1,842	1,778	1,725	1,679	1,640	1,606
0,18	2,321	2,163	2,041	1,944	1,866	1,801	1,746	1,700	1,660	1,625
0,20	2,352	2,190	2,066	1,968	1,888	1,823	1,767	1,720	1,679	1,644
0,22	2,381	2,217	2,091	1,991	1,911	1,844	1,787	1,739	1,698	1,662
0,24	2,409	2,243	2,115	2,014	1,932	1,864	1,807	1,758	1,716	1,679
0,26	2,437	2,268	2,139	2,036	1,953	1,883	1,825	1,776	1,733	1,695
0,28	2,464	2,293	2,161	2,057	1,972	1,902	1,843	1,793	1,749	1,711
0,30	2,491	2,317	2,184	2,078	1,992	1,921	1,861	1,809	1,765	1,726
0,32	2,516	2,340	2,205	2,098	2,010	1,938	1,877	1,825	1,780	1,741
0,34	2,541	2,363	2,226	2,117	2,028	1,955	1,893	1,841	1,795	1,755
0,36	2,565	2,385	2,246	2,136	2,046	1,972	1,909	1,855	1,809	1,769
0,38	2,589	2,406	2,265	2,154	2,063	1,987	1,924	1,870	1,823	1,781
0,40	2,612	2,427	2,284	2,171	2,079	2,003	1,938	1,883	1,835	1,794
0,42	2,634	2,447	2,303	2,188	2,095	2,017	1,952	1,896	1,848	1,805
0,44	2,656	2,466	2,320	2,204	2,110	2,031	1,965	1,909	1,860	1,817
0,46	2,677	2,485	2,337	2,220	2,124	2,045	1,978	1,920	1,871	1,827
0,48	2,697	2,503	2,354	2,235	2,138	2,058	1,990	1,932	1,882	1,837
0,50	2,717	2,521	2,370	2,249	2,152	2,070	2,002	1,943	1,892	1,847
0,52	2,735	2,538	2,385	2,263	2,164	2,082	2,013	1,953	1,901	1,856
0,54	2,754	2,554	2,400	2,277	2,177	2,093	2,023	1,963	1,910	1,865
0,56	2,772	2,570	2,414	2,290	2,188	2,104	2,033	1,972	1,919	1,872
0,58	2,790	2,585	2,427	2,302	2,199	2,114	2,042	1,981	1,927	1,880
0,60	2,806	2,600	2,440	2,313	2,210	2,124	2,051	1,989	1,934	1,887
0,62	2,822	2,614	2,453	2,324	2,220	2,133	2,059	1,996	1,941	1,893
0,64	2,838	2,627	2,464	2,335	2,229	2,141	2,067	2,003	1,948	1,899
0,66	2,852	2,640	2,476	2,345	2,238	2,149	2,074	2,010	1,954	1,904
0,68	2,866	2,652	2,486	2,354	2,246	2,157	2,081	2,016	1,959	1,909
0,70	2,880	2,663	2,496	2,363	2,254	2,164	2,087	2,021	1,964	1,913
0,72	2,893	2,674	2,506	2,371	2,261	2,170	2,092	2,026	1,968	1,917
0,74	2,905	2,684	2,514	2,378	2,268	2,175	2,097	2,030	1,971	1,920
0,76	2,916	2,694	2,522	2,385	2,273	2,180	2,101	2,033	1,974	1,922
0,78	2,927	2,703	2,530	2,391	2,279	2,184	2,105	2,036	1,976	1,924
0,80	2,937	2,711	2,536	2,397	2,283	2,188	2,108	2,038	1,978	1,925
0,82	2,946	2,718	2,542	2,402	2,287	2,191	2,110	2,040	1,979	1,925
0,84	2,954	2,725	2,548	2,406	2,290	2,193	2,111	2,041	1,979	1,925
0,86	2,962	2,731	2,552	2,409	2,292	2,195	2,112	2,041	1,979	1,924
0,88	2,969	2,736	2,556	2,412	2,294	2,195	2,112	2,040	1,977	1,922
0,90	2,975	2,740	2,558	2,413	2,294	2,195	2,111	2,038	1,975	1,920
0,92	2,980	2,743	2,560	2,414	2,294	2,194	2,109	2,036	1,972	1,916
0,94	2,984	2,746	2,561	2,414	2,293	2,192	2,107	2,033	1,968	1,912
0,96	2,987	2,747	2,561	2,413	2,291	2,189	2,103	2,028	1,964	1,906
0,98	2,989	2,748	2,560	2,411	2,288	2,185	2,098	2,023	1,958	1,900
1,00	2,990	2,747	2,558	2,407	2,284	2,180	2,092	2,016	1,950	1,892

$\mu$ \ $\sigma$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,00	1,391	1,348	1,313	1,285	1,261	1,241	1,224	1,209	1,196	1,185
0,02	1,418	1,374	1,339	1,310	1,286	1,265	1,248	1,233	1,219	1,208
0,04	1,444	1,399	1,363	1,333	1,309	1,288	1,270	1,254	1,241	1,229
0,06	1,468	1,422	1,386	1,356	1,330	1,309	1,291	1,275	1,261	1,248
0,08	1,492	1,445	1,407	1,377	1,351	1,329	1,310	1,294	1,279	1,267
0,10	1,514	1,466	1,428	1,396	1,370	1,348	1,328	1,312	1,297	1,284
0,12	1,535	1,487	1,449	1,415	1,388	1,365	1,346	1,329	1,313	1,300
0,14	1,556	1,506	1,466	1,433	1,406	1,382	1,362	1,345	1,329	1,315
0,16	1,575	1,525	1,484	1,451	1,422	1,398	1,378	1,360	1,344	1,330
0,18	1,594	1,543	1,501	1,467	1,438	1,414	1,392	1,374	1,358	1,343
0,20	1,612	1,560	1,517	1,482	1,453	1,428	1,406	1,387	1,371	1,356
0,22	1,630	1,576	1,533	1,497	1,467	1,442	1,419	1,400	1,383	1,368
0,24	1,646	1,592	1,548	1,511	1,481	1,455	1,432	1,412	1,395	1,379
0,26	1,662	1,607	1,562	1,525	1,494	1,467	1,444	1,423	1,406	1,390
0,28	1,678	1,621	1,575	1,538	1,506	1,479	1,455	1,434	1,416	1,400
0,30	1,692	1,635	1,588	1,550	1,517	1,490	1,465	1,444	1,426	1,409
0,32	1,706	1,648	1,601	1,561	1,528	1,500	1,475	1,454	1,435	1,418
0,34	1,720	1,660	1,612	1,572	1,539	1,510	1,485	1,463	1,444	1,426
0,36	1,733	1,672	1,623	1,583	1,549	1,519	1,494	1,471	1,451	1,434
0,38	1,745	1,684	1,634	1,593	1,558	1,528	1,502	1,479	1,459	1,441
0,40	1,757	1,695	1,644	1,602	1,567	1,536	1,510	1,487	1,466	1,447
0,42	1,768	1,705	1,654	1,611	1,575	1,544	1,517	1,493	1,472	1,454
0,44	1,779	1,715	1,663	1,619	1,583	1,551	1,524	1,500	1,478	1,459
0,46	1,789	1,724	1,671	1,627	1,590	1,558	1,530	1,505	1,484	1,464
0,48	1,798	1,733	1,679	1,634	1,596	1,564	1,535	1,511	1,488	1,469
0,50	1,807	1,741	1,686	1,641	1,603	1,569	1,541	1,515	1,493	1,473
0,52	1,816	1,748	1,693	1,647	1,608	1,575	1,545	1,520	1,497	1,476
0,54	1,824	1,755	1,699	1,653	1,613	1,579	1,549	1,523	1,500	1,479
0,56	1,831	1,762	1,705	1,658	1,618	1,583	1,553	1,527	1,503	1,482
0,58	1,838	1,768	1,711	1,663	1,622	1,587	1,556	1,529	1,505	1,484
0,60	1,845	1,774	1,715	1,667	1,626	1,590	1,559	1,532	1,507	1,485
0,62	1,851	1,779	1,720	1,670	1,629	1,592	1,561	1,533	1,508	1,486
0,64	1,856	1,783	1,723	1,673	1,631	1,595	1,563	1,534	1,509	1,487
0,66	1,861	1,787	1,727	1,676	1,633	1,596	1,564	1,535	1,510	1,487
0,68	1,865	1,790	1,729	1,678	1,635	1,597	1,564	1,535	1,509	1,486
0,70	1,869	1,793	1,731	1,680	1,635	1,597	1,564	1,535	1,509	1,485
0,72	1,872	1,795	1,733	1,680	1,636	1,597	1,564	1,534	1,507	1,483
0,74	1,874	1,797	1,734	1,681	1,636	1,597	1,562	1,532	1,505	1,481
0,76	1,876	1,798	1,734	1,680	1,635	1,595	1,561	1,530	1,503	1,478
0,78	1,877	1,798	1,734	1,680	1,633	1,593	1,558	1,527	1,500	1,475
0,80	1,878	1,798	1,733	1,678	1,631	1,591	1,555	1,524	1,496	1,471
0,82	1,878	1,797	1,731	1,676	1,628	1,588	1,552	1,520	1,492	1,466
0,84	1,877	1,796	1,729	1,673	1,625	1,584	1,547	1,515	1,486	1,461
0,86	1,876	1,793	1,726	1,669	1,621	1,579	1,542	1,510	1,481	1,454
0,88	1,873	1,790	1,722	1,665	1,616	1,573	1,536	1,503	1,474	1,447
0,90	1,870	1,786	1,717	1,659	1,610	1,567	1,530	1,496	1,466	1,440
0,92	1,866	1,782	1,712	1,653	1,603	1,560	1,522	1,488	1,456	1,431
0,94	1,862	1,776	1,705	1,646	1,596	1,552	1,513	1,479	1,449	1,421
0,96	1,856	1,769	1,698	1,638	1,587	1,543	1,504	1,469	1,438	1,410
0,98	1,849	1,761	1,689	1,629	1,577	1,532	1,493	1,458	1,427	1,398
1,00	1,840	1,752	1,679	1,618	1,566	1,520	1,481	1,445	1,413	1,385

$\mu$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
0,00	1,175	1,157	1,143	1,131	1,121	1,112	1,105	1,098	1,092	1,087
0,02	1,197	1,179	1,165	1,153	1,142	1,133	1,126	1,119	1,113	1,108
0,04	1,218	1,200	1,185	1,172	1,162	1,152	1,145	1,138	1,131	1,126
0,06	1,237	1,219	1,203	1,190	1,179	1,170	1,162	1,154	1,148	1,142
0,08	1,255	1,236	1,220	1,207	1,196	1,186	1,177	1,170	1,163	1,157
0,10	1,272	1,252	1,236	1,222	1,211	1,201	1,192	1,184	1,177	1,171
0,12	1,288	1,268	1,251	1,237	1,225	1,214	1,205	1,197	1,190	1,183
0,14	1,303	1,282	1,265	1,250	1,238	1,227	1,217	1,209	1,201	1,195
0,16	1,317	1,295	1,278	1,262	1,250	1,238	1,229	1,220	1,212	1,205
0,18	1,330	1,308	1,290	1,274	1,261	1,249	1,239	1,230	1,222	1,215
0,20	1,343	1,320	1,301	1,285	1,271	1,259	1,249	1,239	1,231	1,224
0,22	1,354	1,331	1,311	1,295	1,281	1,269	1,258	1,248	1,239	1,232
0,24	1,365	1,341	1,321	1,304	1,290	1,277	1,266	1,256	1,247	1,239
0,26	1,376	1,351	1,330	1,313	1,298	1,285	1,274	1,263	1,254	1,246
0,28	1,385	1,360	1,339	1,321	1,306	1,292	1,280	1,270	1,260	1,252
0,30	1,394	1,368	1,347	1,329	1,313	1,299	1,287	1,276	1,266	1,257
0,32	1,403	1,376	1,354	1,335	1,319	1,305	1,293	1,281	1,271	1,262
0,34	1,411	1,384	1,361	1,342	1,325	1,311	1,298	1,286	1,276	1,267
0,36	1,418	1,390	1,367	1,348	1,331	1,316	1,302	1,291	1,280	1,270
0,38	1,425	1,396	1,373	1,353	1,335	1,320	1,307	1,294	1,284	1,274
0,40	1,431	1,402	1,378	1,357	1,340	1,324	1,310	1,298	1,287	1,276
0,42	1,437	1,407	1,383	1,362	1,343	1,327	1,313	1,301	1,289	1,279
0,44	1,442	1,412	1,387	1,365	1,347	1,330	1,316	1,303	1,291	1,280
0,46	1,447	1,416	1,390	1,368	1,349	1,333	1,318	1,305	1,293	1,282
0,48	1,451	1,420	1,394	1,371	1,352	1,335	1,320	1,306	1,294	1,283
0,50	1,454	1,423	1,396	1,373	1,354	1,336	1,321	1,307	1,294	1,283
0,52	1,458	1,425	1,398	1,375	1,355	1,337	1,321	1,307	1,294	1,283
0,54	1,460	1,428	1,400	1,376	1,356	1,338	1,322	1,307	1,294	1,282
0,56	1,463	1,429	1,401	1,377	1,356	1,338	1,321	1,306	1,293	1,281
0,58	1,464	1,430	1,402	1,377	1,356	1,337	1,320	1,305	1,292	1,279
0,60	1,465	1,431	1,402	1,377	1,355	1,336	1,319	1,304	1,290	1,277
0,62	1,466	1,431	1,402	1,376	1,354	1,335	1,317	1,302	1,288	1,275
0,64	1,466	1,431	1,401	1,375	1,353	1,333	1,315	1,299	1,285	1,272
0,66	1,466	1,430	1,399	1,373	1,350	1,330	1,312	1,296	1,282	1,268
0,68	1,465	1,429	1,398	1,371	1,348	1,327	1,309	1,293	1,278	1,264
0,70	1,464	1,427	1,395	1,368	1,345	1,324	1,305	1,288	1,273	1,260
0,72	1,462	1,424	1,392	1,365	1,341	1,320	1,301	1,284	1,268	1,254
0,74	1,459	1,421	1,389	1,361	1,336	1,315	1,296	1,279	1,263	1,249
0,76	1,456	1,417	1,385	1,356	1,332	1,310	1,290	1,273	1,257	1,242
0,78	1,452	1,413	1,380	1,351	1,326	1,304	1,284	1,266	1,250	1,236
0,80	1,448	1,408	1,374	1,345	1,320	1,297	1,277	1,259	1,243	1,228
0,82	1,443	1,403	1,368	1,339	1,313	1,290	1,270	1,252	1,235	1,220
0,84	1,437	1,396	1,362	1,332	1,306	1,282	1,262	1,243	1,226	1,211
0,86	1,431	1,389	1,354	1,324	1,297	1,274	1,253	1,234	1,217	1,201
0,88	1,423	1,382	1,346	1,315	1,288	1,265	1,243	1,224	1,207	1,191
0,90	1,415	1,373	1,337	1,306	1,278	1,254	1,233	1,213	1,196	1,180
0,92	1,406	1,363	1,327	1,295	1,267	1,243	1,221	1,201	1,184	1,167
0,94	1,396	1,353	1,316	1,284	1,256	1,231	1,209	1,189	1,171	1,154
0,96	1,385	1,341	1,303	1,271	1,243	1,217	1,195	1,175	1,156	1,139
0,98	1,373	1,328	1,290	1,257	1,228	1,203	1,180	1,159	1,141	1,123
1,00	1,359	1,314	1,275	1,242	1,212	1,186	1,163	1,142	1,123	1,106



$\mu$	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
0,00	1,083	1,073	1,065	1,059	1,054	1,050	1,046	1,043	1,040	1,038
0,02	1,103	1,093	1,085	1,079	1,074	1,069	1,065	1,062	1,059	1,057
0,04	1,121	1,111	1,103	1,096	1,090	1,086	1,082	1,078	1,075	1,072
0,06	1,137	1,127	1,118	1,111	1,105	1,100	1,096	1,092	1,089	1,086
0,08	1,152	1,141	1,132	1,124	1,118	1,113	1,108	1,104	1,100	1,097
0,10	1,165	1,154	1,144	1,136	1,130	1,124	1,119	1,115	1,111	1,107
0,12	1,177	1,165	1,155	1,147	1,140	1,134	1,129	1,124	1,120	1,116
0,14	1,189	1,176	1,165	1,157	1,149	1,143	1,137	1,133	1,128	1,124
0,16	1,199	1,185	1,175	1,165	1,158	1,151	1,145	1,140	1,135	1,131
0,18	1,208	1,194	1,183	1,173	1,165	1,158	1,152	1,147	1,142	1,137
0,20	1,217	1,202	1,190	1,180	1,172	1,165	1,158	1,152	1,147	1,143
0,22	1,225	1,209	1,197	1,187	1,178	1,170	1,163	1,157	1,152	1,147
0,24	1,232	1,216	1,203	1,192	1,183	1,175	1,168	1,162	1,156	1,151
0,26	1,238	1,222	1,209	1,197	1,188	1,179	1,172	1,165	1,160	1,154
0,28	1,244	1,227	1,213	1,202	1,192	1,183	1,175	1,169	1,162	1,157
0,30	1,249	1,232	1,218	1,206	1,195	1,186	1,178	1,171	1,165	1,159
0,32	1,254	1,236	1,221	1,209	1,198	1,189	1,180	1,173	1,166	1,160
0,34	1,258	1,240	1,224	1,211	1,200	1,191	1,182	1,175	1,168	1,161
0,36	1,262	1,243	1,227	1,214	1,202	1,192	1,183	1,175	1,168	1,162
0,38	1,265	1,245	1,229	1,215	1,204	1,193	1,184	1,176	1,169	1,162
0,40	1,267	1,247	1,231	1,216	1,204	1,194	1,184	1,176	1,168	1,161
0,42	1,269	1,249	1,232	1,217	1,205	1,194	1,184	1,175	1,168	1,160
0,44	1,271	1,250	1,232	1,217	1,204	1,193	1,183	1,174	1,166	1,159
0,46	1,272	1,250	1,232	1,217	1,204	1,192	1,182	1,173	1,165	1,157
0,48	1,272	1,250	1,232	1,216	1,203	1,191	1,180	1,171	1,162	1,155
0,50	1,272	1,250	1,231	1,215	1,201	1,189	1,178	1,169	1,160	1,152
0,52	1,272	1,249	1,230	1,213	1,199	1,187	1,176	1,166	1,157	1,149
0,54	1,271	1,248	1,228	1,211	1,197	1,184	1,173	1,163	1,153	1,145
0,56	1,270	1,246	1,226	1,209	1,194	1,181	1,169	1,159	1,149	1,141
0,58	1,268	1,243	1,223	1,206	1,190	1,177	1,165	1,155	1,145	1,136
0,60	1,266	1,241	1,220	1,202	1,186	1,173	1,161	1,150	1,140	1,131
0,62	1,263	1,237	1,216	1,198	1,182	1,168	1,156	1,145	1,135	1,126
0,64	1,260	1,234	1,212	1,193	1,177	1,163	1,151	1,139	1,129	1,120
0,66	1,256	1,229	1,207	1,188	1,172	1,158	1,145	1,133	1,123	1,113
0,68	1,252	1,225	1,202	1,183	1,166	1,151	1,138	1,127	1,116	1,106
0,70	1,247	1,219	1,196	1,177	1,160	1,145	1,132	1,120	1,109	1,099
0,72	1,242	1,214	1,190	1,170	1,153	1,138	1,124	1,112	1,101	1,091
0,74	1,236	1,207	1,183	1,163	1,146	1,130	1,116	1,104	1,093	1,082
0,76	1,229	1,200	1,176	1,155	1,138	1,122	1,108	1,095	1,084	1,073
0,78	1,222	1,193	1,168	1,147	1,129	1,113	1,099	1,086	1,074	1,064
0,80	1,214	1,185	1,160	1,138	1,120	1,103	1,089	1,076	1,064	1,053
0,82	1,206	1,176	1,150	1,129	1,110	1,093	1,078	1,065	1,053	1,042
0,84	1,197	1,166	1,140	1,118	1,099	1,082	1,067	1,054	1,042	1,031
0,86	1,187	1,156	1,130	1,107	1,088	1,071	1,056	1,042	1,030	1,018
0,88	1,176	1,145	1,118	1,095	1,076	1,058	1,043	1,029	1,016	1,005
0,90	1,165	1,133	1,106	1,083	1,063	1,045	1,029	1,015	1,002	0,991
0,92	1,152	1,120	1,092	1,069	1,049	1,031	1,015	1,000	0,987	0,976
0,94	1,139	1,106	1,078	1,054	1,033	1,015	0,999	0,984	0,971	0,959
0,96	1,124	1,090	1,062	1,038	1,017	0,999	0,982	0,967	0,954	0,942
0,98	1,108	1,074	1,045	1,020	0,999	0,980	0,964	0,949	0,935	0,923
1,00	1,090	1,055	1,026	1,001	0,979	0,960	0,943	0,928	0,914	0,902

$\mu$ \ $\alpha$	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
0,00	1,036	1,032	1,029	1,027	1,025	1,023	1,021	1,020	1,019	1,018
0,02	1,054	1,051	1,047	1,045	1,043	1,041	1,039	1,037	1,036	1,035
0,04	1,070	1,066	1,062	1,059	1,057	1,055	1,053	1,051	1,050	1,048
0,06	1,083	1,078	1,075	1,072	1,069	1,066	1,064	1,062	1,061	1,059
0,08	1,094	1,090	1,085	1,082	1,079	1,076	1,074	1,072	1,070	1,068
0,10	1,104	1,099	1,095	1,091	1,087	1,084	1,082	1,079	1,077	1,075
0,12	1,113	1,107	1,102	1,098	1,095	1,091	1,089	1,086	1,084	1,081
0,14	1,121	1,115	1,109	1,105	1,101	1,097	1,094	1,091	1,089	1,086
0,16	1,127	1,121	1,115	1,110	1,106	1,102	1,099	1,096	1,093	1,091
0,18	1,133	1,126	1,120	1,115	1,111	1,107	1,103	1,100	1,097	1,094
0,20	1,138	1,131	1,125	1,119	1,114	1,110	1,106	1,103	1,099	1,097
0,22	1,143	1,135	1,128	1,122	1,117	1,113	1,109	1,105	1,102	1,098
0,24	1,146	1,138	1,131	1,125	1,120	1,115	1,110	1,107	1,103	1,100
0,26	1,149	1,141	1,133	1,127	1,121	1,116	1,112	1,108	1,104	1,100
0,28	1,152	1,143	1,135	1,128	1,122	1,117	1,112	1,108	1,104	1,101
0,30	1,154	1,144	1,136	1,129	1,123	1,118	1,113	1,108	1,104	1,100
0,32	1,155	1,145	1,137	1,130	1,123	1,117	1,112	1,107	1,103	1,099
0,34	1,156	1,146	1,137	1,129	1,123	1,117	1,111	1,106	1,102	1,098
0,36	1,156	1,145	1,137	1,129	1,122	1,116	1,110	1,105	1,100	1,096
0,38	1,156	1,145	1,136	1,128	1,120	1,114	1,108	1,103	1,098	1,094
0,40	1,155	1,144	1,134	1,126	1,118	1,112	1,106	1,000	1,095	1,091
0,42	1,154	1,142	1,132	1,124	1,116	1,109	1,103	1,097	1,092	1,087
0,44	1,152	1,140	1,130	1,121	1,113	1,106	1,100	1,094	1,089	1,084
0,46	1,150	1,138	1,127	1,118	1,110	1,103	1,096	1,090	1,085	1,080
0,48	1,148	1,135	1,124	1,115	1,106	1,099	1,092	1,086	1,080	1,075
0,50	1,145	1,132	1,121	1,111	1,102	1,095	1,088	1,081	1,075	1,070
0,52	1,141	1,128	1,117	1,107	1,098	1,090	1,083	1,076	1,070	1,065
0,54	1,137	1,124	1,112	1,102	1,093	1,085	1,077	1,071	1,065	1,059
0,56	1,133	1,119	1,107	1,097	1,087	1,079	1,072	1,065	1,058	1,053
0,58	1,128	1,114	1,102	1,091	1,082	1,073	1,065	1,058	1,052	1,046
0,60	1,123	1,109	1,096	1,085	1,075	1,067	1,059	1,052	1,045	1,039
0,62	1,117	1,103	1,090	1,079	1,069	1,060	1,052	1,044	1,038	1,031
0,64	1,111	1,096	1,083	1,072	1,061	1,052	1,044	1,037	1,030	1,023
0,66	1,105	1,089	1,076	1,064	1,054	1,045	1,036	1,028	1,021	1,015
0,68	1,097	1,082	1,068	1,056	1,046	1,036	1,028	1,020	1,013	1,006
0,70	1,090	1,074	1,060	1,048	1,037	1,027	1,019	1,011	1,003	0,997
0,72	1,082	1,065	1,051	1,039	1,028	1,018	1,009	1,001	0,994	0,987
0,74	1,073	1,056	1,042	1,029	1,018	1,008	0,999	0,991	0,983	0,976
0,76	1,064	1,047	1,032	1,019	1,008	0,998	0,989	0,980	0,973	0,965
0,78	1,054	1,037	1,022	1,009	0,997	0,987	0,977	0,969	0,961	0,954
0,80	1,043	1,026	1,011	0,998	0,986	0,975	0,966	0,957	0,949	0,942
0,82	1,032	1,015	0,999	0,986	0,974	0,963	0,953	0,944	0,936	0,929
0,84	1,021	1,002	0,987	0,973	0,961	0,950	0,940	0,931	0,923	0,915
0,86	1,008	0,990	0,974	0,960	0,947	0,936	0,926	0,917	0,909	0,901
0,88	0,994	0,976	0,960	0,946	0,933	0,922	0,912	0,902	0,894	0,886
0,90	0,980	0,961	0,945	0,931	0,918	0,906	0,896	0,887	0,878	0,870
0,92	0,965	0,946	0,929	0,914	0,901	0,890	0,879	0,870	0,861	0,853
0,94	0,948	0,929	0,912	0,897	0,884	0,872	0,862	0,852	0,843	0,835
0,96	0,931	0,911	0,894	0,879	0,865	0,853	0,842	0,833	0,824	0,815
0,98	0,911	0,891	0,874	0,858	0,845	0,833	0,822	0,812	0,802	0,794
1,00	0,890	0,869	0,852	0,836	0,822	0,810	0,799	0,788	0,779	0,771

$\frac{z}{h}$	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380
0,00	1,016	1,014	1,013	1,012	1,011	1,011	1,010	1,009	1,009	1,008
0,02	1,033	1,031	1,030	1,029	1,028	1,027	1,026	1,025	1,025	1,024
0,04	1,046	1,044	1,042	1,041	1,040	1,039	1,038	1,037	1,036	1,035
0,06	1,056	1,054	1,052	1,050	1,049	1,048	1,046	1,045	1,044	1,043
0,08	1,065	1,062	1,060	1,058	1,056	1,055	1,053	1,052	1,051	1,050
0,10	1,072	1,069	1,066	1,064	1,062	1,060	1,059	1,057	1,056	1,055
0,12	1,078	1,074	1,072	1,069	1,067	1,065	1,063	1,061	1,060	1,058
0,14	1,082	1,079	1,076	1,073	1,070	1,068	1,066	1,064	1,063	1,061
0,16	1,086	1,082	1,079	1,076	1,073	1,071	1,069	1,066	1,065	1,063
0,18	1,089	1,085	1,081	1,078	1,075	1,072	1,070	1,068	1,066	1,064
0,20	1,091	1,087	1,083	1,080	1,076	1,074	1,071	1,069	1,066	1,064
0,22	1,093	1,088	1,084	1,080	1,077	1,074	1,071	1,069	1,066	1,064
0,24	1,094	1,089	1,084	1,081	1,077	1,074	1,071	1,068	1,066	1,063
0,26	1,094	1,089	1,084	1,080	1,076	1,073	1,070	1,067	1,064	1,062
0,28	1,094	1,088	1,084	1,079	1,075	1,072	1,068	1,065	1,062	1,060
0,30	1,093	1,087	1,082	1,078	1,074	1,070	1,066	1,063	1,060	1,058
0,32	1,092	1,086	1,081	1,076	1,071	1,067	1,064	1,061	1,058	1,055
0,34	1,090	1,084	1,078	1,073	1,069	1,065	1,061	1,057	1,054	1,051
0,36	1,088	1,082	1,076	1,070	1,066	1,061	1,058	1,054	1,051	1,048
0,38	1,086	1,079	1,073	1,067	1,062	1,058	1,054	1,050	1,047	1,043
0,40	1,082	1,075	1,069	1,063	1,058	1,054	1,049	1,046	1,042	1,039
0,42	1,079	1,072	1,065	1,059	1,054	1,049	1,045	1,041	1,037	1,034
0,44	1,075	1,067	1,061	1,055	1,049	1,044	1,040	1,036	1,032	1,028
0,46	1,071	1,063	1,056	1,050	1,044	1,039	1,034	1,030	1,026	1,022
0,48	1,066	1,058	1,050	1,044	1,038	1,033	1,028	1,024	1,020	1,016
0,50	1,061	1,052	1,045	1,038	1,032	1,027	1,022	1,018	1,013	1,010
0,52	1,055	1,046	1,039	1,032	1,026	1,020	1,015	1,011	1,006	1,002
0,54	1,049	1,040	1,032	1,025	1,019	1,013	1,008	1,004	0,999	0,995
0,56	1,042	1,033	1,025	1,018	1,012	1,006	1,001	0,996	0,991	0,987
0,58	1,035	1,026	1,018	1,011	1,004	0,998	0,993	0,988	0,983	0,979
0,60	1,028	1,019	1,010	1,003	0,996	0,990	0,985	0,979	0,975	0,970
0,62	1,020	1,011	1,002	0,995	0,988	0,982	0,976	0,971	0,966	0,961
0,64	1,012	1,002	0,994	0,986	0,979	0,972	0,967	0,961	0,956	0,952
0,66	1,003	0,993	0,985	0,977	0,969	0,963	0,957	0,952	0,947	0,942
0,68	0,994	0,984	0,975	0,967	0,960	0,953	0,947	0,941	0,936	0,931
0,70	0,985	0,974	0,965	0,957	0,949	0,943	0,936	0,931	0,926	0,921
0,72	0,975	0,964	0,955	0,946	0,939	0,932	0,925	0,920	0,914	0,909
0,74	0,964	0,953	0,944	0,935	0,927	0,920	0,914	0,908	0,903	0,898
0,76	0,953	0,942	0,932	0,923	0,915	0,908	0,902	0,896	0,890	0,885
0,78	0,941	0,930	0,920	0,911	0,903	0,896	0,889	0,883	0,877	0,872
0,80	0,929	0,917	0,907	0,898	0,890	0,883	0,876	0,870	0,864	0,859
0,82	0,916	0,904	0,894	0,885	0,876	0,869	0,862	0,856	0,850	0,845
0,84	0,902	0,890	0,880	0,870	0,862	0,854	0,847	0,841	0,835	0,830
0,86	0,887	0,875	0,865	0,855	0,847	0,839	0,832	0,826	0,820	0,814
0,88	0,872	0,860	0,849	0,840	0,831	0,823	0,816	0,809	0,803	0,798
0,90	0,856	0,844	0,833	0,823	0,814	0,806	0,799	0,792	0,786	0,780
0,92	0,839	0,826	0,815	0,805	0,796	0,788	0,781	0,774	0,768	0,762
0,94	0,820	0,807	0,796	0,786	0,777	0,769	0,762	0,755	0,748	0,742
0,96	0,800	0,787	0,776	0,766	0,757	0,748	0,741	0,734	0,727	0,721
0,98	0,779	0,766	0,754	0,744	0,734	0,726	0,718	0,711	0,705	0,699
1,00	0,755	0,742	0,730	0,719	0,710	0,701	0,694	0,686	0,680	0,673

$\mu$	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850
0,00	1,008	1,007	1,006	1,006	1,005	1,005	1,005	1,004	1,004	1,004
0,02	1,024	1,022	1,022	1,021	1,020	1,020	1,019	1,018	1,018	1,018
0,04	1,034	1,033	1,032	1,031	1,030	1,029	1,028	1,027	1,027	1,026
0,06	1,043	1,041	1,039	1,038	1,036	1,035	1,034	1,033	1,033	1,032
0,08	1,049	1,046	1,044	1,043	1,041	1,040	1,039	1,038	1,037	1,036
0,10	1,053	1,051	1,049	1,047	1,045	1,043	1,042	1,041	1,040	1,038
0,12	1,057	1,054	1,051	1,049	1,047	1,046	1,044	1,043	1,041	1,040
0,14	1,060	1,056	1,053	1,051	1,049	1,047	1,045	1,043	1,042	1,041
0,16	1,061	1,058	1,055	1,052	1,049	1,047	1,045	1,043	1,042	1,040
0,18	1,062	1,058	1,055	1,052	1,049	1,047	1,045	1,043	1,041	1,039
0,20	1,062	1,058	1,055	1,051	1,049	1,046	1,044	1,042	1,040	1,038
0,22	1,062	1,058	1,054	1,050	1,047	1,044	1,042	1,040	1,038	1,036
0,24	1,061	1,056	1,052	1,048	1,045	1,042	1,040	1,037	1,035	1,033
0,26	1,060	1,054	1,050	1,046	1,043	1,040	1,037	1,034	1,032	1,030
0,28	1,058	1,052	1,048	1,043	1,040	1,037	1,034	1,031	1,029	1,026
0,30	1,055	1,049	1,044	1,040	1,036	1,033	1,030	1,027	1,025	1,022
0,32	1,052	1,046	1,041	1,036	1,033	1,029	1,026	1,023	1,020	1,018
0,34	1,049	1,042	1,037	1,032	1,028	1,024	1,021	1,018	1,015	1,013
0,36	1,045	1,038	1,033	1,028	1,023	1,020	1,016	1,013	1,010	1,007
0,38	1,040	1,034	1,028	1,023	1,018	1,014	1,011	1,007	1,004	1,001
0,40	1,036	1,029	1,023	1,017	1,013	1,009	1,005	1,001	0,998	0,995
0,42	1,030	1,023	1,017	1,012	1,007	1,003	0,999	0,995	0,992	0,989
0,44	1,025	1,018	1,011	1,005	1,001	0,996	0,992	0,988	0,985	0,982
0,46	1,019	1,011	1,005	0,999	0,994	0,989	0,985	0,981	0,978	0,974
0,48	1,013	1,005	0,998	0,992	0,987	0,982	0,978	0,974	0,970	0,967
0,50	1,006	0,998	0,991	0,985	0,979	0,974	0,970	0,966	0,962	0,959
0,52	0,999	0,990	0,983	0,977	0,971	0,966	0,962	0,958	0,954	0,950
0,54	0,991	0,983	0,975	0,969	0,963	0,958	0,953	0,949	0,945	0,942
0,56	0,983	0,975	0,967	0,960	0,954	0,949	0,944	0,940	0,936	0,932
0,58	0,975	0,966	0,958	0,951	0,945	0,940	0,935	0,931	0,927	0,923
0,60	0,966	0,957	0,949	0,942	0,936	0,931	0,925	0,921	0,917	0,913
0,62	0,957	0,948	0,940	0,932	0,926	0,921	0,915	0,911	0,907	0,903
0,64	0,948	0,938	0,930	0,922	0,916	0,910	0,905	0,900	0,896	0,892
0,66	0,937	0,928	0,919	0,912	0,905	0,899	0,894	0,889	0,885	0,881
0,68	0,927	0,917	0,908	0,901	0,894	0,888	0,883	0,878	0,873	0,869
0,70	0,916	0,906	0,897	0,890	0,883	0,877	0,871	0,866	0,861	0,857
0,72	0,905	0,894	0,885	0,878	0,871	0,864	0,859	0,854	0,849	0,845
0,74	0,893	0,882	0,873	0,865	0,858	0,852	0,846	0,841	0,836	0,832
0,76	0,880	0,870	0,860	0,852	0,845	0,839	0,833	0,828	0,823	0,818
0,78	0,867	0,856	0,847	0,839	0,832	0,825	0,819	0,814	0,809	0,804
0,80	0,854	0,843	0,833	0,825	0,817	0,811	0,805	0,799	0,794	0,790
0,82	0,840	0,828	0,819	0,810	0,803	0,796	0,790	0,784	0,779	0,774
0,84	0,825	0,813	0,803	0,795	0,787	0,780	0,774	0,768	0,763	0,758
0,86	0,809	0,797	0,787	0,779	0,771	0,764	0,758	0,752	0,747	0,742
0,88	0,793	0,781	0,771	0,762	0,754	0,747	0,740	0,735	0,729	0,724
0,90	0,775	0,763	0,753	0,744	0,736	0,729	0,722	0,716	0,711	0,706
0,92	0,757	0,745	0,734	0,725	0,717	0,710	0,703	0,697	0,692	0,687
0,94	0,737	0,725	0,714	0,705	0,697	0,689	0,683	0,676	0,671	0,666
0,96	0,716	0,703	0,693	0,683	0,675	0,667	0,661	0,654	0,649	0,644
0,98	0,693	0,680	0,669	0,660	0,651	0,644	0,637	0,631	0,625	0,620
1,00	0,668	0,655	0,644	0,634	0,625	0,618	0,611	0,604	0,598	0,593



$\mu$	2200	2400	2600	2800	3000	3500	4000	4500	5000	5500
0,00	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001
0,02	1,013	1,013	1,012	1,012	1,012	1,011	1,011	1,010	1,010	1,010
0,04	1,019	1,018	1,018	1,017	1,017	1,016	1,015	1,014	1,014	1,013
0,06	1,022	1,021	1,021	1,020	1,019	1,018	1,017	1,016	1,015	1,015
0,08	1,024	1,023	1,022	1,021	1,020	1,019	1,017	1,016	1,015	1,014
0,10	1,024	1,023	1,022	1,021	1,020	1,018	1,017	1,015	1,014	1,013
0,12	1,023	1,022	1,021	1,020	1,019	1,017	1,015	1,013	1,012	1,011
0,14	1,022	1,020	1,019	1,018	1,017	1,014	1,012	1,011	1,009	1,008
0,16	1,020	1,018	1,017	1,015	1,014	1,011	1,009	1,007	1,006	1,004
0,18	1,017	1,015	1,014	1,012	1,011	1,008	1,005	1,003	1,001	1,000
0,20	1,014	1,012	1,010	1,008	1,007	1,004	1,001	0,999	0,997	0,995
0,22	1,010	1,008	1,006	1,004	1,002	0,999	0,996	0,994	0,992	0,990
0,24	1,005	1,003	1,001	0,999	0,998	0,994	0,991	0,988	0,986	0,984
0,26	1,000	0,998	0,996	0,994	0,992	0,988	0,985	0,982	0,980	0,978
0,28	0,995	0,993	0,990	0,988	0,986	0,982	0,979	0,976	0,973	0,971
0,30	0,989	0,987	0,984	0,982	0,980	0,976	0,972	0,969	0,967	0,964
0,32	0,983	0,980	0,978	0,976	0,974	0,969	0,965	0,962	0,959	0,957
0,34	0,977	0,974	0,971	0,969	0,967	0,962	0,958	0,955	0,952	0,949
0,36	0,970	0,967	0,964	0,962	0,959	0,954	0,950	0,947	0,944	0,941
0,38	0,963	0,959	0,957	0,954	0,952	0,947	0,942	0,939	0,935	0,933
0,40	0,955	0,952	0,949	0,946	0,944	0,938	0,934	0,930	0,927	0,924
0,42	0,947	0,944	0,941	0,938	0,935	0,930	0,925	0,921	0,918	0,915
0,44	0,939	0,935	0,932	0,929	0,927	0,921	0,916	0,912	0,909	0,906
0,46	0,930	0,926	0,923	0,920	0,918	0,912	0,907	0,903	0,899	0,896
0,48	0,921	0,917	0,914	0,911	0,908	0,902	0,897	0,893	0,889	0,886
0,50	0,912	0,908	0,904	0,901	0,899	0,892	0,887	0,883	0,879	0,876
0,52	0,902	0,898	0,895	0,891	0,889	0,882	0,877	0,872	0,868	0,865
0,54	0,892	0,888	0,884	0,881	0,878	0,872	0,866	0,862	0,857	0,854
0,56	0,882	0,877	0,874	0,870	0,867	0,861	0,855	0,850	0,846	0,843
0,58	0,871	0,867	0,863	0,859	0,856	0,850	0,844	0,839	0,835	0,831
0,60	0,860	0,855	0,852	0,848	0,845	0,838	0,832	0,827	0,823	0,819
0,62	0,848	0,844	0,840	0,836	0,833	0,826	0,820	0,815	0,811	0,807
0,64	0,836	0,832	0,828	0,824	0,821	0,814	0,808	0,802	0,798	0,794
0,66	0,824	0,820	0,816	0,812	0,808	0,801	0,795	0,790	0,785	0,781
0,68	0,811	0,807	0,803	0,799	0,795	0,788	0,782	0,776	0,772	0,767
0,70	0,798	0,794	0,789	0,786	0,782	0,774	0,768	0,763	0,758	0,753
0,72	0,785	0,780	0,776	0,772	0,768	0,760	0,754	0,748	0,743	0,739
0,74	0,771	0,766	0,762	0,758	0,754	0,746	0,739	0,734	0,729	0,724
0,76	0,756	0,751	0,747	0,743	0,739	0,731	0,725	0,719	0,714	0,709
0,78	0,741	0,736	0,732	0,728	0,724	0,716	0,709	0,703	0,698	0,694
0,80	0,726	0,721	0,716	0,712	0,708	0,700	0,693	0,687	0,682	0,677
0,82	0,710	0,705	0,700	0,696	0,692	0,683	0,676	0,670	0,665	0,661
0,84	0,693	0,688	0,683	0,679	0,675	0,666	0,659	0,653	0,648	0,643
0,86	0,675	0,670	0,665	0,661	0,657	0,648	0,641	0,635	0,630	0,625
0,88	0,657	0,652	0,647	0,642	0,638	0,630	0,622	0,616	0,611	0,606
0,90	0,638	0,632	0,627	0,623	0,619	0,610	0,603	0,596	0,591	0,586
0,92	0,617	0,612	0,607	0,603	0,598	0,589	0,582	0,576	0,570	0,565
0,94	0,596	0,590	0,585	0,581	0,577	0,567	0,560	0,553	0,548	0,543
0,96	0,573	0,567	0,562	0,557	0,553	0,544	0,536	0,530	0,524	0,519
0,98	0,548	0,542	0,537	0,532	0,528	0,518	0,511	0,504	0,498	0,493
1,00	0,520	0,514	0,509	0,504	0,500	0,490	0,482	0,476	0,470	0,464

$\mu$	6000	7000	8000	9000	10000	12000	14000	16000	18000	20000
0,00	1,001	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,02	1,010	1,009	1,009	1,008	1,008	1,008	1,007	1,007	1,007	1,006
0,04	1,013	1,012	1,012	1,011	1,010	1,010	1,009	1,008	1,008	1,007
0,06	1,014	1,013	1,012	1,011	1,011	1,009	1,008	1,008	1,007	1,006
0,08	1,014	1,012	1,011	1,010	1,009	1,008	1,007	1,006	1,005	1,004
0,10	1,012	1,010	1,009	1,008	1,007	1,005	1,004	1,003	1,002	1,001
0,12	1,010	1,008	1,006	1,005	1,004	1,002	1,000	0,999	0,998	0,997
0,14	1,007	1,004	1,003	1,001	1,000	0,998	0,996	0,994	0,993	0,992
0,16	1,003	1,000	0,998	0,997	0,995	0,993	0,991	0,989	0,988	0,986
0,18	0,998	0,996	0,994	0,992	0,990	0,987	0,985	0,983	0,982	0,980
0,20	0,993	0,991	0,988	0,986	0,985	0,982	0,979	0,977	0,975	0,974
0,22	0,988	0,985	0,983	0,980	0,978	0,975	0,973	0,971	0,969	0,967
0,24	0,982	0,979	0,976	0,974	0,972	0,969	0,966	0,964	0,962	0,960
0,26	0,976	0,972	0,970	0,967	0,965	0,962	0,959	0,956	0,954	0,952
0,28	0,969	0,966	0,963	0,960	0,958	0,954	0,951	0,948	0,946	0,944
0,30	0,962	0,958	0,955	0,953	0,950	0,946	0,943	0,940	0,938	0,936
0,32	0,955	0,951	0,947	0,945	0,942	0,938	0,935	0,932	0,929	0,927
0,34	0,947	0,943	0,939	0,936	0,934	0,929	0,926	0,923	0,920	0,918
0,36	0,939	0,934	0,931	0,928	0,925	0,921	0,917	0,914	0,911	0,909
0,38	0,930	0,926	0,922	0,919	0,916	0,911	0,908	0,904	0,902	0,899
0,40	0,921	0,917	0,913	0,910	0,907	0,902	0,898	0,895	0,892	0,889
0,42	0,912	0,907	0,904	0,900	0,897	0,892	0,888	0,885	0,882	0,879
0,44	0,903	0,898	0,894	0,890	0,887	0,882	0,878	0,874	0,871	0,868
0,46	0,893	0,888	0,884	0,880	0,877	0,872	0,867	0,864	0,860	0,858
0,48	0,883	0,878	0,873	0,870	0,866	0,861	0,856	0,853	0,849	0,846
0,50	0,872	0,867	0,863	0,859	0,855	0,850	0,845	0,841	0,838	0,835
0,52	0,862	0,856	0,852	0,848	0,844	0,839	0,834	0,830	0,826	0,823
0,54	0,851	0,845	0,840	0,836	0,833	0,827	0,822	0,818	0,814	0,811
0,56	0,839	0,834	0,829	0,825	0,821	0,815	0,810	0,806	0,802	0,799
0,58	0,827	0,822	0,817	0,813	0,809	0,803	0,798	0,793	0,790	0,786
0,60	0,815	0,809	0,804	0,800	0,796	0,790	0,785	0,780	0,777	0,773
0,62	0,803	0,797	0,792	0,787	0,784	0,777	0,772	0,767	0,764	0,760
0,64	0,790	0,784	0,779	0,774	0,770	0,764	0,758	0,754	0,750	0,747
0,66	0,777	0,771	0,765	0,761	0,757	0,750	0,745	0,740	0,736	0,733
0,68	0,764	0,757	0,752	0,747	0,743	0,736	0,731	0,726	0,722	0,718
0,70	0,750	0,743	0,738	0,733	0,729	0,722	0,716	0,711	0,707	0,704
0,72	0,735	0,729	0,723	0,718	0,714	0,707	0,701	0,696	0,692	0,688
0,74	0,721	0,714	0,708	0,703	0,699	0,692	0,686	0,681	0,677	0,673
0,76	0,705	0,698	0,693	0,688	0,683	0,676	0,670	0,665	0,661	0,657
0,78	0,690	0,683	0,677	0,672	0,667	0,660	0,654	0,649	0,644	0,641
0,80	0,673	0,666	0,660	0,655	0,651	0,643	0,637	0,632	0,627	0,624
0,82	0,656	0,649	0,643	0,638	0,633	0,626	0,620	0,614	0,610	0,606
0,84	0,639	0,632	0,625	0,620	0,616	0,608	0,602	0,596	0,592	0,588
0,86	0,621	0,613	0,607	0,602	0,597	0,589	0,583	0,578	0,573	0,569
0,88	0,602	0,594	0,588	0,583	0,578	0,570	0,564	0,558	0,554	0,549
0,90	0,582	0,574	0,568	0,562	0,558	0,550	0,543	0,538	0,533	0,529
0,92	0,561	0,553	0,547	0,541	0,536	0,528	0,522	0,516	0,512	0,507
0,94	0,538	0,531	0,524	0,519	0,514	0,506	0,499	0,494	0,489	0,485
0,96	0,515	0,507	0,500	0,495	0,490	0,482	0,475	0,469	0,464	0,460
0,98	0,489	0,481	0,474	0,469	0,464	0,455	0,448	0,443	0,438	0,434
1,00	0,460	0,452	0,445	0,439	0,434	0,426	0,419	0,413	0,408	0,404

SILINDRILISE KOROONALAHENDUSE SPETSIAAL-  
FUNKTSIOONI TABEL

H. Tammet

Resümees

Tabel kirjeldab ideaalse unipolaarse kvaasikoroona voltamperkarakteristiku valemis (1) esinevat funktsiooni  $C_y(\varpi, \mu)$ . Tähistused:  $J$  - voolutugevus pikkusühiku kohta,  $U$  - elektroodidevaheline pinge,  $U_e$  - emissioonpinge (lahenduse algpinge),  $k$  - ionide liikuvus,  $\varepsilon$  - keskkonna absoluutne elektriline läbitavus,  $R$  ja  $r_0$  - elektroodide raadiused,  $\varpi = R / r_0$ ,  $\mu = U_e / U$ .

SPECIFIC FUNCTION TABLE FOR THE CYLINDRICAL  
CORONA DISCHARGE

H. Tammet

Summary

The function  $C_y(\varpi, \mu)$  occurring in formula (1) of the voltampere characteristic of an ideal unipolar quasi-corona is tabulated. Notations:  $J$  - current per unit length,  $U$  - voltage between electrodes,  $U_e$  - emission voltage (initial voltage of discharge),  $k$  - mobility of ions,  $\varepsilon$  - absolute electric permeability of the medium,  $R$  and  $r_0$  - radii of electrodes,  $\varpi = R/r_0$ ,  $\mu = U_e/U$ .



## ИЗУЧЕНИЕ ФАЗ РАЗВИТИЯ УНИПОЛЯРНОГО ВЧ РАЗРЯДА В ДИАПАЗОНЕ 3-20 МГц

В.А.Веймер, К.Ф.Куду

Введение. Одна из критических частот, при которой наблюдается существенное изменение как качественной, так и количественной картины развития ВЧ разряда с острия в воздухе при атмосферном давлении, находится в диапазоне между 3 и 20 МГц /1, 2, 3 и др./-. В этом диапазоне ВЧ корона переходит в факельный разряд. Поэтому особый интерес представляет изучение фаз временного развития разряда от самых начальных форм до установившейся формы или пробоя именно в этом диапазоне частот.

Хотя ВЧ разряд развивается значительно медленнее, чем разряд постоянного напряжения, все же наблюдение отдельных фаз развития представляет значительные трудности. Здесь, как и в случае разряда постоянного напряжения, могут быть использованы техника скоростной киносъемки или электроннооптические преобразователи, а также, например, метод импульсного питания разрядного промежутка. В данной работе использовался метод торможения разряда после прохождения заданного интервала времени с его начала. Подробно метод торможения, названный по своему принципу методом фотоэлектрической обратной связи с переменной задержкой, описан в работах /4 и 5/. Использование этого метода для исследования ВЧ разряда оказалось весьма плодотворным.

Аппаратура. Примененная в исследованиях аппаратура описана в предыдущих сообщениях /4 и 5/. Использовался разрядный промежуток острие-плоскость. Плоским электродом был заземленный латунный диск диаметром 17 см, острием, к которому подводилось ВЧ напряжение - платиновая проволока диаметром 1 мм с полусферически обработанным концом. Длина разрядного промежутка 4 см. Разряд фотографировался камерой "Зенит 3 М" с объективом "Гелиос 40" светосилы 1:1,5. Пленка (ORWO - 27) обрабатывалась

особоконтрастным проявителем (реальная чувствительность доводилась до 2000 ед. ГОСТа). Система позволяла получать разряды с минимальной продолжительностью  $\sim 4$  мкс на частоте 10 МГц и 12 мкс на частоте 3 МГц. Максимально возможная продолжительность разряда системой не ограничивалась.

Результаты измерений. Исследовалось развитие ВЧ разряда на трех частотах 3, 10 и 20 МГц. На всех частотах амплитуда приложенного к острию напряжения была равна 8 кВ.

1). 3 МГц. При этой частоте возбуждающего напряжения разряд имеет вид типичной высокочастотной короны. На рис. 1 по рис. 6 приведены фотографии последовательных стадий развития ВЧ короны от весьма слабых и малых по размерам образований около острия до пробоя разрядного промежутка. Хотя ВЧ вспышка (начальная стадия развития ВЧ разряда) значительно ярче канала стримера постоянного напряжения, все же для регистрации ее приходится применять объективы большой светосилы и чувствительные пленки. На рис. 1 приведена фотография одной вспышки продолжительностью 12 мкс. Видно распространение разряда в глубину разрядного промежутка на 3-4 мм, разветвление основного канала вспышки.



Рис. 1. 3 МГц  
12 мкс

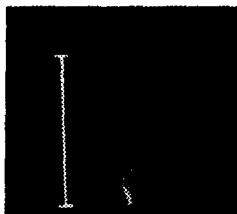


Рис. 2. 3 МГц  
20 мкс



Рис. 3. 3 МГц  
100 мкс

Длина масштабной метки 1 см .

Следует отметить, что при такой продолжительности разряда не всегда наблюдается разветвление каналов, но с другой стороны вспышка может состоять из нескольких

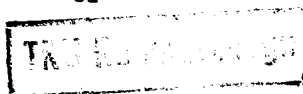
до 5 и более каналов, развивающихся с поверхности электрода веерообразно.

На рис.2 приведена фотография вспышки продолжительностью 20 мкс. По сравнению с предыдущей фазой наблюдается удлинение каналов и увеличение их яркости. Число разветвлений увеличивается.

На рис.3 представлена фотография ВЧ вспышки длительностью 100 мкс. Каналы значительно удлинились и стали ярче, много разветвлений. По визуальным наблюдениям хорошо различимы пятна у оснований каналов.

При дальнейшем увеличении продолжительности разряда удлинение каналов сопровождается значительным ростом их яркости по всей длине (рис.4) и постепенным расширением их стволов (рис.5). В расширенной части интенсивность канала значительно выше, чем в остальной. Внешний вид процесса напоминает распространение вторичного стримера по каналу первичного в случае короны импульсного напряжения /6/. Дальнейшее увеличение продолжительности разряда приводит к увеличению яркости и ширины каналов, обрастанию их диффузным облачком свечения. Этот процесс продолжается до 2000 мкс, когда распространение разряда внутрь разрядного промежутка приводит к его пробое (рис.6). Пробой наступает после касания плоскости одним из тонких отростков канала. Следует резкое повышение интенсивности свечения и потребления тока разрядом. Разряд переходит в дуговой.

Следует отметить, что данная картина разряда наблюдается на частоте 3 МГц при сильной связи между разрядным промежутком и ВЧ генератором. При слабой связи между ними возникновение заметного разряда на острие приводит к сильному снижению его ВЧ потенциала, вследствие чего происходит замедление развития вглубь разрядного промежутка и наступает равновесное состояние, при котором можно получить стационарно горящую корону. При описанном эксперименте снижение потенциала острия перед пробоем не превышало 5% от первоначального напряжения, вследствие чего разряд развивался до пробоя.



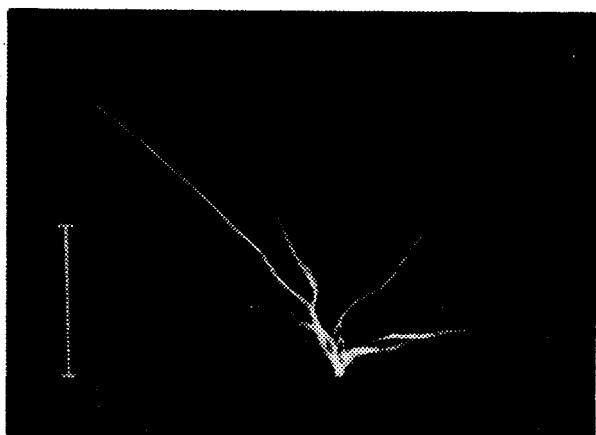


Рис.4. 3 МГц ; 500 мкс .

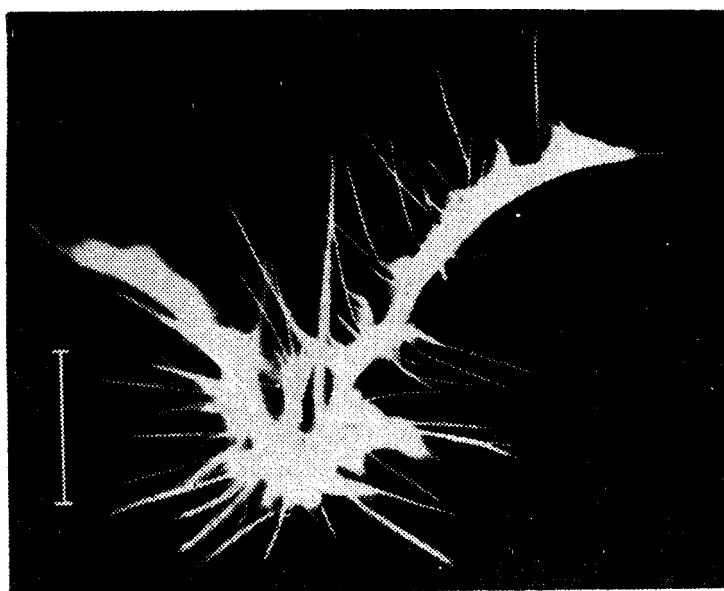


Рис.5. 3 МГц ; 2000 мкс .

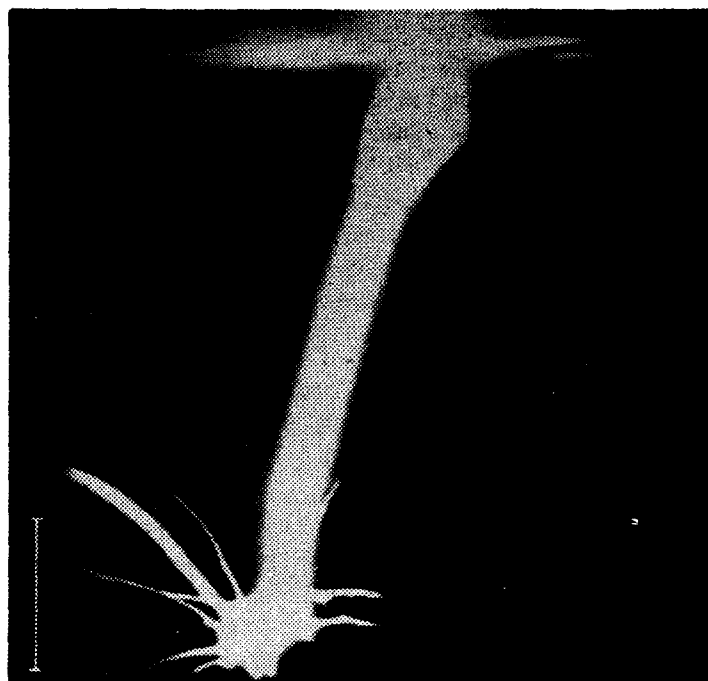


Рис.6. 3 МГц ; 20000 мкс .

По фотографиям следующих друг за другом фаз развития разряда можно определить скорость проникновения видимого разряда в разрядный промежуток. Для этого на один кадр снимали несколько вспышек определенной длительности  $t_1'$  и определяли их среднюю протяженность в сторону плоскости  $x_1'$ . Затем повторяли это для другой длительности  $t_1''$ . Отношение  $v = \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1}$ , где  $\Delta x_1 = x_1'' - x_1'$  и  $\Delta t_1 = t_1'' - t_1'$ , дает среднюю скорость распространения разряда в сторону плоскости в точке на расстоянии  $l = x_1' + \Delta x_1 / 2 = \frac{1}{2}(x_1' + x_1'')$ . Таким образом были получены кривые, представленные на рис.7. Надо отметить, что полученные значения скорости не должны совпадать со скоростью

распространения отдельного канала вспышки. Последний может в процессе развития менять направление, искривляясь вниз и вбок, а иногда даже поворачиваться обратно в сторону острия. Особенно это заметно на более высоких частотах.

График для 3 МГц показывает, что скорость распространения разряда быстро падает при его проникновении в разрядный промежуток. На расстоянии более одного см от острия уменьшение скорости происходит медленно. Максимальное значение скорости на малом расстоянии от острия остается значительно ниже таковой на частотах 10 и 20 МГц.

2). 10 МГц. На рис.8 по I3 приведены фотографии развития разряда на частоте 10 МГц. На рис.8 продолжительность вспышки составляет 6 мкс. С поверхности острия исходит слабые тонкие каналы, расходящиеся веерообразно в стороны. Число каналов колеблется в больших пределах. Наблюдаются разветвления, хотя их число меньше, чем при 3 МГц. Обращает внимание значительно большая длина каналов по сравнению с таковой на первых стадиях развития при частотах 3 МГц и 20 МГц, что указывает на большую скорость развития. Увеличение времени развития разряда приводит к постепенному увеличению длины и яркости каналов, распространению разряда в сторону плоскости (рис.9, I0, II). На рис.II видно, как отдельные, направленные вверх каналы, проникают прямолинейно на значительную глубину разрядного промежутка и только затем искривляются. Интересно также расхождение разветвлений в разные стороны. При дальнейшем росте продолжительности разряда увеличивается толщина каналов (рис.I2). Хотя скорость распространения все время падает, она остается все же выше, чем при 3 МГц и 20 МГц (см. рис.7). Пробой промежутка наступает, если один из проникших глубоко в разрядный промежуток каналов, подойдя близко к плоскости, успеет дать за время продолжительности разряда ответвление в сторону плоскости. Касание каналом плоскости приводит к пробое промежутка, к резкому возрастанию яркости канала и потребления тока разрядом. На рис. I3 показан пробой промежутка. Точка касания каналом плос-

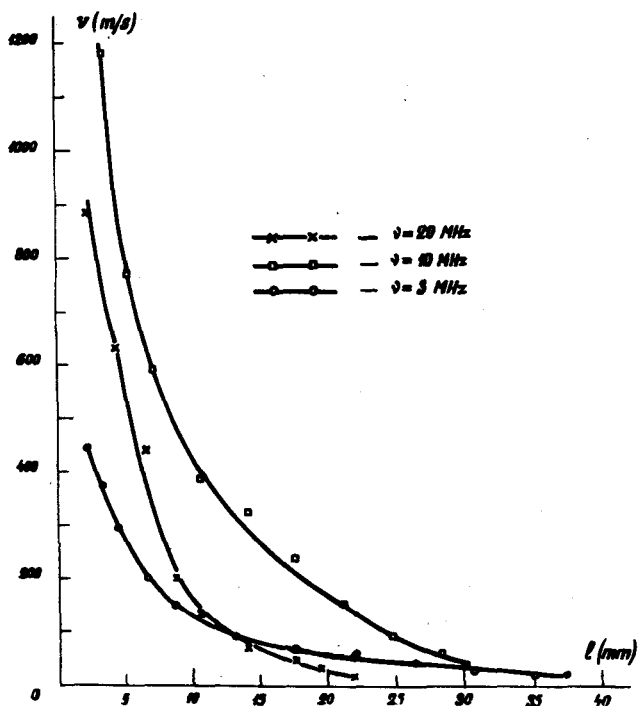


Рис.7. Зависимость вертикального компонента скорости распространения разряда от глубины проникновения в разрядный промежуток.

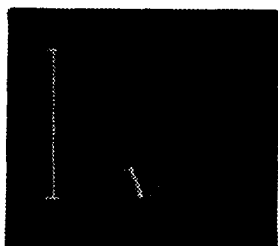


Рис.8. 10 МГц ; 6 мкс.

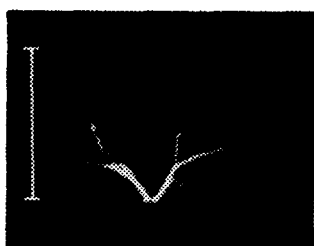


Рис.9. 10 МГц ; 10 мкс.

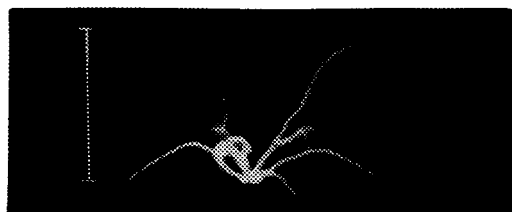


Рис.10. 10 МГц; 20 мкс.



Рис.11. 10 МГц; 50 мкс.



Рис.12. 10 МГц; 100 мкс.



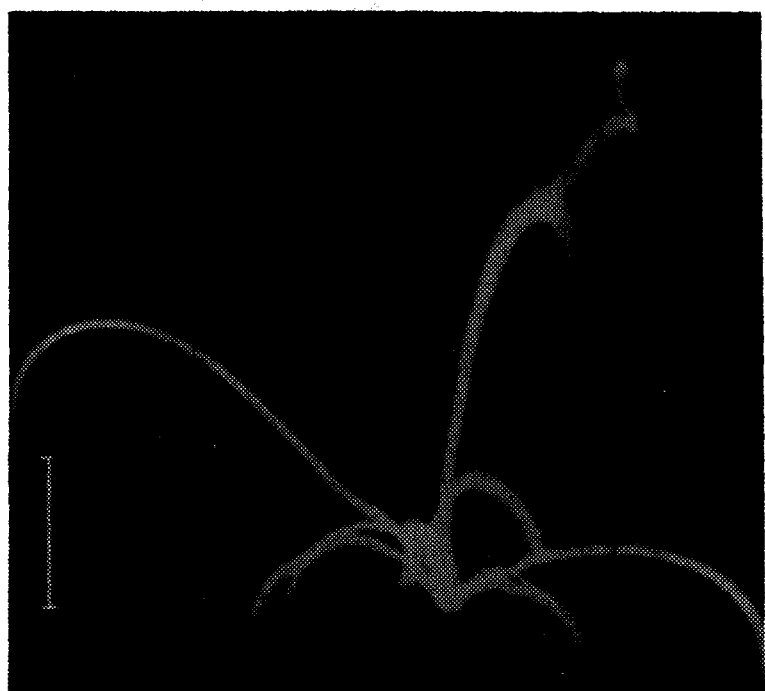


Рис.13. 10 МГц ; 500 мкс.

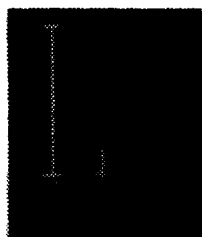


Рис.14.  
20 МГц; 5мкс.

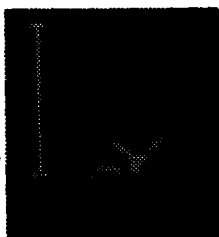


Рис.15.  
20 МГц; 10 мкс.

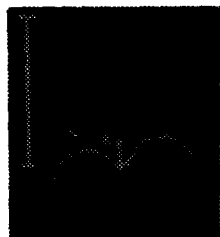


Рис.16.  
20 МГц; 15 мкс.



Рис. I7. 20 МГц; 20 мкс.

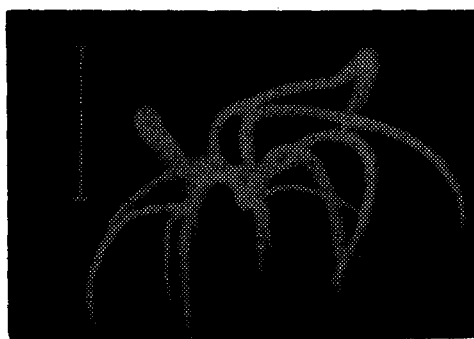


Рис. I8. 20 МГц; 200 мкс.



Рис. I9. 20 МГц; 500 мкс.

кости видна в правом верхнем углу. Продолжительность разряда составляет 500 мкс.

3). 20 МГц. Развитие разряда на этой частоте значительно отличается от рассмотренных ранее. Однако, это различие становится заметным только на сравнительно поздних стадиях развития. Так, приведенная на рис. 14 вспышка продолжительностью 5 мкс мало отличается по своему внешнему виду от начальных стадий развития на других частотах. Разница заключается лишь в том, что канал на этой частоте, пожалуй, более диффузный, чем на других частотах.

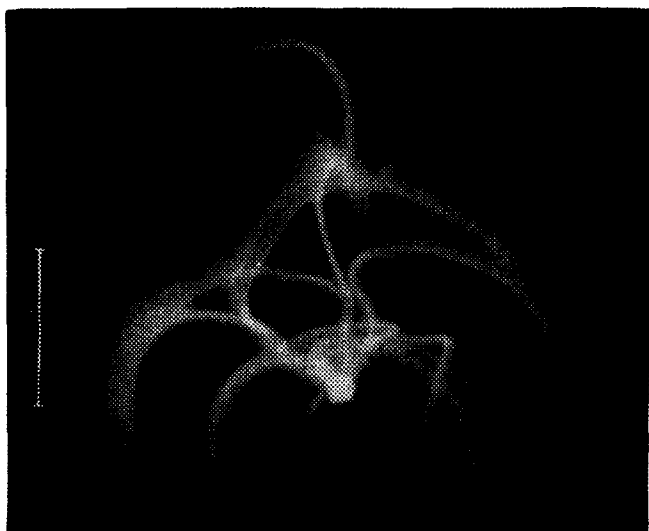


Рис. 20. 20 МГц; 1000 мкс.

Различия в развитии начинают наблюдаться при продолжительностях около 10 мкс (рис. 15), видно загибание вниз боковых каналов и появление на концах восходящих каналов диффузных расширений. В приведенной на рис. 16 вспышке продолжительностью 15 мкс эти явления наблюдаются особенно четко. Рис. 17 соответствует вспышке 50 мкс. Здесь из диффузных расширений восходящих каналов уже развились разветвления, каналы стали значительно шире и ярче. Дальнейшее увеличение продолжительности приводит к постепенному расширению и

удлинению каналов, хотя развитие в вертикальном направлении замедляется (рис.18, 19, 20). При 200 мкс (рис.18) видно продолжение общего диффузного расширения каналов и появление отростков, которые медленно растут (рис.19 и 20), распространяясь перпендикулярно направлению каналов. При касании диффузным отростком плоскости наступает пробой промежутка. Надо отметить, что пробой может наступить и раньше. Если вспышка в начальной стадии имеет большую длину, пробой может возникнуть уже в этой стадии (за 100-200 мкс). Рост вспышки может быть получен приложением к разрядному промежутку большего напряжения. Подробное описание разряда на частоте 20 МГц приведено также в наших предыдущих работах /4 и 5/.

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов.

1). Развитие ВЧ разряда в рассматриваемом диапазоне частот происходит с переменной скоростью. Происходят качественные изменения в процессах разряда.

2). Самые начальные стадии развития по внешнему виду сходны, позже различия во внешнем виде разряда очевидны.

3). Яркость отдельных каналов при одинаковой продолжительности вспышки увеличивается с увеличением частоты.

4). Скорость развития разряда в вертикальном направлении, при одинаковом потенциале на острие оказалась максимальной при частоте 10 МГц.

5). Пробой разрядного промежутка наступает при касании плоскости каналом вспышки.

#### Л и т е р а т у р а

1. Кузовников А.А. "Научные доклады высшей школы", 1958, № 4, 191.
2. Кузовников А.А., Капцов Н.А. "Изв. ВУЗ-ов", 1960, № 6, 64.
3. Куду К.Ф. О начальных стадиях развития разряда с острия в воздухе. Тарту, 1960.
4. Веймер В.А. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1969, вып. 239, 57.
5. Veimer V., Kudu K. Contributed papers of the IX Conf. On Phenomena in Ionized Gases, 285, Bucarest, 1969.
6. Dawson G.A. "Zs. Phys.", 1965, Vol.183, 172.

**UNIPOLAARSE KS LAHENDUSE ARENGUFAASIDE UURIMINE  
SAGEDUSTE DIAPASOONIL 3-20 MHz**

**V.Veimer, K.Kudu**

**Resüme**

Fotoelektrilise tagasiside meetodil saadi unipolaarse KS lahenduse arengufaaside fotod sagedusdiapasoonis 3-20 MHz. Leiti, et erinevatel sagedustel on KS sähvatuste väliskujud lahenduse algstaadiumides sarnased; märgatavad erinevused sõltuvalt sagedusest ilmnevad hilisemates arengustaadiumides. Lahenduskanalite helendus suureneb koos sageduse kasvuga. Lahendusvahemiku läbilõök saabub, kui sähvatuse üks kanalitest on arenenud plaadini. Saadud fotode abil oli võimalik hinnata lahenduse arengukiirust. Leiti, et see väheneb kiiresti sõltuvalt kaugusest teravikuni, olles suurim sagedusel 10 MHz.

**THE DEVELOPMENT PHASES OF THE UNIPOLAR HF DISCHARGE WITHIN  
THE FREQUENCY RANGE OF 3-20 MHz**

**V.Veimer, K.Kudu**

**Summary**

Photos of the unipolar HF discharge were obtained by the method of photoelectrical feedback with variable delay within the frequency range of 3 to 20 MHz. It was established that the appearance of HF bursts in initial stages is quite similar in all frequencies, in later stages, however, differences in their appearance in different frequencies become obvious. The luminosity of the discharge channels increases with increasing the frequency. The breakdown of the discharge gap is reached when one of the channels of the HF bursts develops up to the plate.

It was possible to estimate on the bases of photos the HF discharge propagation velocity. We established that the velocity decreases rapidly with the distance to the point, being highest at the frequency of 10 MHz.

## ВОЛЬТ-ВОЛЬТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УНИПОЛЯРНОГО ВЧ РАЗРЯДА НА ЧАСТОТЕ 0,4 МГц ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ В ВОЗДУХЕ

М.Х. Айнс, В.А. Веймер, К.Ф. Куду

Для выяснения механизма развития униполярного ВЧ коронного и факельного разрядов особый интерес представляет область частот, где происходит переход от одного вида ВЧ разряда к другому. При понижении давления происходит снижение частоты этого перехода [1, 2, 3]. Поэтому существенный интерес представляет изучение процессов перехода при изменении давления при постоянной частоте, а также сравнение их с процессами, происходящими при изменении частоты при постоянном давлении. Весьма много информации о процессах, происходящих в начальной стадии развития ВЧ разряда, можно получить методом смешанного напряжения, т.е. при изучении разряда при одновременном приложении к разрядному промежутку ВЧ и постоянного напряжения [4]. К настоящему времени достаточно подробно изучены т.н. вольт-вольтовые характеристики (в.-в.х.) разряда, т.е. пороговые напряжения различных форм разряда в системе координат: напряжение ВЧ ( $U_{\omega}$ ) - напряжение постоянного тока ( $U_{\text{п}}$ ) для области переходных частот при нормальном давлении [4, 5, 6, 7]. Настоящая работа была предпринята для получения в.-в.х. при пониженных давлениях, которые позволяют делать определенные выводы о физических процессах в начальные стадии ВЧ разряда.

### I. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из четырех основ-

ных частей: разрядного промежутка, вакуумной системы, блока питания, измерительной аппаратуры.

В работе был использован разрядный промежуток острие-плоскость (рис. 1). В качестве острия использовалась платиновая проволока диаметром 1,0 мм с полусферически обработанным концом. Плоскость представляла собой диск из нержавеющей стали диаметром 120 мм, расположенный на расстоянии 40 мм над острием. Параметры разрядного промежутка были выбраны из соображений возможности сравнения результатов эксперимента с данными предыдущих работ, особенно [4] и [5].

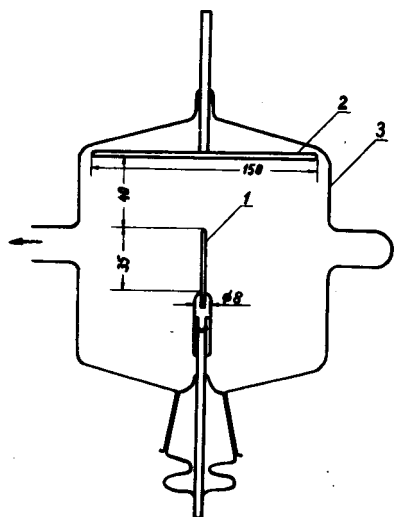


Рис. 1.  
Разрядный промежуток

Разрядный промежуток был помещен в цилиндрический стеклянный баллон диаметром 150 мм и высотой 140 мм. Вакуумная система позволяла получать в баллоне разрежение до  $10^{-3}$  Тор. Давление в баллоне измерялось в диапазоне от 4 до 760 Тор при помощи U-образного манометра, заполненного ртутью. Погрешность определения давления в этом диапазоне не превышала  $\pm (0,3\% + 0,5 \text{ Тор})$ . Воздух вводили в баллон через

фильтр и осушитель, наполненный  $P_2O_5$ . Влажность воздуха в баллоне не превышала 0,0005 г/л при нормальном давлении.

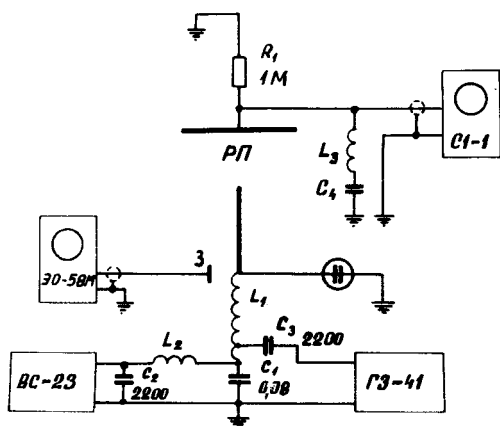


Рис. 2. Схема питания

Схема питания разрядного промежутка дана на рис. 2. Отрицательное постоянное напряжение до  $-10$  кВ, а также положительное до 3 кВ были получены от высоковольтного стабилизатора BC-23 стабильностью 0,5 % при максимальном токе 5 мА. Напряжение свыше +3 кВ было получено с выхода высоковольтного стабилизатора, описанного в работе [10], который питался высоковольтным напряжением от источника Tesla BS-222A. Источником ВЧ напряжения служил генератор ГЗ-4I с выходной мощностью до 2,5 Вт. Для достижения нужной амплитуды напряжения на выход генератора был включен колебательный контур, состоящий из однослойной катушки  $L_1$ , намотанной на керамический каркас диаметром 70 мм и высотой 400 мм. При настройке на резонансную частоту амплитуда напряжения достигала на частоте



0,4 МГц величину 8 кВ.

Как постоянное, так и переменное напряжение на острие измерялось электрическими киловольтметрами С-96 и С-50. Высокочастотное напряжение измерялось также при помощи осциллографа 90-58М, сигнал на который поступил с зонда 3 (рис. 2). Зондом служила медная полоска длиной 5 см, закрепленная на расстоянии 5 см от верхнего конца катушки  $L_1$ . Осциллограф калибровался непосредственно перед каждой серией измерений. После окончания измерений проверяли калибровку. Погрешность измерения напряжения во всем диапазоне измерений не превышала 5 %.

При помощи осциллографа СИ-1 фиксировали возникновение разряда и наблюдали за импульсом тока. Сигнал был получен с резистора  $R_1$ . Для освобождения от ВЧ помех использовался LC фильтр, состоящий из  $L_3$  и  $C_4$ . Искажающего действия фильтра на импульсы тока разряда не наблюдалось.

Разряд наблюдался также визуально при помощи телескопической лупы ЛПШ-474 и фотографировался.

## II. Методика измерений

Измерялись пороговые напряжения различных форм разряда на смешанном напряжении при различных давлениях. Перед каждой серией измерений баллон с разрядным промежутком откачивался до давления  $10^{-2}$  Тор. Воздух в баллон напускался до нужного давления через осушитель. Начало разряда фиксировалось осциллографом СИ-1 при его максимальной чувствительности (2,5 мм/мВ) по импульсам тока на сопротивлении 1 МОм.

На смешанном напряжении измерения проводились в следующем порядке. Сначала устанавливали постоянное напряжение нужной величины, затем увеличивали плавно переменное напряжение до появления на экране осциллографа импульсов разряда. После этого выключали постоянное напряжение и фиксировали показание вольтметра. Минимальное напряжение, при котором еще наблюдались импульсы на экране осциллографа, считалось пороговым напряжением данной формы разряда. Время выжидания раз-

ряда составляло 3 мин. Пороговым напряжением ВЧ разряда считалось напряжение его зажигания.

При проведении измерений было замечено, что если на острие горел несколько секунд интенсивный ВЧ разряд на смешанном напряжении, то после этого пороговые напряжения всех форм разряда при том же знаке постоянной составляющей напряжения повышались на 10-15 % (при противоположном знаке несколько понижались) и только через 5-10 мин становились равными первоначальным значениям. Это явление проявлялось яснее при низких давлениях. Разряд ВЧ напряжения значительно ускорял восстановление первоначальных значений пороговых напряжений. Аналогичные изменения пороговых напряжений, вызванные ВЧ разрядом в закрытой системе малого объема, наблюдались также и в работе [ 8 ] .

Учитывая вышеизложенные факты, можно предполагать, что увеличение пороговых напряжений вследствие ВЧ разряда вызвано накоплением поверхностного заряда на стенках разрядной камеры, который искажает электрическое поле в разрядном промежутке. Измерения проводились в сухом воздухе, где поверхностная проводимость стекла почти отсутствует. Этим объясняется долгое время восстановления пороговых напряжений. Во влажном воздухе это время было немного короче. Разряд ВЧ напряжения без постоянной составляющей не вызывает такого интенсивного движения преимущественно одноименных зарядов к стенкам сосуда, а повышенная проводимость воздуха вследствие роста концентрации ионов помогает утечке поверхностного заряда. Так как в камере отсутствовала вентиляция, то изменения пороговых напряжений могли вызвать и продукты химических реакций, происходящих в разряде, например, NO [ 9 ] .

При давлениях ниже 500 Тор в первоначально чистом воздухе на постоянном напряжении стримеры не наблюдались (или вероятность их появления была очень мала). Одновременно на смешанном напряжении область появления стримеров была узкой. Но после того, как в разрядном промежутке несколько времени горел ВЧ разряд, появились стримеры при постоян-

ном напряжении, а область их существования при смешанном напряжении значительно расширилась. Это явление может быть также объяснено действием разряда на состав газа [ 9 ] .

Для уменьшения влияния описанных явлений измерения проводились в следующем порядке: при каждом давлении в первую очередь измерялись пороговые напряжения вспышечных импульсов, стримеров и тричелевских импульсов на постоянном напряжении, затем устанавливали пороговое напряжение ВЧ разряда и снова проверяли пороги вспышечных импульсов и стримеров на постоянном напряжении. Каждый раз после горения ВЧ разряда на смешанных напряжениях проверяли пороговое напряжение импульсов и если оно не совпадало с первоначальным значением, то выжидали до тех пор (несколько минут), пока оно не восстанавливалось.

При каждом давлении измерения повторялись не меньше двух раз, притом разность не превышала 3 %.

Во время всех измерений на расстоянии 10 см от баллона с разрядным промежутком находился радиоактивный препарат малой активности, увеличивающий в 2-3 раза количество ион-пар в разрядном промежутке, способствуя тем самым сокращению времени задержки начала разряда.

### Ш. Результаты эксперимента

По результатам измерений построены в.-в.х. разряда, приведенные на рис. 3-10, где обозначения следующие. Горизонтальными линиями заштрихована область возникновения вспышечных импульсов. Точками покрыта область напряжений существования непрерывной вспышечной короны. Между этими областями при определенных давлениях видна область возникновения предначальных стримеров положительной короны. Наклонными линиями заштрихована область возникновения тричелевских импульсов, вертикальными - область ВЧ разряда. ВЧ разряду соответствует также область, закрашенная сплошь. Напряжение везде в амплитудных значениях.

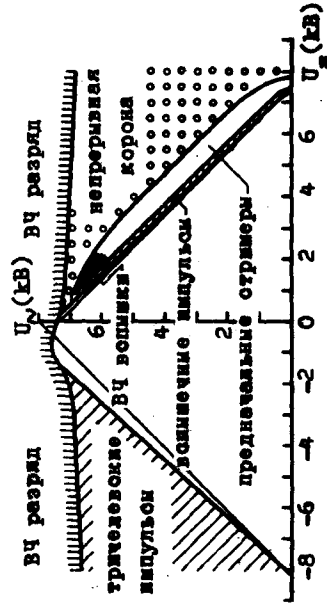


Рис. 3.  
760 Тор

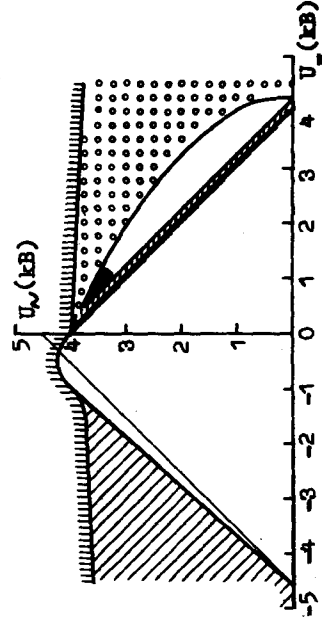


Рис. 4.  
900 Тор

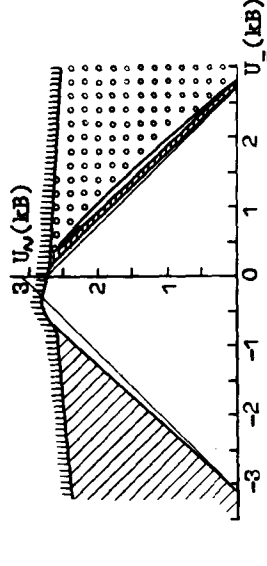


Рис. 5.  
170 Тор

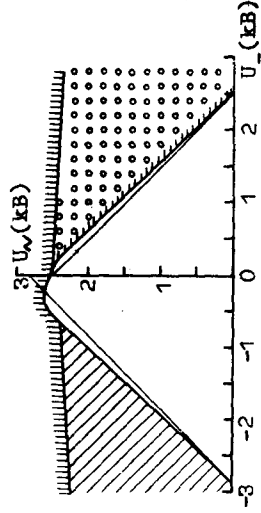


Рис. 6.  
150 Тор

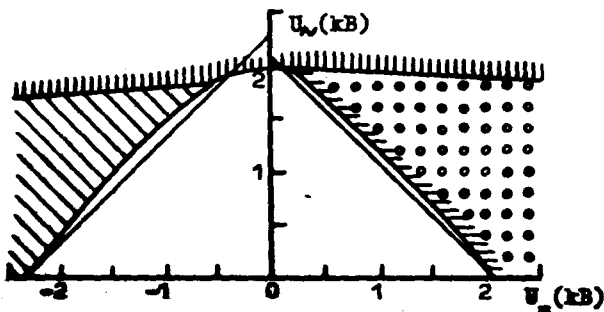


Рис. 7.  
100 Top

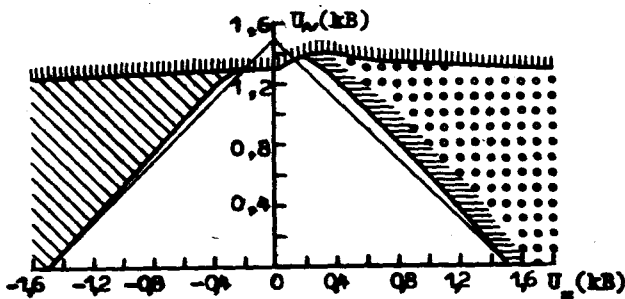


Рис. 8.  
50 Top

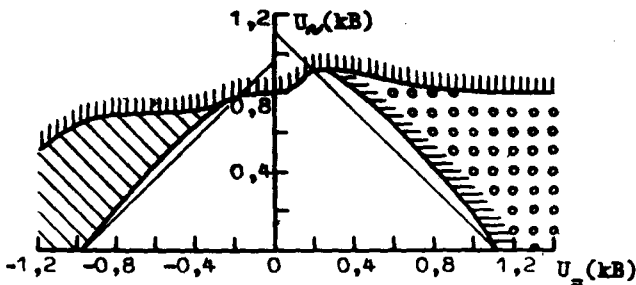


Рис. 9.  
20 Top

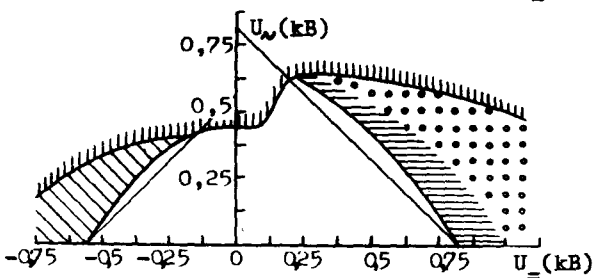


Рис. 10.  
4 Top

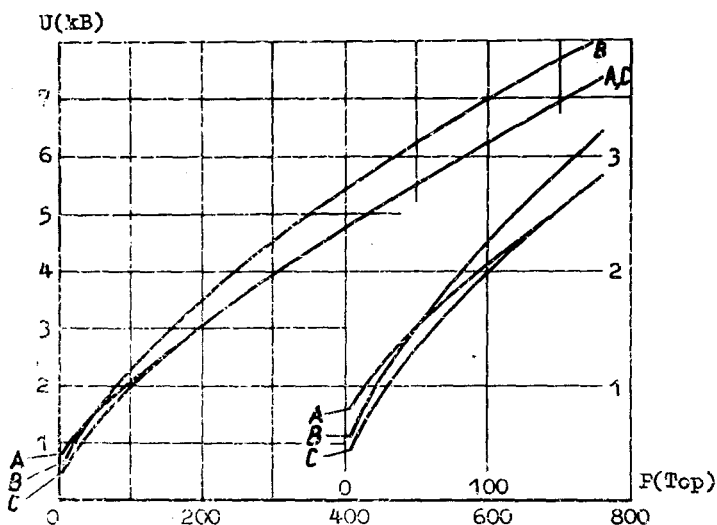


Рис. II.

Зависимость порогового напряжения разряда от давления. А - порог вспышечных импульсов; С - порог ВЧ разряда на частоте 0,4 МГц. В правом нижнем углу даны начальные участки кривых в увеличенном вдвое масштабе.

Из рисунков видно, что с понижением давления происходят существенные изменения в.-в.х.

1) При понижении давления пороговые напряжения всех видов разряда понижаются. На рис. II дана полученная в ходе измерений зависимость пороговых напряжений основных видов разряда от давления в интервале 4-760 Тор. Видно, что пороговое напряжение тричеловских импульсов (кривая В) при понижении давления падает быстрее, чем пороговое напряжение вспышечных

импульсов положительной короны (кривая А) и становится меньше последнего при давлениях около 50 Тор. Кривая С, показывающая пороговое значение ВЧ разряда, в пределах точности измерения совпадает с кривой А до давлений 150 Тор. Начиная с давления 150 Тор и ниже, появляется заметное снижение порога ВЧ разряда по отношению к порогу вспышечных импульсов положительной короны (рис. 12, кривая "а"). Падение порогового напряжения ВЧ разряда по отношению к пороговому напряжению тричелевских импульсов с понижением давления происходит во всем диапазоне давлений (рис. 12, кривая "б").

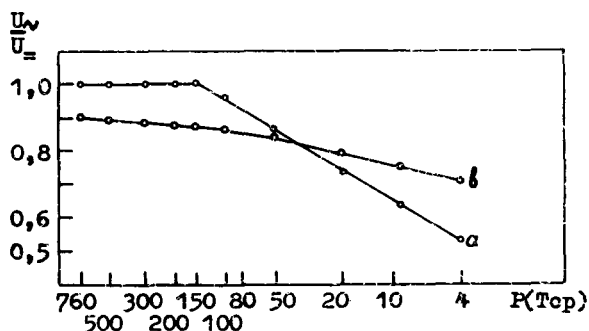


Рис. 12.

Понижение напряжения зажигания ВЧ разряда по отношению к пороговому напряжению вспышечных импульсов (кривая "а") и тричелевских импульсов (кривая "б") в зависимости от давления.

2) На смешанных напряжениях при малой стрижательной постоянной составляющей напряжение зажигания ВЧ разряда в диапазоне давлений 760–150 Тор выше, чем при чистом ВЧ напряжении. Начиная с давления 150 Тор этот эффект постепенно исчезает и при давлениях ниже 100 Тор уже явно имеет место повышение напряжения зажигания ВЧ разряда на смешанных напряжениях при малой положительной составляющей. Особенно на-

глядно это видно на рис. 13, где даны приведенные к нормальному давлению в.-в.х. Они получены увеличением масштаба при пониженных давлениях до совпадения пороговых напряжений вспышечных импульсов положительной короны с его значением при нормальном давлении и наложении всех в.-в.х. друг на друга.

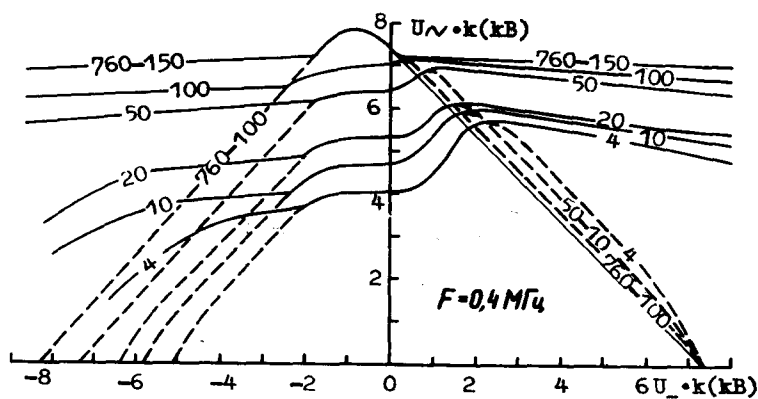


Рис. 13.

Вольт-вольтовые характеристики разряда для разных давлений, приведенные к нормальному давлению. Величина  $k$  - коэффициент увеличения масштаба в.-в.х. при 760 Тор - 1; при 150 Тор - 2,88; при 100 Тор - 3,56; при 50 Тор - 4,90; при 20 Тор - 6,72; при 10 Тор - 7,95; при 4 Тор - 9,25.

3) Стримеры наблюдались на постоянном напряжении до давления 200 Тор, на смешанных напряжениях до 170 Тор. С уменьшением давления область возникновения стримеров как по переменной, так и по постоянной составляющей напряжений сначала увеличивалась, достигая максимума при давлении 300 Тор,



а затем уменьшалась до их исчезновения при указанных выше давлениях.

4) В области, которая на в.-в.х. закрашена сплошь, существовали как стримеры, так и высокочастотные вспышки. Ширина этой области с понижением давления уменьшалась и исчезала вместе с исчезновением области стримеров.

5) С понижением давления становится заметнее повышение пороговых напряжений вспышечных импульсов и стримеров на смешанных напряжениях по отношению к их порогам на постоянном напряжении. Относительное превышение увеличивается с ростом переменной составляющей при ее малых значениях. На в.-в.х. это проявляется как отклонение кривой пороговых напряжений от прямой, проведенной под углом  $45^\circ$  из точки, соответствующей порогу при постоянном напряжении.

#### IV. Обсуждение

Сравнение в.-в.х. на рис. 3-10 с в.-в.х., данными в работах [4, 5] и полученными на разных частотах ВЧ напряжения при нормальном давлении, показывает, что в случае понижения давления при постоянной частоте изменения в ходе в.-в.х. аналогичны изменениям в случае повышения частоты при постоянном давлении. Так, с повышением частоты имеют место следующие закономерности:

а) Напряжения зажигания ВЧ разряда понижаются (см. рис. 14, 15) [4, 5] .

б) Напряжения зажигания ВЧ разряда на смешанных напряжениях повышаются при малой отрицательной постоянной составляющей на частоте 1,25 МГц (рис. 15). С ростом частоты это превышение уменьшается до нуля, а на частоте выше 10 МГц такое же превышение появляется при положительной постоянной составляющей (см. рис. 14, 15).

в) Область возникновения стримеров на смешанном напряжении с ростом частоты сужается [4] .

г) Пороговые напряжения вспышечных импульсов положительной короны и стримеров на смешанных напряжениях с ростом час-

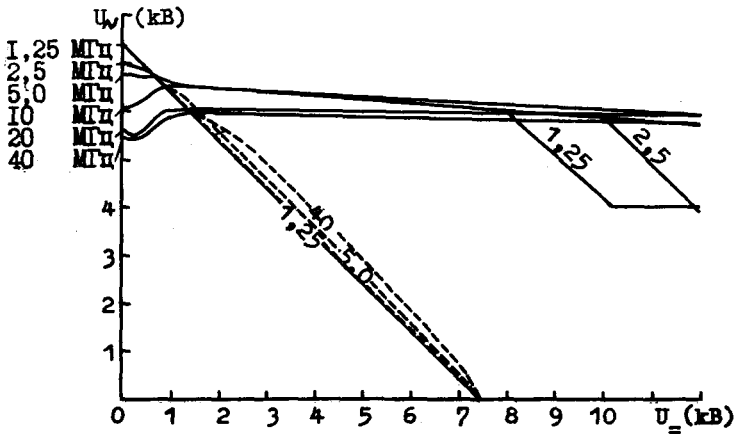


Рис. 14.

Вольт-вольтные характеристики разряда при нормальном давлении на разных частотах (по данным работы [4]).

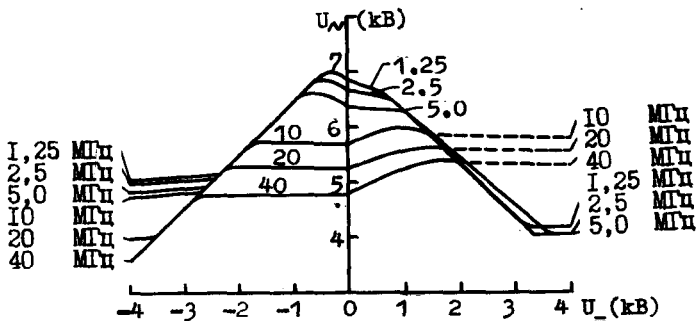


Рис. 15.

Вольт-вольтные характеристики разряда при нормальном давлении для разных частот (по данным работы [5]).

тоты повышаются.

Принимая во внимание перечисленные сходства, постараемся объяснить поведение в.-в.х. при пониженных давлениях.

1) Снижение напряжения зажигания ВЧ разряда при понижении давления.

При нормальном давлении значительное снижение порога ВЧ разряда начинается, когда частота превышает значение примерно 4 МГц [ 5 ]. Причиной этого снижения является возникновение объемного заряда положительных ионов, который около вершины острия усиливает суммарное поле в активной зоне в отрицательные полупериоды напряжения ВЧ [ 5 ]. Накопление объемного заряда обусловлено здесь тем, что с повышением частоты уменьшается амплитуда колебаний ионов в переменном электрическом поле. Начиная с некоторой частоты эта амплитуда становится меньше протяженности активной зоны. Теперь не все ионы успевают нейтрализоваться на острие в течение отрицательного полупериода и становится возможным накопление объемного заряда. С повышением частоты нижняя граница объемного заряда приближается к острию, так как расстояние до этой границы будет равно амплитуде колебаний ионов [ 5 ].

Перейдем к рассмотрению возможного механизма накопления объемного заряда при пониженном давлении, когда частота остается неизменной. В этом случае свободный пробег ионов и электронов, а вместе с этим размеры активной зоны увеличиваются. На расширение активной зоны при понижении давления указывает увеличение величины  $\frac{U_{\text{пор.}}}{p}$ , где  $U_{\text{пор.}}$  - пороговое напряжение разряда. Амплитуда колебаний ионов  $A$  при постоянной частоте в первом приближении прямо пропорциональна напряженности электрического поля  $E$  и подвижности ионов  $K$ :

$$A \sim E \cdot K .$$

С другой стороны,  $K \sim \frac{I}{p}$  ( $p$  - давление газа), откуда получаем  $A \sim \frac{E}{p}$ . Величина  $\frac{E}{p}$  будет всегда постоянной у внешней границы активной зоны. Поэтому остается постоянной амплитуда колебаний ионов около этой границы. Величина  $A$  не будет

меняться в зависимости от давления и в других точках активной зоны, там где  $\frac{E}{P}$  сохраняет значения, соответствующие нормальному давлению.

Если теперь протяженность активной зоны становится больше амплитуды колебаний положительных ионов, то не все возникшие в лавинах ионы успевают в течение отрицательного полупериода нейтрализоваться на острие. От полупериода к полупериоду их количество будет возрастать и они создадут объемный заряд. Это вызывает увеличение лавин в соответствующие полупериоды и тем самым ускоряет накопление объемного заряда, который способствует возникновению ВЧ разряда.

2) Повышение напряженности зажигания ВЧ разряда на смешанных напряжениях.

Существование положительного объемного заряда объяснило бы также повышение напряжения зажигания на смешанном напряжении при положительной постоянной составляющей. Положительная постоянная составляющая уменьшает суммарное напряжение в течение отрицательного полупериода, а в положительные полупериоды объемный заряд уменьшает электрическое поле, препятствуя таким образом возникновению разряда. При низких давлениях этот подъем, вероятно, частично обусловлен тем, что пороговое напряжение тричелевских импульсов в этих условиях ниже порога положительной короны. При нормальном давлении на частотах до  $\sim 5$  МГц и при пониженных давлениях до  $\sim 150$  Тор на частоте 0,4 МГц имеет место повышение напряжения зажигания ВЧ разряда на смешанном напряжении при небольшой отрицательной составляющей постоянного напряжения (рис. 15, 13). Кабардин объяснил это возникновением объемного заряда отрицательных ионов на таких частотах [ 5 ]. Это повышение может быть, однако, объяснено превышением порогового напряжения тричелевских импульсов над порогом вспышечных импульсов и даже стримеров при этих давлениях. Вопрос о роли обоих факторов на изменение формы в.-в.х. требует все же дальнейших исследований.

### 3) Область возникновения стримеров.

Интервал напряжений возникновения стримеров на постоянном напряжении с понижением давления сужается, пока, начиная с определенного давления, зависящего от геометрии разрядного промежутка, не становится равным нулю [ II ]. В наших условиях стримеры не наблюдались на постоянном напряжении при давлениях ниже 200 Тор. При смешанном напряжении возникновение стримеров облегчено как и в работе [ I ]. Чем больше, однако, ВЧ составляющая смешанного напряжения, начиная с определенного значения  $\frac{U_{\sim}}{U_{=}}$ , тем меньше вероятность возникновения стримеров. При давлениях ниже 170 Тор стримеры не наблюдались и на смешанном напряжении. Зависимость ширины области возникновения стримеров от соотношения между  $U_{\sim}$  и  $U_{=}$  можно объяснить по тем же соображениям, что и в работе [ 4 ] .

4) Область возникновения ВЧ разряда, закрашенная сплошь.

Область напряжений, закрашенная на в.-в.х. сплошь, является как бы продолжением области стримеров. При уменьшении давления вместе с исчезновением стримеров исчезает и эта область ВЧ вспышек.

Это подтверждает еще раз высказанное в работе [ 4 ] предположение о том, что в данной области ВЧ вспышки развиваются из стримера положительной короны.

5) Повышение пороговых напряжений вспышечных импульсов и стримеров положительной короны при смешанных напряжениях.

Относительное повышение порогов напряжений вспышечных импульсов и предначальных стримеров положительной короны на смешанных напряжениях при увеличении переменной составляющей может быть объяснено замедлением лавинных процессов при понижении давления. Поэтому для появления разряда требуется более длительное превышение напряжения над пороговым значением постоянного напряжения в течение положительного полупериода синусоидального напряжения, что ведет к относитель-

ному повышению порогов при смешанных напряжениях, хорошо видных на рис. 13.

## У. Заключение

Из вышеизложенного можно заключить:

1. Одной из возможных причин относительно более быстрого снижения порога ВЧ разряда с понижением давления является процесс образования объемного заряда положительных ионов, который своим полем увеличивает локальную напряженность электрического поля у острия.

2. Образование объемного заряда вызвано увеличением размеров активной зоны ионизации с падением давления.

3. Понижение давления приводит к сужению области напряжений, при которых существуют стримеры. Причиной опять-таки является увеличение размеров активной зоны, а также увеличение длины и времени свободного пробега электронов, приводящее к ослаблению лавинных процессов.

4. Исчезновение области возникновения ВЧ разряда, закрашенной сплошь на в.-в.х., с понижением давления связано с исчезновением стримеров.

5. Относительное увеличение порогового напряжения вспыхивающих импульсов связано с замедлением лавинных процессов при понижении давления.

6. Все вышеизложенное приводит к общему заключению, что существует аналогия в ходе процессов образования разряда между повышением частоты при постоянном давлении газа и понижением давления при постоянной частоте питающего напряжения. Следовательно, одно из условий подобия ВЧ разрядов:  $p \cdot \lambda = \text{const}$ , где  $p$  - давление и  $\lambda$  - длина волны приложенного ВЧ поля, оказалось приблизительно выполненным и в наших экспериментах.

Отметим, что описанные выше измерения были выполнены и на частоте 0,9 МГц. Существенной разницы по сравнению с измерениями на частоте 0,4 МГц мы не заметили.

## Л и т е р а т у р а

1. Кузовников А.А. "Научные доклады высшей школы", 1958, I, № 4, 191.
  2. Кузовников А.А., Цянь Гао-Цунь "Известия ВУЗ-ов (Физика)", 1960, № 5, 55.
  3. Солицев Г.С. "ЖЭТФ", 1952. № 4, 406.
  4. Куду К.Ф. О начальных стадиях разряда с острия в воздухе. Тарту, 1960.
  5. Кабардин О.Ф. "Известия ВУЗ-ов (Физика)", 1958. № 6, 51.
  6. Кабардин О.Ф. Сб. статей по математике и физике, Оренбургский гос. пед. ин-т им. В.П. Чкалова. 1961, 221.
  7. Кабардин О.Ф. "Уч. зап. Чкаловского гос. пед. ин-та им. В.П. Чкалова". Серия физ-мат. наук, 1957, вып. II, 249.
  8. Sherwood A. "Phys. Rev.", 1940, 57, nr.9, 822.
  9. Loeb L. Electrical coronas. California, 1965.
  10. Куду К.Ф., Веймр В.А. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1970, вып. 240, 221.
- II. Bandel H.W. "Phys. Rev.", 1951, 84, 92.

### UNIPOLAARSE KÕRGSAGEDUSLAHENDUSE VOLT-VOLT KARAKTERISTIKUD SAGEDUSEL 0,4 MHz ÕHUS ALARÕHUL

M. Aints, V. Veimer, K. Kudu

Resümees

On mõõdetud mitmesuguste lahendusvormide lävepingeid plaatteravik lahendusvahemikus segapingetel vahelduvkompo-

nendi sagedusel 0,4 MHz õhus rõhkude piirkonnas 4 - 760 Torri. Mõõtmistulemuste põhjal on ehitatud lahenduse volt-volt karakteristikud.

Leiti, et muutused volt-volt karakteristikute käigus rõhu alandamisel konstantse sageduse juures on sarnased muutustele, mis toimuvad sageduse tõstmisel normaalarõhul. See sarnasus on tingitud ruumlaengu tekkimisest teraviku lähedusse kummalgi juhul.

UNIPOLAR HF DISCHARGE VOLT-VOLT CHARACTERISTICS  
AT FREQUENCY OF 0.4 MHz IN THE AIR AT SUBNORMAL  
PRESSURE

M. Aints, V. Veimer, K. Kudu  
Summary

Threshold potentials of various discharge forms have been measured in the point-to-plane discharge gap at mixed voltages at the frequency of the alternating component 0,4 MHz in the air within the pressure range of 4 to 760 Torrs. On the basis of these measurements volt-volt characteristic curves have been drawn.

It has been established that changes in the shape of the volt-volt characteristics with the lowering of pressure at a constant frequency are similar to those changes which occur with the raising of frequency at a normal pressure. The analogy is due to the space charge formation near the tip of the point electrode in either case.



**О МЕТОДИКЕ СНЯТИЯ СЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
СТРИМЕРОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ КОРОНЫ  
В ПРОМЕЖУТКЕ ОСТРИЕ-ПЛОСКОСТЬ**

В.А. Веймер, А.Я. Хальясте

При изучении газового разряда особое внимание уделено вопросам пробоя разрядного промежутка. Однако, за последние годы заметно увеличился интерес к предпробойным явлениям, особенно к стримерному разряду. Добавочную информацию о стримерном разряде можно получить из счетных характеристик стримеров. Как известно, вероятность возникновения и интервал напряжений существования стримеров зависят от геометрии разрядного промежутка, от начальной ионизации в разрядном промежутке, от давления, температуры и химического состава газа [1, 2]. На практике, например, счетные характеристики стримеров положительной короны можно использовать для определения концентрации хлора в воздухе [3].

Для более детального выяснения условий возникновения как предначальных, так и предпробойных коронных стримеров на основе счетных характеристик была предпринята работа [4], в которой счетные характеристики построены по точкам. Для этого приложенное к разрядному промежутку напряжение определяли в каждой точке компенсационным методом, число стримеров за определенный промежуток времени подсчитывали счетчиком импульсов, вычисляли число стримеров в единицу времени и только после этого можно было представить результаты графически.

Описанный метод имеет ряд недостатков. Он очень трудоемкий: для осуществления статистики требуется большое число измерений, на которые затрачивается много времени. Например,

снятие счетных характеристик, представленных в [ 4 ], потребовало два месяца напряженной работы.

В данном случае вопрос о времени имеет еще другой аспект. При длительных измерениях в открытой системе некоторые параметры, определяющие вероятность возникновения стримеров, могут самопроизвольно изменяться. Результатом этого является появление ошибок в полученных зависимостях. Часто этим можно объяснить расхождения не только в результатах, полученных разными исследователями, но и в результатах, полученных одним и тем же исследователем. Таким образом, затруднено сравнение результатов, и нередко приходится повторять уже проделанные эксперименты.

Недостатками можно считать и сложность точного установления напряжения на разрядном промежутке и большой объем работ по обработке результатов измерений.

Для устранения указанных недостатков целесообразно перейти к непрерывной записи счетных характеристик, т.е. автоматизировать весь ход их получения. При методе непрерывной записи приложенное к разрядному промежутку напряжение должно изменяться непрерывно по простому, например, по линейному закону. В таком случае отпадут операции установления напряжения. В результате сокращается затрачиваемое на измерения время и уменьшается ошибка, обусловленная длительностью измерения. При этом надо иметь в виду одно обстоятельство. Изменение напряжения на разрядном промежутке должно происходить достаточно медленно — ведь возникновение стримеров имеет статистический характер и поэтому надо усреднить по времени частоту их возникновения. Следовательно, для получения заданной точности необходимо определенное время усреднения.

При использовании метода непрерывной записи получают уже готовые счетные характеристики стримеров на ленте самописца, чем обеспечена возможность непрерывно следить за ходом эксперимента, что в ряде случаев очень удобно.

## 1. Экспериментальная установка

Блок-схема установки непрерывной записи счетных характеристик стримеров положительной короны в промежутке острове-плоскость приведена на рис. 1.

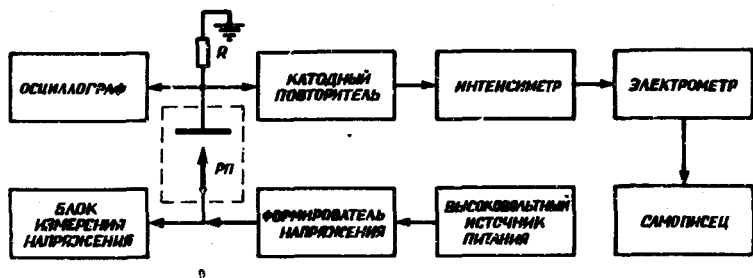


Рис. 1.

Блок-схема установки непрерывной записи счетных характеристик стримеров.  $PI$  - разрядный промежуток.

Высокое напряжение от высоковольтного источника питания подается на вход формирователя напряжения. На выходе последнего формируется высоковольтный импульс с медленным линейным ростом переднего фронта и быстрым экспоненциальным спадом заднего. Напряжение такой формы приложено к острию разрядного промежутка  $PI$ . Противостоящий плоский электрод заземлен через резистор  $R$ , который используется также в качестве измерительного сопротивления. Снимаемые с резистора импульсы разрядного тока подаются через катодный повторитель на вход логарифмического интенсиметра. Выходное напряжение интенсиметра пропорционально логарифму среднего числа стримеров в единицу времени. Измеряется оно посредством электрометра и регистрируется на диаграммной ленте самописца в полулогарифмическом масштабе.

В качестве высоковольтного источника питания был использован прибор BS -222 фирмы "Tesla", выходное напряжение которого плавно регулируется в пределах от 0 до 50 кВ.

Принципиальная схема формирователя высокого напряжения представлена на рис. 2.

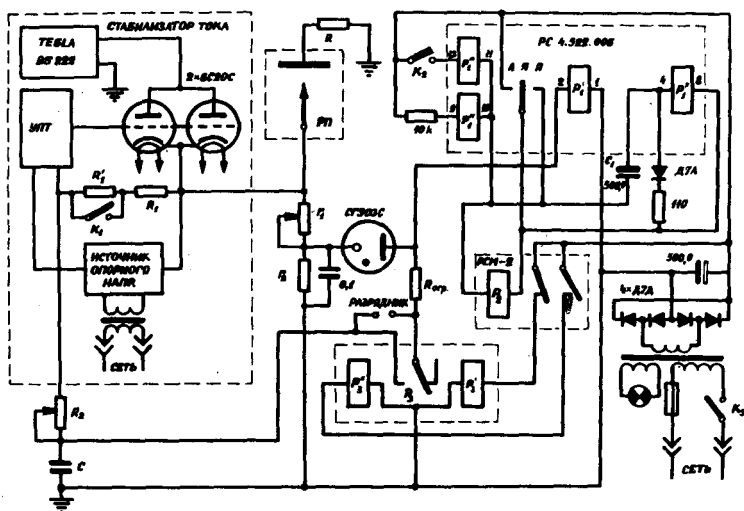


Рис. 2.

Принципиальная схема формирователя высокого напряжения.  
УИП - усилитель постоянного тока.

От высоковольтного источника конденсатор С заряжается через стабилизатор тока. Вследствие постоянства зарядного тока напряжение как на емкости С, так и на разрядном промежутке ПД увеличивается по линейному закону. Величина зарядного тока, т.е. скорость возрастания напряжения, определена положением тумблера  $K_1$ . Стабилизатор тока выполнен на основе описанного в работе [ 4 ] высоковольтного стабилизатора

напряжения с компенсированной отрицательной обратной связью. Нелинейность роста напряжения на конденсаторе  $C$ , вызванная нестабильностью зарядного тока, не превышает 0,025 %.

Начальный уровень, с которого начинается линейный рост выходного напряжения, определен падением напряжения на переменном сопротивлении  $R_2$ .

При помощи делителя  $r_1 - r_2$  часть выходного напряжения подается на коронный стабилизатор СГ 303С, который работает в режиме пробоя. Для лучшего фиксирования пробивного напряжения стеклянный баллон стабилизатора покрыт тонким слоем  $\beta$ -активного вещества.

Последовательно со стабилизатором включена обмотка  $P_I^I$  поляризованного реле  $P_I$  типа РП-4. В исходном состоянии стабилитрон тока не проводит. Ток от источника питания реле идет через обмотку  $P_I^{IV}$  и создает начальную намагниченность в сердечнике реле. Высоковольтное реле  $P_3$  включено, так как через его обмотку  $P_3^I$  течет ток.

Конденсатор  $C$  заряжается до тех пор, пока не возникнет пробой в стабилитроне. При пробое ток пробивного импульса идет через обмотку  $P_I^I$  и контакты Л-Я замыкаются. Теперь ток идет через обмотку  $P_I^{II}$  и через обмотку реле  $P_2$ . Реле  $P_2$  срабатывает, и ток через обмотку  $P_3^I$  реле  $P_3$  переключается на обмотку  $P_3^{II}$ . Вследствие этого контакты реле  $P_3$  переключаются и конденсатор  $C$  начинает разряжаться через ограничивающее сопротивление  $R_{огр}$ . Напряжение на выходе формирователя экспоненциально с постоянной времени  $\tau = 1,2$  с падает на начальный уровень.

Через некоторое время после пробоя стабилитрона ток через него прекращается, но направление зарядного тока конденсатора  $C_I$  через обмотку  $P_I^{II}$  такое, что контакты Л-Я остаются замкнутыми. Они размыкаются, когда зарядный ток становится недостаточным для создания необходимой намагниченности сердечника. Тогда конденсатор  $C_I$  быстро разряжается через диод  $D_I$ , контакты реле  $P_2$  и  $P_3$  переключаются. Конденсатор  $C$  начинает заряжаться, и весь цикл повторяется. Время задержки между циклами  $t_3 = 15$  с.

Замыкать конденсатор  $C$  можно в любой момент времени включением тумблера  $K_2$ . В таком случае цикл начинается только через промежуток времени  $t_3$  после выключения тумблера  $K_2$ .

Формирователь имеет автоматическую блокировку во избежание перенапряжения конденсатора  $C$ . Для этого параллельно последнему подключен шаровой разрядник. Пробой в разряднике возникает при напряжении на конденсаторе 17 кВ. Ток разряда идет через ограничивающее сопротивление  $R_{огр}$  и через обмотку  $P_I^I$  реле  $P_I$ , вследствие чего срабатывает система реле и конденсатор  $C$  разряжается до конца.

Переменные сопротивления  $R_2$  и  $r_1$  выполнены в виде высоковольтных переключателей. При помощи последних можно регулировать начальный и конечный уровень выходного напряжения ступенями по 5 кВ или по 1 кВ до 45 кВ.

Скорость нарастания напряжения на выходе формирователя была в зависимости от положения тумблера  $K_1$  505 В/мин или 160 В/мин.

Интенсиметр служит для измерения среднего числа стримеров в единицу времени. Известно, что эта величина может изменяться в широких пределах [4]. Использование линейного интенсиметра нецелесообразно ввиду необходимости изменения чувствительности прибора в ходе измерений. Это затрудняет автоматизацию измерений. Более подходящим является в данном случае логарифмический интенсиметр, чувствительность которого пропорциональна логарифму скорости счета.

В данной работе за основу была принята схема Гудиб-Санина [5, 6]. Окончательная схема сконструированного нами логарифмического интенсиметра приведена на рис. 3. Принцип работы схемы следующий.

Полученный с измерительного сопротивления  $R$  (рис. 1) импульс тока стримера усиливается на транзисторе  $T_1$ . Усиленный импульс запускает идущий мультивибратор, собранный на транзисторах  $T_3$  и  $T_4$ . Формированный мультивибратором прямоугольный импульс длительностью 50 мкс дифференцирует и ограничивает снизу на пилевом уровне. Дифференцированным импульсом запускают идущий мультивибратор, собранный на лампе  $L_1$ .

Предшествующее дифференцирование импульса необходимо для стабилизации длительности прямоугольного импульса, генерируемого вторым из двух мультивибраторов.

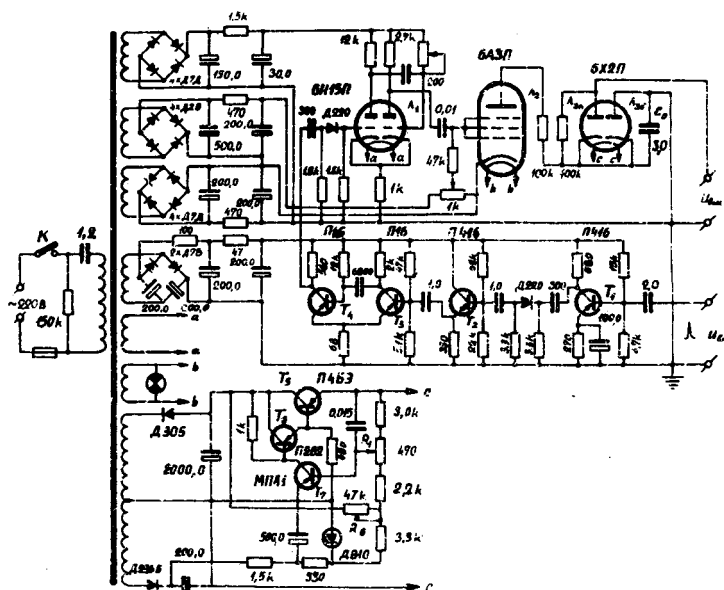


Рис. 3.

Принципиальная схема логарифмического интенсиметра.

Импульсами второго из двух мультивибраторов длительностью  $2\tau$  мкс открывают запертую в нормальном состоянии лампу  $L_2$ . В анодную цепь последней включен интегрирующий конденсатор  $C_0$ , который зашунтирован диодом  $L_{30}$ . При отсутствии на выходе сигнала конденсатор  $C_0$  заряжен начальным током диода  $L_{30}$  до некоторого небольшого напряжения. Когда на вход схемы подаются импульсы, напряжение на емкости начинает меняться. В некотором интервале частот напряжение пропорционально логарифму от среднего числа поступающих на

вход в единицу времени импульсов.

В запертом состоянии лампа  $L_2$  не должна пропускать даже очень малый ток, иначе ток разряда конденсатора  $C_0$  будет определен не только диодом  $L_{3б}$ . Ток утечки использованной в схеме лампы 6АЗП в запертом состоянии  $\sim 10^{-10}$  А [ 6 ] .

Для нормальной работы схемы необходимо, с одной стороны, чтобы токи утечки конденсатора  $C_0$  и запертой лампы  $L_2$  были минимальными, и с другой стороны, чтобы ток накала лампы  $L_3$  был стабильный и ток утечки между катодом и подогревателем был минимальный. Последнее требование означает, что накальная обмотка лампы  $L_3$  должна быть тщательно изолирована от остальных обмоток трансформатора. Так как и другие напряжения питания должны быть по возможности стабильны, в качестве источника питания схемы был использован феррорезонансный стабилизатор. Для лучшей стабилизации накального напряжения лампы  $L_3$  был собран двухкаскадный компенсационный стабилизатор с последовательным регулирующим составным транзистором. Транзисторы  $T_5$  и  $T_6$  являются регулирующими элементами, транзистор  $T_7$  сравнивающим и усиливающим элементом. Потенциометром  $R_4$  можно регулировать выходное напряжение, а потенциометром  $R_6$  его стабильность.

Во избежание токов утечки монтаж схемы интенсиметра выполнен на полистиролевых панелях и обмотки накального стабилизатора изолированы от остальных обмоток при помощи фторопластовой пленки.

Калибровка интенсиметра проводилась соответственно приведенной на рис. 4 блок-схеме. На вход интенсиметра подавали прямоугольные импульсы от импульсного генератора Г5-6А. На частотах ниже 5 Гц для внешнего запуска последнего использовался низкочастотный генератор НГПК-3. Частоту следования импульсов определяли при помощи счетчика ПС-10000.

При измерении выходного напряжения интенсиметра требуется большое входное сопротивление измерительного прибора для предотвращения тока утечки конденсатора  $C_0$  (рис. 3). По этой причине в данной установке использован электрометр ВК 2-16, входное сопротивление которого больше  $10^{16}$  Ом. Класс



точности электрометра 2,5. Электрометр имеет выход для подключения самописца.

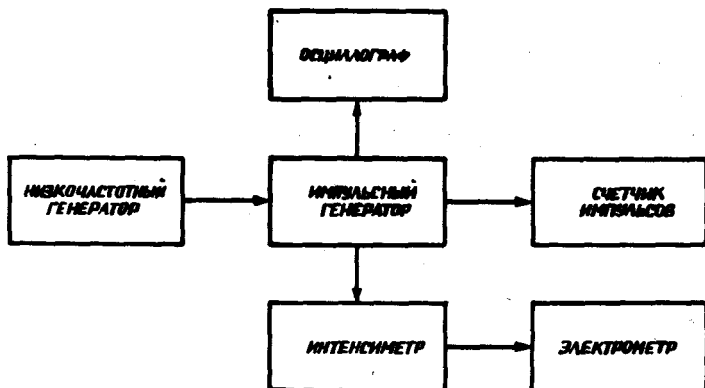


Рис. 4.  
Блок-схема калибровки интенсимиетра.

Калибровочная кривая интенсимиетра изображена на рис. 5. Как видно, выходное напряжение интенсимиетра можно считать линейно зависящим от логарифма частоты следования импульсов до частоты 5000 Гц. Ошибка при этом не превышает 10 %.

Так как сигнал с измерительного сопротивления  $R$  (рис. 1) на вход интенсимиетра подавался при помощи коаксиального кабеля, то для согласования сопротивлений использовался собранный по схеме Уайта катодный повторитель.

Примененный в данной установке самописец типа  $ekBT1EN$  является 1,5 секундным прибором. Класс точности 0,5. Пределы измерения напряжения - I + 0 + +I мВ.

Для наблюдения формы импульсов разрядного тока использовался осциллограф CI-35.

Блок измерения напряжения собран соответственно схеме на рис. 6. Приложенное к разрядному промежутку напряжение измеряли при помощи емкостного делителя  $C' - C''$ , коэффициент деления которого определяли при помощи делителя напря-

жения на сопротивлениях ИВСТ (0,03 %).

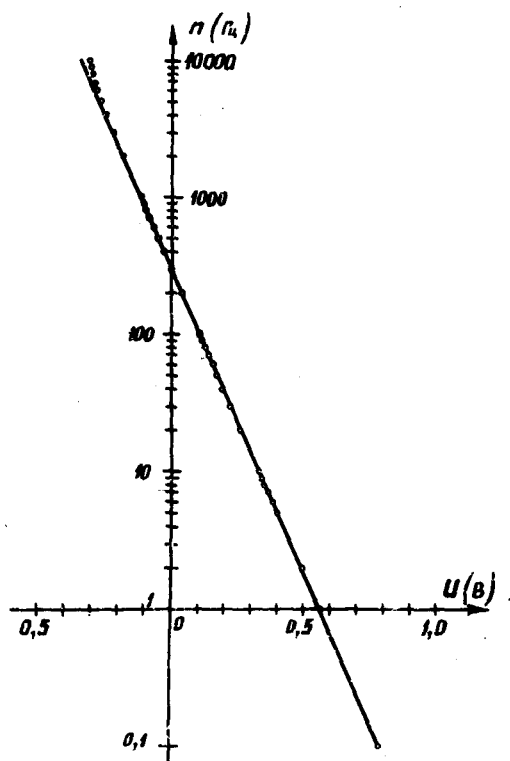


Рис. 5.

Калибровочная кривая интенсимера.

При непрерывной записи счетных характеристик следили за приложенным к разрядному промежутку напряжением по показаниям прибора  $V_1$  (вольтметр типа С-50 с пределом измерения 150 В или 300 В, класс точности I,0). При определении пороговых напряжений разряда и в других экспериментах, когда формирователь высокого напряжения был заменен стабилизатором напряжения, применяли компенсационный метод измере-

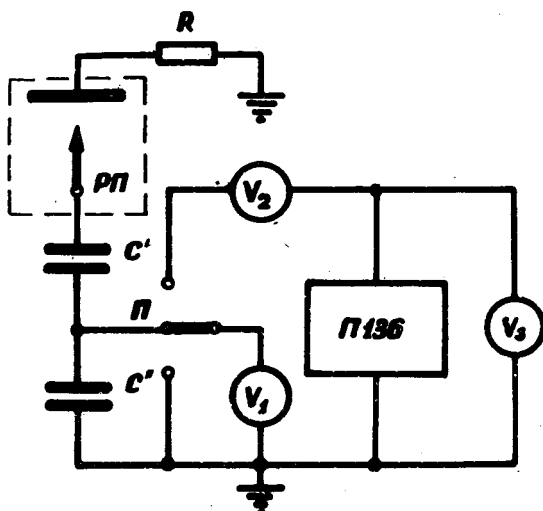


Рис. 6.

Схема измерения напряжения.

ния напряжения. В таком случае сравнивали снимаемое с емкостного делителя напряжение с напряжением стабилизированного источника П136. Разность этих напряжений показывал вольтметр  $V_2$  типа С-70 с пределом измерения 10 В и классом точности 1,5. Изменением стабилизированного напряжения источника П136 (стабильность по паспорту 0,02 %) регулировали показание вольтметра  $V_2$  максимальным так, что снимаемое с делителя напряжение равнялось сумме показаний вольтметров  $V_2$  и  $V_3$ . Вольтметр  $V_3$  типа М106 имеет класс точности С,5, чем определена в данном случае также точность измерения приложенного к разрядному промежутку напряжения.

Использовался разрядный промежуток острие-плоскость (рис. 7). В качестве коронирующего острия (1) использовалась платиновая проволока диаметром 1 мм. Полусферически обработанный конец проволоки имел радиус кривизны 0,5 мм. Острие было закреплено при помощи держателя (2) к эбонитово-

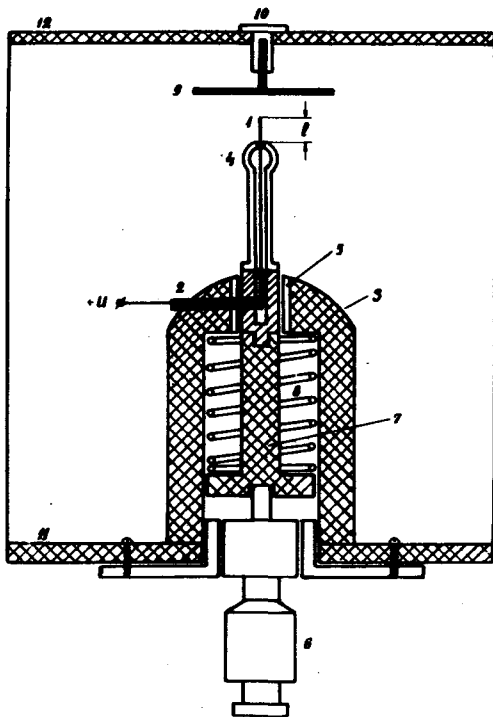


Рис. 7.  
Разрез разрядного промежутка.

му корпусу (3). Проволока находилась на оси медного цилиндра диаметром 4 мм. Цилиндр кончается полым шаром (4) с отверстием для проволоки. Диаметр шара 6,5 мм. Шар может перемещаться вдоль проволоки, что вызывает изменение конфигурации электрического поля вблизи острия. Для перемещения шара и измерения длины  $l$  выступающей из шара проволоки использовался прикрепленный к изолятору (II) микрометрический винт (6). Последний не находится под напряжением, так как он соединен с металлическими деталями острия изолирующим стержнем (7),

который двигался во втулке (5). Сжатая спиральная пружина (8) обеспечивает отсутствие зазора между стержнем (7) и микровинтом (6).

Плоским электродом разрядного промежутка является круглый медный диск (9), который при помощи держателя (10) прикреплен к изолятору (12). Как диск (9), так и цилиндр с шаром (4) полхромованы и никелированы.

## II. Результаты контрольных измерений.

Были проведены предварительные измерения для выяснения возможностей и надежности всего измерительного комплекса. Использовался вышеописанный разрядный промежуток острье-плоскость при диаметре плоского электрода 150 мм. На рис. 8 и 9 представлена зависимость пороговых напряжений всплывочных импульсов (А), предначальных стримеров (В), непрерывной всплывочной короны (С) и пробоя (Е) от длины  $l$  выступающего из шара проволочного острья при расстоянии между острием и плоскостью 40 мм и 10 мм соответственно. Видно, что при уменьшении длины острья область непрерывной всплывочной короны сужается до полного исчезновения при очень небольших длинах острья. В таком случае области существования предначальных и предпробойных стримеров сливаются, а пороговое напряжение пробоя снижается.

На рис. 10 - 12 представлены счетные характеристики стримеров, соответствующие обозначенным пунктирными линиями вертикальным сечениям I-7 на рис. 8. Счетные характеристики на рис. 13 соответствуют вертикальным сечениям I-5 на рис. 9.

На рис. 10 - 13 одному делению по горизонтали соответствует изменение напряжения на разрядном промежутке 480 В. Одному делению вертикальной оси соответствует изменение выходного напряжения логарифмического интенсиметра на 0,02 В. Положительное направление изменения этого напряжения на рисунках сверху вниз. Используя калибровочную кривую интенсиметра, можно определить соответствующие частоты с точностью 26 %.

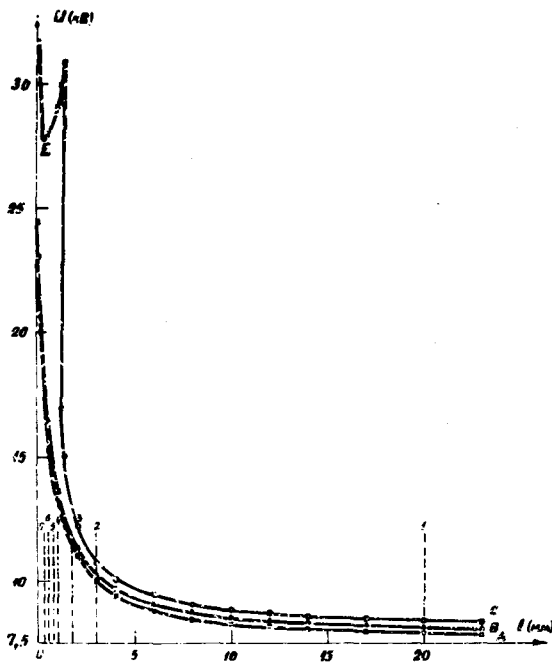


Рис. 8.

Зависимость пороговых напряжений вспышечных импульсов (А), предначальных стримеров (В), непрерывной вспышечной короны (С) и пробоя (Е) от длины  $l$  выступающего из пара проволочного острия при расстоянии между острием и плоскостью  $L = 40$  мм.

На всех записях самописца хорошо видна статистическая природа появления стримеров, с чем говорят флуктуации записанной линии около некоторого среднего положения. Кроме того, эти флуктуации указывают, что измерительная система достаточно хорошо следит за действительным ходом счетной характеристики.

Характерным является первоначальный относительно быстрый рост средней частоты следования предначальных стримеров около порога. Так как при поступлении первых импульсов на вход интенсиметра чувствительность интенсиметра высокая, то быстрый рост частоты регистрируется хорошо.

Отклонение от действительного хода счетной характеристики может возникнуть на спаде последней, когда скорость уменьшения частоты стримеров превышает скорость установления

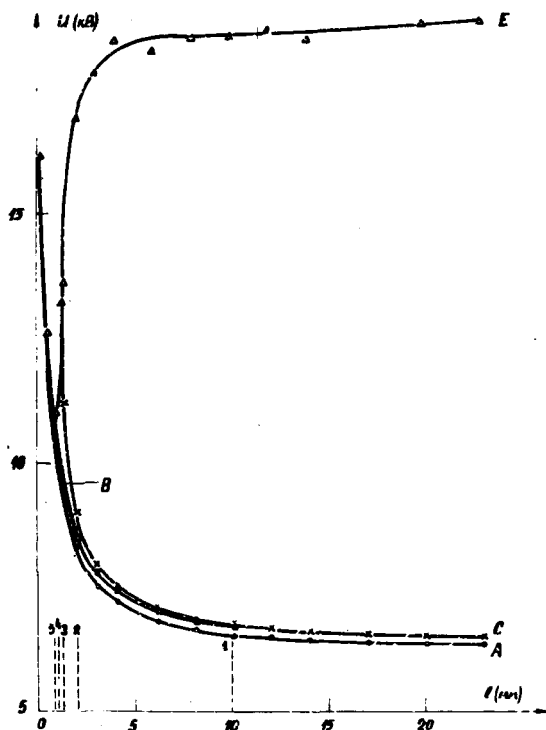


Рис. 9.  
Зависимость пороговых напряжений вспыхивающих импульсов (А), предначальных стримеров (В), непрерывной вспыхивающей короны (С) и пробоа (Е) от длины  $l$  выступающего из шара острия при расстоянии между острием и плоскостью  $L = 10$  мм.

соответствующего показания интенсиметра. Скорость установления определяется временем, которое требуется для логарифмирования. Существование изменяющегося времени установления определяется самим принципом непрерывного логарифмирования и не является конструктивным недостатком интенсиметра. Поэтому скорость роста приложенного к разрядному промежутку напряжения должна выбираться достаточно малой, чтобы время установления показаний интенсиметра не искажало счетные характеристики.

Интересны счетные характеристики на рис. 10-12. При малых  $l$  здесь видны образование плато на счетной характе-

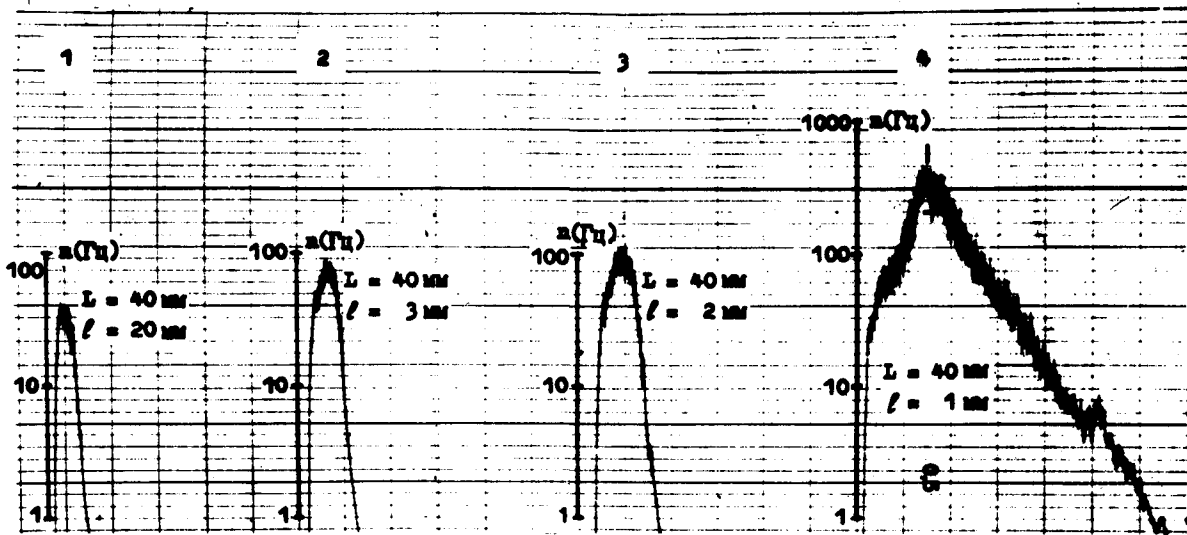


Рис. 10. Счетные характеристики стримеров, снятые по указанным на рис. 8 вертикальным сечениям I - 4. Цена деления по горизонтали - 480 В.



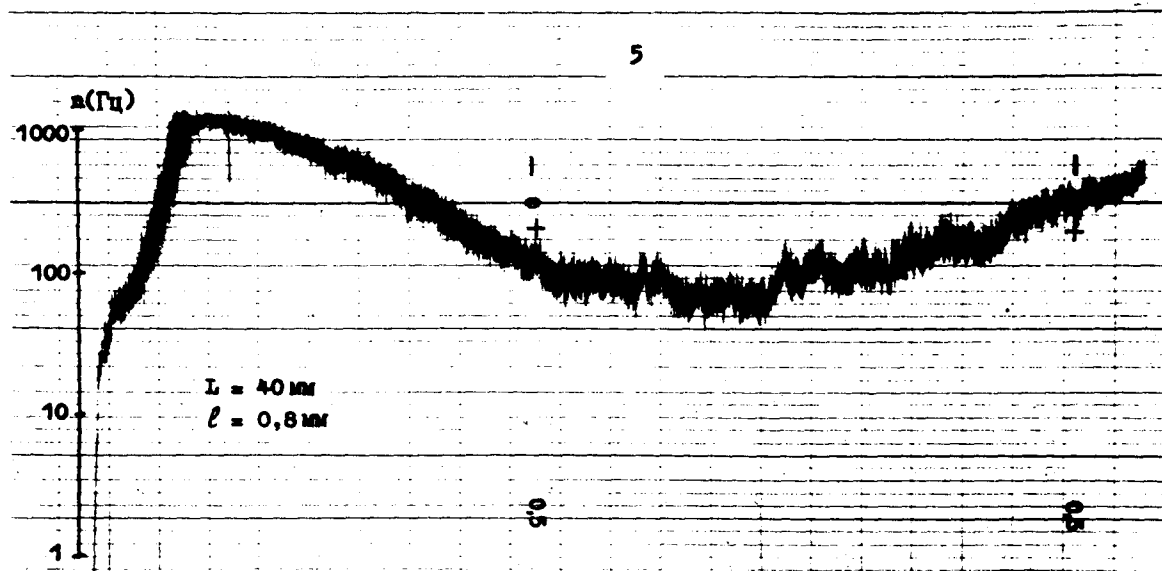


Рис. II. Счетная характеристика стримеров, снятая по указанному на рис. 8 вертикальному сечению 5. Цена деления по горизонтали - 480 В.

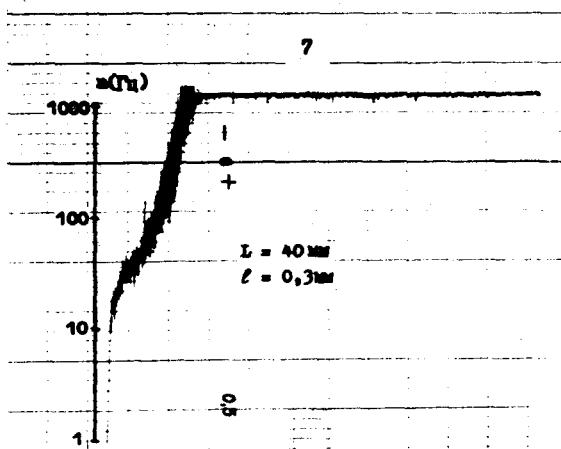
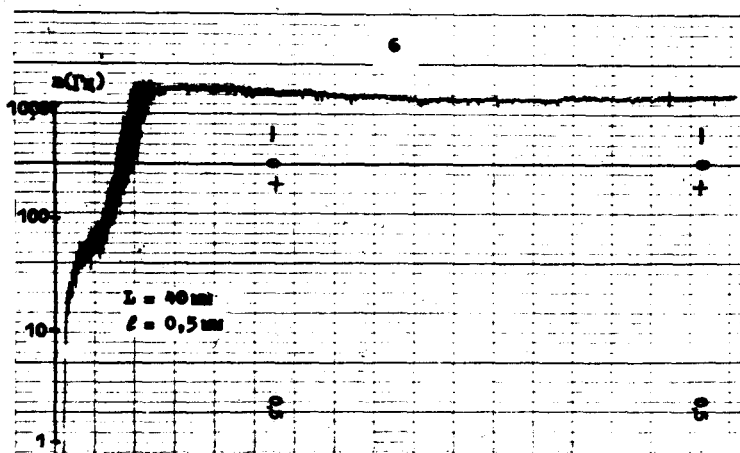


Рис. 12. Счетные характеристики стримеров, снятые по указанным на рис. 8 вертикальным сечениям 6 и 7. Цена деления по горизонтали - 480 В.

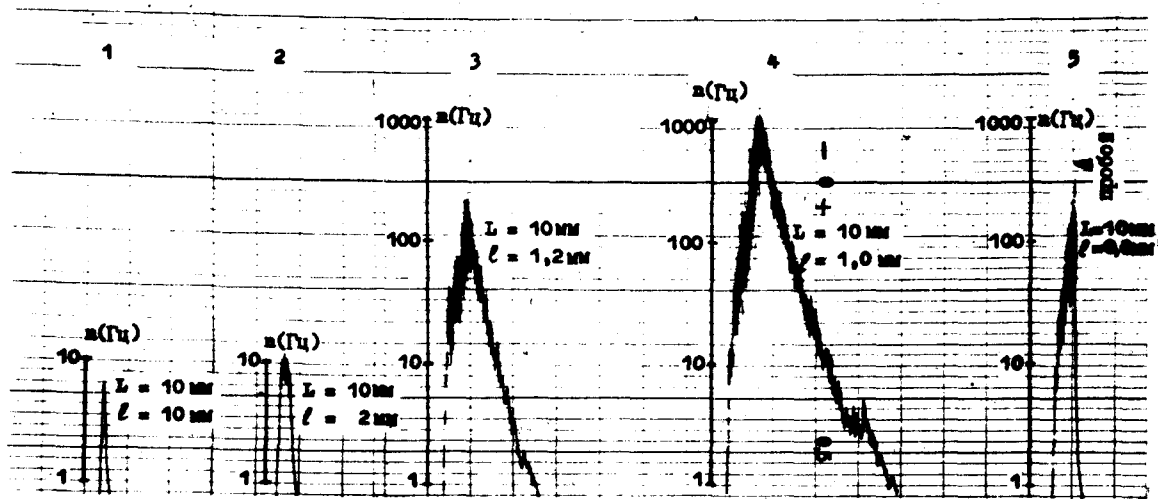


Рис. 13. Счетные характеристики стримеров, снятые по указанным на рис. 9 вертикальным сечениям I - 5. Цена деления по горизонтали - 480 В.

ристике и исчезновение флуктуации частоты. Проверено, что плато не обусловлено какими-либо ограничивающими свойствами измерительной системы. Как осциллографические, так и визуальные наблюдения показали большую стабильность частоты. Исходящие с острья стримеры образовывали относительно ярко светящуюся кисть, которая простиралась глубоко в разрядный промежуток. Явление было похожем на описанный Богдановой и Попковым [7] "факельный разряд на постоянном напряжении".

При расстоянии между электродами 10 мм плато на счетных характеристиках не существовало.

Наконец, нельзя не отметить большого сходства как зависимости пороговых напряжений от длины острья  $l$ , так и счетных характеристик в данном разрядном промежутке и в коаксиальноцилиндрическом промежутке [4], что указывает еще раз на существенную роль околоостриевого пространства в физических явлениях в разряде с острья.

### III. Заключение

Полученные на описанной экспериментальной установке результаты предварительных измерений показывают, что установка может быть с успехом использована для получения счетных характеристик стримеров положительной короны в разрядном промежутке острье-плоскость. Возможности установки позволяют использовать ее для получения счетных характеристик стримеров и в других асимметричных разрядных промежутках. Самостоятельный интерес могут представлять описанный выше формирователь линейно возрастающего высокого напряжения и логарифмический интенсиметр.

### Л и т е р а т у р а

1. Loeb L.B. Electrical Coronas, Their Basic Physical Mechanisms. University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1965.

2. Loeb L.B. "Rev. Roum. Phys.", 1968, 13, nr. 2, 163-172.
3. Vaaka M. Positiivse koroona striimerid haloidide indikaatorina. Diplomitöö, Tartu, TRÜ, 1960. (Дипломная работа, выполненная в Тартуском гос. ун-те).
4. Куду К.Ф., Веймер В.А. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1970, вып. 240, 22I-13I,
5. Goodyear W.F. "Electronics", 1951, 24, nr. 7, 208.
6. Саяни А.А. "Электронные приборы ядерной физики", М., 1964.
7. Богданова Н.Б., Попков В.И. "Изв. Академии Наук СССР, Энергетика и транспорт", 1968, № I, 79-87.

POSITIIVSE KOROONA STRIIMERITE LOENDUSKARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMISE METOODIKAST LAHENDUSVAHEMIKUS TERAVIK-PLAAT

V. Veimer, A. Haljaste  
Resüme

Kirjeldatakse automaatsüsteemi positiivse koroona striimerite loenduskarakteristikute pidevaks registreerimiseks ja muudetava elektrivälja jaotusega teravik-plaat lahendusvahemikku. Süsteemi töö põhimõte on lühidalt järgmine.

Lahendusvahemikule teravik-plaat rakendatakse ajas lineaarselt kasvav kõrgepinge nii, et läbitakse pingeintervall, kus eksisteerivad striimerid. Lahendusvahemiku üks elektroodidest maandatakse läbi mõõtetakisti. Striimerite vooluimpulsside keskmist arvu sellel takistil mõõdetakse logaritmilise intensiteetri abil ja registreeritakse isekirjutaja lindil poollogaritmilises mastaabis.

Lineaarselt kasvava kõrgepinge saamiseks kasutatakse kon-

densaatori laadimist läbi voolustabilisaatori (stabiilsus 0,025). Kirjeldatud süsteem võimaldas saada pinge lineaarse kasvu 16 kV ulatuses. Intervalli laius ja pinge algväärtus olid astmeliselt reguleeritavad. Kasutati pinge kaht tõusu-kiirust - 505 V/min ja 160 V/min.

Goodyear-Sanini skeemi alusel konstrueeritud logaritmilise intensimeetri väljundpinge oli lineaarselt sõltuv sisendimpulsside kordussagedusest kuni sageduseni 5 kHz. Intensimeetri universaalsus erineva kujuga impulsside loenduskiiruse registreerimiseks on tagatud sisendimpulsside mitmekordse formeerimisega.

40 mm ja 10 mm pikkuste lahendusvahemike korral määrati koroonapursete, algstriimerite, pideva koroona ja läbilöögi lävepingete sõltuvus metallkera asendist teraviku tipu suhtes. Leiti, et algstriimerite ja pideva koroona eksisteerimise pingeintervallid sõltuvad samuti kera asendist. Kui kera asub teraviku tipule väga lähedal, ei ole pideva koroona tekkimine enne läbilööki enam võimalik ja algstriimeritele järgnevad vahetult läbilöögieelsed striimerid. Automaatsüsteemi võimaluste illustreerimiseks esitatakse striimerite loenduskarakteristikud kuuli erinevate asendite korral.

ON THE METHOD OF DETERMINING COUNTING CURVES OF  
POSITIVE CORONA STREAMERS IN THE POINT-TO-PLANE  
DISCHARGE GAP

V. Veimer, A. Haljaste

Summary

The paper describes an automatic system for recording counting curves of positive corona streamers and the point-to-plane discharge gap with a changeable distribution of the electric field.

The principle underlying the system is briefly as follows. High voltage increasing linearly in time is applied

to the point-to-plane discharge gap so that the voltage interval where streamers occur is passed through. One of the electrodes of the discharge gap is grounded by the measuring resistor.

The mean number of current pulses of streamers on this resistor was measured by means of a logarithmic intensimeter and was taken down on recorder tape in the semilogarithmic scale.

To obtain a linearly increasing high voltage the condenser was charged through the current stabilizer providing a stability of 0.025. The system described above enabled us to obtain a linear growth of voltage up to 16 kV. The width of the interval and the initial value of voltage could be regulated by steps. Two rates of a rise in the voltage were used - 505 V/min and 160 V/min. The output voltage of the logarithmic intensimeter designed according to the Goodyear-Sanin circuit was linearly dependent on repetition rate of input pulses up to a frequency of 5 kHz. The universality of the intensimeter for recording the counting rate of pulses of different form was ensured by the repeated formation of input pulses.

When the discharge gaps had a length of 40 mm and 10 mm, the authors determined the dependence of threshold voltages of burst pulses, pre-onset streamers, a steady corona and breakdown on the position of the metal sphere with regard to the point electrode tip. It was established that the voltage intervals of the existence of pre-onset streamers and a steady corona also depend on the position of the sphere. When the sphere was situated near the tip of the point electrode, the rise of a steady corona before the breakdown was no longer possible and pre-onset streamers were immediately followed by pre-breakdown streamers.

To illustrate various possibilities of the automatic system, counting curves of streamers are presented with the sphere in different positions.

## ИОНИЗАТОР ГАЗА С ОДНОРОДНОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ ЗОНОЙ

К.Э. Халлер, Я.И. Салым

Рассмотрим ионизатор в виде канала, через который течет газ, подлежащий ионизированию. В начальном участке канала (в ионизационной зоне) поддерживается однородное ионизирующее излучение. Однородное излучение практически нетрудно осуществить с помощью большого числа источников излучения, расположенных вокруг канала, причем энергия частиц должна быть достаточно велика. В следующем по потоку, конечном участке (в рекомбинационной зоне) ионизация отсутствует, происходит только рекомбинация. Ценность такой модели ионизатора заключается в том, что многие основные соотношения удается теоретически вывести, несмотря на нелинейность основного уравнения.

Целью настоящей работы поставлено теоретическое нахождение зависимости концентрации ионов от основных определяющих параметров ионизатора, рассматривая также круговую схему ионизатора (выход подключен ко входу). Задача является одномерной.

Если количество тяжелых ионов невелико по сравнению с легкими (газ не слишком загрязнен), а концентрации отрицательных и положительных ионов приблизительно равны ( $n_+ = n_- = n$ ), то ионизационное состояние описывается следующим нелинейным дифференциальным уравнением

$$\frac{dn}{dq} = q - \alpha n^2,$$

где  $q$  - интенсивность ионизации, т.е. число пар ионов, возникающих за единицу времени в единице объема,  $\alpha$  - коэффи-



коэффициент рекомбинации. Обозначив среднюю скорость потока газа  $u$ , можно записать

$$\frac{dn}{dx} = \frac{q}{u} - \frac{\alpha}{u} n^2. \quad (1)$$

В самом начале канала  $n_0 = 0$ . Интегрируя уравнение (1), получим концентрацию в конце ионизационной зоны

$$n_1 = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \operatorname{th} \left( \frac{\alpha q l_1}{u} \right), \quad (2)$$

где  $l_1$  - длина ионизационной зоны. В рекомбинационной зоне  $q = 0$ , а в начале ее  $n = n_1$ . После интегрирования получим концентрацию ионов в конце рекомбинационной зоны

$$n_2 = \frac{n_1}{1 + \frac{\alpha_1 n_1 l_1}{u}}. \quad (3)$$

Подставив формулу (2) в (3), имеем

$$n_2 = \frac{\sqrt{q/\alpha}}{\operatorname{cth}(\sqrt{\alpha q} l_1/u) + \sqrt{\alpha q} l_2/u}, \quad (4)$$

где  $l_2$  - длина рекомбинационной зоны.

Исследуем вопрос, каково влияние скорости потока газа. Если скорость мала, то концентрация приблизительно пропорциональна скорости

$$n_2 \approx \frac{u}{\alpha l_2}. \quad (5)$$

При большой скорости асимптотически

$$n_2 \approx \frac{q l_1}{u}. \quad (6)$$

Максимум концентрации имеет место при значении скорости

$$u_m = \frac{\sqrt{\alpha q} l_1}{\text{Arsh} \sqrt{l_1/l_2}}, \quad (7)$$

выражаясь в виде

$$n_{2(\text{макс})} = \frac{\sqrt{q/\alpha}}{\sqrt{1 + (l_1/l_2) + (l_2/l_1) \text{Arsh} \sqrt{l_1/l_2}}}. \quad (8)$$

С уменьшением отношения  $l_2/l_1$ , в пределе получим формулу

$$n_{2(\text{прег})} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}. \quad (9)$$

Теперь рассмотрим круговой (замкнутый) канал, выход рекомбинационной зоны которого подмиччен ко входу неинвазивной зоны. Для этого интегрируем уравнение (I) в пределах от  $n_2$  до  $n_1$ , в результате чего имеем

$$n_1 = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \text{th} \left( \sqrt{\alpha q} \frac{l_1}{u} + \text{Arth} \frac{n_2}{\sqrt{q/\alpha}} \right). \quad (10)$$

Используя также формулу (3), получим после очевидных, но довольно длинных математических преобразований [I]

$$n_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \frac{\sqrt{1 + 4 \frac{u}{l_2 \sqrt{\alpha q}} \text{cth} \left( \frac{\sqrt{\alpha q} l_1}{u} \right) + \left( \frac{2u}{l_2 \sqrt{\alpha q}} \right)^2} - 1}{\text{cth} \left( \frac{\sqrt{\alpha q} l_1}{u} \right) + \frac{u}{\sqrt{\alpha q} l_2}}. \quad (11)$$

Если скорость мала, то  $\frac{u}{\sqrt{\alpha q} l_1} \rightarrow 0$  и

$$n_2 \approx \frac{u}{\sqrt{\alpha q} l_2},$$

что совпадает с (5). При большой скорости

$$n_2 \approx \frac{\sqrt{q/\alpha}}{\sqrt{1+l_2/l_1}}$$

Далее исследуем зависимость концентрации ионов  $\epsilon$  по-  
мощью численного расчета. Исходим из характерной скорости  
 $\sqrt{\alpha q} l_1 = u_x$ . Введем безразмерные переменные  $\frac{u}{u_x} = u'$ ,  $\frac{l}{l_1} = l'$   
и  $u_2/\sqrt{q/\alpha} = u'_2$ . Тогда можем переписать формулу (4)

$$n'_2 = \frac{1}{\text{cth}\left(\frac{1}{u'}\right) + \frac{1}{u'l'}} \quad (4')$$

и формулу (II)

$$n'_2 = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 + 4u'l' \text{cth}\left(\frac{1}{u'}\right) + (2u'l')^2} - 1}{\text{cth}\left(\frac{1}{u'}\right) + u'l'} \quad (II')$$

Результаты приведены в табл. I. Верхнее число - безразмерная  
концентрация ионов при круговом ионизаторе, по формуле  
(II'), нижнее - при обычном ионизаторе, по формуле (4').

Таблица I.

$u'$ $l'$	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
0,2	0,0196 0,0196	0,0385 0,0385	0,0906 0,0906	0,1608 0,1584	0,2455 0,2144	0,3319 0,1648	0,3682 0,0949
0,5	0,0476 0,0476	0,0909 0,0909	0,1990 0,1985	0,3174 0,3018	0,4259 0,3161	0,5125 0,1829	0,5444 0,0977
1	0,0909 0,0909	0,1667 0,1667	0,3313 0,3292	0,4760 0,4323	0,5833 0,3754	0,6568 0,1899	0,6820 0,0967
2	0,1667 0,1667	0,2857 0,2857	0,4969 0,4908	0,6406 0,5516	0,7285 0,4142	0,7821 0,1935	0,7996 0,0992
5	0,3333 0,3333	0,5000 0,5000	0,7111 0,6957	0,8143 0,6609	0,8665 0,4417	0,8954 0,1985	0,9043 0,0995

Как видно из таблицы, концентрация ионов в случае кругового ионизатора монотонно увеличивается как с увеличением скорости потока, так и с увеличением отношения  $t' = t_1/t_2$ . При малых и больших скоростях зависимости выражаются вышеприведенными асимптотическими формулами.

### Л и т е р а т у р а

- I. Халлер К.Э. Аэроионизатор, работающий на бета-активном препарате. Конкурсная работа (эст. яз.). Тартуский гос. ун-т, 1969.

#### HOMOGEENSE IONISEERIMISTSOONIGA GAASIIONISAATOR

K. Haller, J. Salm

Resümee

Vaadeldakse avatud või suletud kanali kujulist ionisaatorit, millest voolab läbi ioniseeritav gaas. Kanali algosas tekitatakse homogeenset ionisatsiooni, aga lõpposas ionisatsioon puudub, toimub ainult rekombinatsioon. Lihtsustavatel eeldustel on teoreetiliselt tuletatud valemid ioonide kontsentratsiooni leidmiseks ionisaatori väljundis. Analüüsitakse õhuvoolu kiiruse mõju.

#### A GAS IONIZER WITH A HOMOGENEOUS IONIZATION ZONE

K. Haller, J. Salm

Summary

The paper discusses an ionizer having the form of an open or closed channel through which the gas to be ionized is passed. The initial part of the channel serves for the production of homogeneous ionization, the final part of the channel serves for recombination, since ionization is lacking there. Under

simplified assumptions formulas have been theoretically derived for the establishment of the ion concentration in the output of the ionizer. The effect of the rate of air flow is analyzed.

**О ПРИМЕНЕНИИ В ОТОРИНОЛАРИНГОЛОГИИ АЭРОИОНИЗАТОРОВ,  
АЭРОЗОЛЬНЫХ И ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЬНЫХ АППАРАТОВ,  
СКОНСТРУИРОВАННЫХ ТАРТУСКИМИ ФИЗИКАМИ**

**Э.К. Сяйде, С.Ф. Сибуль, А.К. Йентс**

В течение последних 30-40 лет уделяется внимание изучению действия как отрицательных, так и положительных электрических зарядов на организм. Этим вопросом занимались биологи и медики. Было установлено в основном нормализующее действие отрицательных зарядов на физиологические процессы в организме. Получил распространение и метод лечения электрическими зарядами - аэроионо- и электроаэроионотерапия. Указанными проблемами на кафедре оториноларингологии Тартуского государственного университета (ТГУ) занимается с 1954 года.

Для проведения исследований применялись ионизаторы, а также аэрозольные и электрсаэрозольные аппараты, сконструированные кафедрой общей физики ТГУ (Я.О. Рейнет, П.К. Прюллер, Х.Ф. Таммет, Л.О. Виснапуу, Э.И. Тамм и др.).

Использовались следующие генераторы: высокочастотный электроэффлювиальный аэроионизатор [1], ингалятор-ионизатор [2], термоионизатор [3], гидроионизатор [4], аэрозольный прибор [5], аэрозоль-ионизатор [6], кислородные аэрозольные ионизаторы АКИ-1, АКИ-2 [7,8,9,10], коронный ионизатор [11] и электроаэрозольный генератор к аппаратам искусственного дыхания [12].

Больше всего применялись высокочастотный электроэффлювиальный и кислородный аэрозольный ионизаторы.

Техническая характеристика названных аппаратов приведена в соответствующей литературе [1-13]. Гидроионизатор и коронный ионизатор могут быть использованы и для ионизации

помещения, все другие предназначены лишь для индивидуальных процедур. Наши наблюдения на пациентах проводились при индивидуальных ингаляциях.

Поскольку с помощью вышеупомянутых аппаратов можно генерировать отдельно отрицательные или положительные аэроионы и электроаэрозоли, то имелась возможность проследить влияние всех их в отдельности.

Применяя ингалятор-ионизатор или кислородный аэрозольный ионизатор, исследовали влияние биоплярной, т.е. отрицательной и положительной ионизации одновременно.

В данной работе физиологическое влияние аэроионов и электроаэрозолей прослежено на пациентах, а экспериментальные наблюдения проведены на лягушках, морских свинках и собаках.

На протяжении одного сеанса (5-10 мин) аэроионизации человек вдыхал 75-150 миллиардов элементарных зарядов; животные - меньшее количество.

Задачей исследований было выяснение различных сторон действия электрических зарядов в организме. Было прослежено местное и общее действие зарядов. Местное действие изучалось на изолированных органах лягушки (сердце и слизистая оболочка пищевода), а также с помощью люминесцентного метода на слизистой оболочке носа и глотки человека. Поскольку проникновение зарядов в организм происходит в основном через дыхательные пути и легкие, то были сделаны попытки проследить распределение зарядов (электроаэрозолей) на слизистой оболочке носа и глотки, их резорбцию в организме, проявление их действия и выделение из организма в основном с мочой; для этой цели использовали собаку с удаленным мочевым пузырем.

Первым из перечисленных аппаратов (с 1954 года) использовали высокочастотный электроэфлювиальный аэроионизатор для исследования действия отрицательных зарядов на изолированные органы лягушки (изменение сердечного ритма, изменение активности мерцательного эпителия пищевода), действия на pH мочи собаки с удаленным мочевым пузырем, а также

на ее дыхательные движения, процессы организации некротического очага печени и течение экспериментального туберкулеза у морских свинок. Клинически было исследовано действие на рН отделяемого из носа, на температуру слизистой оболочки носа и кожи, воздействие на кислотно-щелочное равновесие крови, а также на изменение проходимости носа (риноанемометрия).

С помощью термоионизатора исследовалось действие отрицательных (а также и положительных) зарядов на дыхательные движения собаки с удаленным мочевым пузырем, на процессы организации некротического очага печени у морских свинок, а также на течение экспериментального туберкулеза; у человека определяли изменение содержания кислорода в крови (оксигемоглобина).

При применении коронного ионизатора наблюдали ликвидацию некротического очага печени у морских свинок, изменения на изолированных органах лягушки (сердце, пищевод), действия на рН отделяемого из носа, изменения температуры слизистой оболочки носа и кожи человека и, кроме того, изменения кровяного давления и кислотно-щелочного равновесия крови.

Аэрозольный аппарат применялся при следующих исследованиях:

- при изучении на морских свинках попадания в организм, распределения и последующего выделения флюоресцирующих веществ (водные растворы флюоресцеина акридинового оранжевого, родамина), которые вводились в виде аэрозолей методом индивидуальной или камерной ингаляции; с помощью аэрозолей противотуберкулезных веществ (ПАСК, стрептомицин) методом камерной ингаляции проводилось лечение экспериментального туберкулеза морских свинок;

- определялась концентрация пенициллина в сыворотке крови человека, введенного с помощью индивидуальной ингаляции;

- исследовалось действие аэрозольтерапии пенициллином и стрептомицином на микрофлору носоглотки больных хроническими неспецифическими воспалениями верхних дыхательных путей;



- проводилось лечение больных хроническими неспецифическими воспалениями верхних дыхательных путей аэрозолем пенициллина и стрептомицина, а также обрабатывались результаты этого метода лечения.

С помощью ингалятора-ионизатора исследовалось действие отрицательных и положительных зарядов на изолированные органы лягушки (сердце, пищевод), pH мочи собаки с удаленным мочевым пузырем, дуурез, концентрации хлоридов, натрия и калия в моче, а также дыхательные движения. У человека исследовали также действие на тонус кровеносных сосудов слизистой оболочки носа (плетизмография), на pH мочи и отделяемого из носа.

Аэрозоль-ионизатор применялся при исследовании активности мерцательного эпителия пищевода лягушки. Аппаратом пользовались при лечении неспецифических воспалений верхних дыхательных путей; проводилась ингаляция биполярных электроаэрозолей водных растворов пенициллина и стрептомицина.

Действие отрицательных, положительных и биполярных электроаэрозолей, генерированных кислородным аэрозоль-ионизатором (АКИ-1 и АКИ-2), изучалось на изолированных органах лягушки. Исследовалось их действие на чувствительность рецепторов слизистой оболочки носа, pH отделяемого из носа, температуру слизистой оболочки носа и кожи, кислотно-щелочное равновесие крови, внешнее дыхание, кровяное давление, тонус кровеносных сосудов слизистой оболочки носа (риноанемометрия и плетизмография), содержание оксигемоглобина в крови. Приборы применялись и при люминесцентных методах исследования у людей. Пациенты ингалировали аэрозоли и электроаэрозоли водного раствора флуоресцеина. Наблюдалась задержка флуоресцеина на нормальной и патологически измененной (хроническое неспецифическое воспаление) слизистой оболочке верхних дыхательных путей, а также выделение с мочой.

Электроаэрозольный генератор к аппаратам искусственного дыхания применялся при изучении действия отрицательных и положительных зарядов на показатели внешнего дыхания чело-

вока.

В результате вышеописанных исследований имелась возможность достаточно точно определить закономерные сдвиги в организме животных и человека, вызываемые отрицательными и положительными зарядами. Таким образом, при патологических изменениях в организме с помощью искусственно созданных зарядов можно повлиять на биологические процессы в нормализующем направлении, что оправдывает применение аэроионотерапии и электроаэрозольного лечения.

Отрицательные аэроины и электроаэрозоли применялись, главным образом, при лечении следующих заболеваний: вазомоторных и аллергических ринитов, бронхиальной астмы, оспы, атрофического состояния слизистой оболочки верхних дыхательных путей, некоторых воспалительных состояний в верхних и нижних дыхательных путях. В некоторых случаях действие отрицательной ионизации изучалось также при заболеваниях уха (состояние после радикальной операции, шум в ушах и др.).

Здесь не имелось возможности более подробно рассмотреть вышеописанные медицинские исследования. Соответствующие работы были опубликованы в виде специальных статей, перечень которых приведен в "Ученых записках Тартуского гос. ун-та", 1970, вып. 240, 20 - 25.

В настоящей статье подчеркивается необходимость и плодотворность совместной работы физиков и медиков. Исследования обеих сторон преследуют одну общую цель - пополнить наши знания в области биофизики и электрофизиологии, которые необходимы человеку как для лучшего понимания физиологических процессов в организме, так и для лечения и профилактики болезней.

#### Л и т е р а т у р а

1. Приллер П.К., Рейнет Я.Д., Кийс В.Д. - Высокочастотный электроэфлювиальный аэроионизатор. Передовой на-

учно-технический и производственный опыт. Тема 34, № II-57-24/6, М., 1957, 3-9.

2. Рейнет Я.Ю. О новых аэроионизаторах, сконструированных в лаборатории аэроионизации Тартуского государственного университета. Вопросы курортологии, Рига, 1959, У, 31-35.
3. Рейнет Я.Ю., Митт А.М., Марран Х.Э. Термоионизатор для униполярной аэроионизации воздуха. Передовой научно-технический и производственный опыт. Тема 34, № II-57-28/7. М., 1957, 12-18.
4. Рейнет Я.Ю. Гидроионизатор. Передовой научно-технический и производственный опыт. Тема 34, № II-57-28/7, М., 1957, 3-II.
5. Приллер П., Сийрде Э., Йентс А., Герасимова К. О новом аэрозольном приборе и клинических наблюдениях при его применении. Здравоохранение Советской Эстонии, 1959, 2, 32-35.
6. Приллер П.К. Аэрозоль-ионизатор. Вопросы курортологии. Рига, 1957, У, 37-43.
7. Рейнет Я.Ю. Ионизатор кислорода и возможности его применения в медицине. Научная сессия, посвященная 40-й годовщине Великой Октябрьской социал. революции. Тезисы докладов. Тарту, 1957, 50-51.
8. Рейнет Я.Ю., Сийрде Э.К. Кислородный аэрозоль-ионизатор и некоторые наблюдения при его применении в медицине. Всесоюзная конференция по аэро- и гидроаэроионизации. Тезисы докладов. Ташкент, 1960, 147-148.
9. Сийрде Э.К., Рейнет Я.Ю. О кислородном аэрозоль-ионизаторе и некоторых физиологических показателях при применении ионизированного кислорода. Научная конференция (28-29 апреля 1959 г.) мед. факультета ТГУ. Тезисы докладов. Тарту, 1959, 4-5.

10. Виснапуу Л.Д., Йентс А.К. Физические характеристики различных электроаerosольных аппаратов, применяемых в медицинской практике. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1964, вып. 163, 404-412.
11. Таммет Х.Ф. Применение коронного разряда для ионизирования воздуха. Вопросы курортологии. Рига, 1959, У, 53-59.
12. Рейнет Я.Д., Тамм Э.И., Раудам Э.И. Об использовании одновременно с аппаратом искусственного дыхания универсального генератора электроаerosолей. В сб. "Аэроионизация в гигиене труда". Л., 1966, 235-237.
13. Виснапуу Л.Д., Йентс А.К. О рабочем режиме aerosольных ингаляторов. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1970, вып. 240, 305-310.

TARTU FÜÜSIKUTE POOLT KONSTRUEERITUD AEROIONISAATORITE, AEROSOOLI- JA ELEKTROAEROSOOLIAPARAATIDE KASUTAMISEST OTORINOLARÜNGOLOOGIAS

E. Siirde, S. Sibul, A. Jents  
Resümees

Käesolevas artiklis antakse ülevaade Tartu Riikliku Ülikooli füüsikute poolt konstrueeritud aeroionisaatorite, aerosool- ja elektroaerosoolaparaatide kasutamisest otorinolarüngoloogia kateedris. Tuuakse ära meetodid, milledega on uuritud elektriliste laengute toimet organismile ja näidatakse ära võimalused vastavate aparaatide rakendamiseks ravi eesmärgil.

**AEROIONIZERS, AEROSOL AND ELECTROAEROSOL APPARATUS DESIGNED BY THE PHYSICISTS OF TARTU AND THEIR USE IN OTORHINOLARYNGOLOGY**

**E. Siirde, S. Sibul, A. Jents**

**Summary**

The article presents an account of the use (at the Chair of Otorhinolaryngology of Tartu State University) of the aeroionizers, aerosol and electroaerosol apparatus designed by the physicists of the same University. Methods employed to study the effect of the electrical charges on the organism are described and possibilities for the application of the corresponding devices for the purpose of treatment are indicated.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРАПИИ  
ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ КИСЛОРОДНЫМИ ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЯМИ  
В ОТДЕЛЕНИИ УША-ГОРЛА-НОСА  
ТАРТУСКОЙ РЕСПУБЛИКАНСКОЙ КЛИНИЧЕСКОЙ БОЛЬНИЦЫ  
С 1962 по 1969 гг.**

С.Ф. Сибуль

Целью работы был анализ использования названного метода лечения в отделении уха-горла-носа Тартуской республиканской клинической больницы. В статье не рассматривается значение болезни и не дается оценка результатам ингаляционной терапии, поскольку такие данные представлены в работе [1].

С 1962 по 1969 гг.<sup>х)</sup> ингаляции отрицательными кислородными электроаэрозолями (ОКЭ) применены у 1402 больных. Лечебный сеанс продолжался 5 минут. В течение одного сеанса больной ингалировал около 150 миллиардов элементарных зарядов. Курс лечения состоял из 15-20 лечебных сеансов. Для ингаляции ОКЭ использовали кислородные аэрозоль-ноннзаторы АКН-1 и АКН-2 [2, 3].

ОКЭ-терапию применяли чаще всего при аллергических болезнях дыхательных путей (в 479 случаях или 34,1 %). Затем при атрофических процессах слизистой оболочки (в 300 случаях или 21,3 %) и неспецифических хронических воспалениях верхних дыхательных путей (в 228 случаях или 16,2 %). Реже лечение ОКЭ назначалось при острых воспалениях верхних дыхательных путей (в 29 случаях или 2,0 %). В послеоперационный период ОКЭ-терапия применялась у 134 больных (9,7 %) и при прочих различных заболеваниях, как невралгия, глазные болезни, понижение слуха типа внутреннего уха,

---

<sup>х)</sup> Данные 1962 г. отсутствуют.

парадонтоз и др. - у 232 больных (16,5 %). Указанные данные иллюстрируются рисунком I.

Как видно из этого рисунка, число больных в отдельные годы колеблется. Начиная с 1967 г. стало возможным назначать ОКЭ-терапию в тяжелых случаях при постельном режиме как при затрудненном дыхании (бронхиальная астма, подвываочный ларингит, после трахеостомии, ларингэктомии и др.). Последние случаи не приведены на рисунке.

Наиболее широкое применение ОКЭ-терапии нашла при аллергии - 34,1 % общего числа больных (479 аллергиков). Больные аллергической ринопатией составляли 74,5 % (357 случаев) из аллергических заболеваний; больные бронхиальной астмой - 17,1 % (82 случая); больные астматическим бронхитом - 6 % (29 случаев), а больные вазомоторным насморком - только 2,3 % (11 случаев). По данным физиотерапевтического кабинета, число случаев аллергической ринопатии ежегодно возрастает, причем число астматиков остается примерно на одном и том же уровне.

ОКЭ-терапию мы применяли в 29 случаях (11,2 % воспалительных состояний) острых воспалений гортани. Причем в это число вошли подвываочные ларингиты и другие острые воспаления гортани, протекавшие в аллергическом фоне.

Для лечения хронических воспалений верхних дыхательных путей и глотки ингаляция ОКЭ назначалась соответственно диагнозу: для лечения хронического воспаления глотки (фарингит) в 70 случаях (27,3 %), при хроническом воспалении гортани (ларингит) - в 55 случаях (21,0 %), при хроническом трахеобронхите - в 65 случаях (25,3 %) и для лечения хронического гайморита - в 38 случаях (14,7 %). Разумеется, из указанных случаев невозможно исключить наличие аллергического компонента.

Для лечения атрофических состояний слизистой оболочки верхних дыхательных путей и глотки ОКЭ-терапия применялась у 300 больных (21,3 %). Из них озоной болели 90 (30 %), атрофическим ринитом - 93 (31,0 %), атрофическим ринофарингитом - 63 (21 %), атрофическим ларингитом - 54 больных (17%).



Рис. 1. О применении терапии отрицательными кислородными электроаэрозолями в отделении уха-горла-носа Тартуской республиканской клинической больницы с 1962 по 1969 гг.



Причем число больных озоной показывает постоянную тенденцию к снижению.

Кроме вышеприведенного, лечение ОКЭ применялось также и при других заболеваниях (в 232 случаях или 16,5 %): при невралгии (в 16 случаях или 6,9 %), глазных болезнях (в 35 случаях или 15,0 %), тугоухости типа внутреннего уха (в 18 случаях или 7,7 %) и других болезнях (163 случая или 70,2 %). Вообще список болезней, при которых терапия ОКЭ успешно применяется, ежегодно удлиняется.

Лечение ОКЭ все больше применяют при послеоперационных состояниях (в 134 случаях или 9,7 %). Чаще всего ингаляции ОКЭ применялись в период после операций на верхнечелюстной пазухе – гайморитомии (в 57 случаях или 2,5 %); далее следуют случаи радикальной операции среднего уха (в 37 случаях или 29,8 %), операции на миндалинах (в 20 случаях или 14,9 %), операции на гортани (13 случаев или 9,7 %), а в последнее время – и после операции при отосклерозе (в 7 случаях или 5,2 %).

Из вышеприведенного видно, что терапия ОКЭ играет большую роль в повседневном лечении болезней уха-горла-носа и что показания к ее применению в клинике ежегодно расширяются. Вместе с тем, указанное является и оценкой данного метода ингаляционного лечения. Этот вид электроаэрозольного лечения, как один из видов физиотерапии, завоевал достаточно важное место в клинической лечебной работе.

#### Л и т е р а т у р а

1. Рейнет Я.В. Краткий обзор научно-исследовательских работ по аэроионизации и электроаэрозольям, проведенных в г. Тарту. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1970, вып. 240, 3-31.
2. Рейнет Я.В., Сийрде Э.К. Кислородный аэрозоль-ионизатор и некоторые наблюдения при его применении в

медицине. В кн.: Аэроионизация и гидроионизация в медицине. Ташкент, 1962, 261-264.

3. Виснапуу Л.Д., Нентс А.К. Физические характеристики различных электроаэрозольных аппаратов, применяемых в медицинской практике. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1964, вып. 163, 404-412.

NEGATIIVSE HARMIKU ELEKTROAEROSOOILRAVI KASUTAMISEST TARTU VABARIIKLIKU KLIINILISE HAIGLA KÕRVA-NINA-KURGUOSAKONNAS AJAVAHEMIKUS 1962 - 1969.a.

S. Sibul

Resümee

Ajavahemikus 1962 - 1969 on ordineeritud negatiivse harmiku elektroaerosooli (NHE) inhalatsioon 1402 haigela. NHE ravi on kõige rohkem kasutatud allergiliste haiguste puhul (34,1%), nagu allergiline rinopaatia, bronhiaalastma jt. Sellele järgnevad ülemiste hingamisteede limaskesta atroofilised protsessid (21,3% juhtudel) ning ülemiste hingamisteede mitespetsiifilised kroonilised põletikud (16,2% juhtudel). Harvem on NHE ravi kasutatud hingamisteede ägedate põletikkude puhul (2,0% juhtudel). Operatsioonijärgses perioodis manustati NHE inhalatsioon 9,7% haigetele (haimorotoomia, kõrioperatsioonid) ning 16,5 % juhtudel mitmesuguste muude haiguste puhul (neuralgia jt.).

**ON THE USE OF NEGATIVE ELECTROAEROSOLS OF  
OXYGEN IN TREATMENT IN THE EAR, NOSE AND  
THROAT DEPARTMENT OF TARTU REPUBLICAN CLI-  
NICAL HOSPITAL IN 1962 - 1969**

**S. Sibal**

**Summary**

In the period of 1962 - 1969 inhalation of negatively charged electroaerosols of oxygen (NEO) has been prescribed to 1,402 patients. Treatment with NEO has been most frequently resorted to in cases of allergic ailments (34.1 per cent of total cases), such as allergic rhinopathy and bronchial asthma. Next come the atrophic processes of the mucous membrane of the upper respiratory tract (21.3 per cent of the total) and nonspecific chronic inflammations of the upper respiratory organs (16.2 per cent of the total). NEO treatment has been less frequently applied to acute inflammations of the respiratory tract (2.0 per cent). Postoperatively (following laryngotomy and operations of the larynx) NEO was administered to 9.7 per cent of the 1,402 patients and in 16.5 per cent of cases to patients with various other complaints (neuralgia, etc.).

## ДОЗИРОВАНИЕ ПРИ АЭРОЗОЛЬНОМ МЕТОДЕ ВАКЦИНАЦИИ

В.В. Сула, Я.Ю. Рейнет

Аэрозольный метод вакцинации требует в закрытой камере (боксе) стабильного во времени аэрозоля. Приведем во внимание основные факторы, действующие при вакцинации заряженными и незаряженными аэрозолями вакцин.

Пусть в боксе объемом  $V$  и площадью  $S$  создается с объемной скоростью  $M$  аэрозоль, частицы которого имеют средний радиус  $r$  и заряд  $q$ . Объем аэрозоля, вдыхаемого за единицу времени каждым из  $N$  животных в этом боксе, равен  $m$ .

Если  $n$  - число частиц в единице объема бокса в некоторый момент времени  $t$ , то

$$\frac{dn}{dt} = cn^2 + bn + a, \quad (I)$$

где  $c = -8\pi r^2 D \left( \lambda + \frac{\lambda}{\exp \lambda - 1} \right)$ ;  $b = -\frac{Sv + Nmp_0}{V}$  и  $a = \frac{3M}{4\pi r^3 V}$   
 $\lambda = q^2 / 2rkT$ ;  $D$  - постоянная диффузии;  $v$  - стоксовая скорость;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура;  $p_0$  - доля частиц, задержанных в организме [1].

Первый член в правой части уравнения (I) характеризует электростатическое рассеяние и коагуляцию, второй - гравитационное оседание и вдыхание аэрозоля животными, третий - работу генератора электроаэрозоля.

Интегрируя уравнение (I), имеем

$$t = -\frac{2}{\sqrt{\Delta}} \operatorname{Arth} \frac{b + 2cn}{\sqrt{\Delta}} + K, \quad (2)$$

где  $A = b^2 - 4ac$ ,  $K$  - постоянная.  
Подставляя в (2)  $n=0$  при  $t=0$ , находим

$$K = \frac{2}{\sqrt{A}} \operatorname{Arth} \frac{b}{\sqrt{A}}. \quad (3)$$

Из (2) получаем выражение для

$$n = \frac{\sqrt{A}}{2c} \operatorname{th} \left[ -\frac{(t-K)\sqrt{A}}{2} \right] - \frac{b}{2c}. \quad (4)$$

Если  $D_{3A}$  - доза электроаэрозоля вакцины, получаемая животным за время  $t_{3A}$  (при условии осаждения всех частиц в организме  $\rho_0=1$ ), то

$$D_{3A} = \int_0^{t_{3A}} m n dt. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5), получаем

$$D_{3A} = \frac{m}{c} \left[ -\ln \operatorname{ch} \frac{(t_{3A}-K)\sqrt{A}}{-2} + \ln \operatorname{ch} \frac{K\sqrt{A}}{2} - \frac{bt_{3A}}{2} \right]. \quad (6)$$

Обычно в боксах при вакцинации первый член в правой части уравнения (6) намного больше других, тогда

$$D_{3A} = -\frac{m}{c} \ln \operatorname{ch} \frac{(t_{3A}-K)\sqrt{A}}{-2}. \quad (7)$$

Существует время  $\hat{t}_{3A}$  такое, что если  $t_{3A} \ll \hat{t}_{3A}$ ,  
то

$$D_{3A} = -\frac{m\Delta(t_{3A}-K)^2}{8c}; \quad (8)$$

если же  $t_{3A} \gg \hat{t}_{3A}$ , то

$$D_{3A} = -\frac{m\sqrt{A}(t_{3A}-K)}{2c}. \quad (9)$$

Время  $\hat{t}_{3A}$  характеризует время установления скорости увеличения дозы, при  $t_{3A} \gg \hat{t}_{3A}$  скорость увеличения дозы постоянна.

При использовании неваряженного аэрозоля в уравнении (I)  $\lambda = 0$ .

Если  $D_A$  - доза аэрозоля вакцины (при условии оседания  $p_0$ -й доли частиц в организме) за время  $t_A$ , то имеем

$$D_A = \int_0^{t_A} \pi p_0 dt. \quad (10)$$

Дозу можно определить аналогично формулам (8) и (9):

$$D_A = - \frac{\pi p_0 (t_A - K')^2 \Delta'}{8c'} \quad (11)$$

при  $t_A \ll \hat{t}_A$  и

$$D_A = - \frac{\pi p_0 (t_A - K') \sqrt{\Delta'}}{2c'} \quad (12)$$

при  $t_A \gg \hat{t}_A$ , где  $c' = -8\pi r D$ ,  $\Delta' = b^2 - 4ac'$  и  $K' = \frac{2}{\sqrt{\Delta'}} \operatorname{Arth} \frac{b}{\sqrt{\Delta'}}$ .

Если в (5)  $\left(\frac{Nm}{V}\right)^2 \gg 4ac$ , то суммарная доза

$$ND_{3A} \rightarrow \frac{3M}{4\pi r^3} t_{3A}. \quad (13)$$

Это значит, что с увеличением числа животных вакцинация становится более экономной (уменьшаются потери вакцины).

При увеличении радиуса частиц, когда  $Sv \gg N\pi p_0$  и  $\left(\frac{Sv}{V}\right)^2 \gg 4ac$ ,

$$ND_{3A} \rightarrow 0. \quad (14)$$

Для увеличения дозы следует использовать аэрозоль, при котором градиентное оседание частиц небольшое, это значит, что соблюдается неравенство  $Sv \ll N\pi r_0$ .

Из формул (8) и (II) для получения одинаковой дозы ( $D_A = D_{эА}$ ) аэрозоля и электроаэрозоля при условии  $|4ac| \gg b^2$  и  $|4ac'| \gg b^2$  получаем

$$t_{эА} = t_A + |K'| - |K|. \quad (15)$$

Так как  $\frac{K}{K'} = \frac{c'}{c} < 1$ , то из (15) имеем

$$t_{эА} > t_A.$$

Более точно можно это показать, подставляя в формулы (8) и (II) конкретные значения величин.

В рамках данной модели можно сделать следующие выводы:

- 1) размеры частиц аэрозоля должны быть такие, чтобы соблюдалось неравенство  $Sv \ll N\pi r_0$ ;
- 2) для вакцинации в камеру желательно поместить как можно больше животных;
- 3) время вакцинации аэрозодем меньше времени вакцинации электроаэрозодем;
- 4) существует время  $\hat{t}$ , характеризующее уменьшение скорости вакцинации, что наводит на мысль использования циклического режима распыления вакцин.

#### Л и т е р а т у р а

1. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли - пыли, дымы и туманы.  
Изд-во "Химия", Л., 1969.

**DOSKERIMINE VAKTSINEERIMISEL AEROSOL-  
METHODIL**

**E. Sula, J. Reinet**  
**Resüme**

Käesolevas artiklis on toodud valemid ekspositsiooni-  
aja leidmiseks aerosooli või elektroaerosooliga vaksineerimisel kinnises boksis. On arvestatud gravitatsioonilise sadestumise, koagulatsiooni ja elektrostaatilise hajumise mõju.

**DOSAGE OF VACCINE NECESSARY IN VACCINATION  
OF FARM ANIMALS BY THE AEROSOL METHOD**

**E. Sula, J. Reinet**  
**Summary**

The present article presents formulas for the determination of the time of exposure in vaccinating farm animals in a closed box with aerosols or electroaerosols. The effect of gravitational settling, coagulation and electrostatic scattering has been taken into account.



## ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЕЙ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

И.Ю. Виснапуу, Х.П. Ленцнер, Т.Э. Сийрде

О перспективах применения электрически заряженного аэрозоля для дезинфекции помещений высказывалось еще в работах [ 1, 2 ] . Предложена приближенная теория осаждения аэрозоля на поверхности закрытого помещения и проведены подтверждающие ее опыты [ 3 ] . Ряд исследований [ 4 - 8 ] посвящен изучению дезинфекционной эффективности электроаэрозолей различных препаратов при обработке ими камер и животноводческих помещений. Показаны преимущества применения электроаэрозолей перед аэрозолями, заключающиеся в большей равномерности осаждения и экономии дезинфектантов (при сопоставлении электроаэрозолей и аэрозолей под первыми понимаем аэрозоли, частицы которых принудительно электризованы, а под вторыми - аэрозоли, полученные при тех же условиях, что первые, за исключением воздействий, обеспечивающих электризованность). Однако электроаэрозольный способ дезинфекции жилых помещений и применение его в медицинской практике почти не исследованы. Отчасти это обусловлено отсутствием подходящих генераторов электроаэрозолей, позволяющих обеззараживать поверхности без заметного намочения их. Неизвестны дозы препаратов, необходимые для достижения определенного дезинфекционного эффекта.

В связи со сказанным целью настоящей работы являлось экспериментальное определение минимальных доз некоторых веществ для уничтожения заданных тест-микробов, расположенных на стенах жилого помещения. Знание минимальных доз, достаточных для обеззараживания, важно для того, чтобы предотвратить

лишние затраты препаратов и нежелательное намочание обрабатываемых поверхностей. Также нас интересовало, насколько эти дозы зависят от электризованности аэрозоля, т.е. разница в дезинфекционной эффективности электрически заряженного и незаряженного аэрозоля. Так как степень указанной эффективности аэрозоля того или другого препарата при равных внешних условиях зависит от его физических свойств (дисперсности, заряда, счетной концентрации, скорости и характера движения частиц) [ 9 ], определяющих закономерности осаждения, то дозы следует рассматривать неотрывно от параметров конструкции и режима работы генератора, задающих названные свойства. Под внешними условиями подразумеваются форма и размеры помещения, состояние поверхностей и воздуха, в частности влажность и температура [ 10 ], также влияющие на интенсивность и равномерность осаждения. Поэтому перед тем, как рассмотреть результаты по оценке дезинфекционной активности препаратов в виде аэрозолей, приведем описание генератора, его режима работы и условий, при которых эти результаты получены.

В основу генератора электроаэрозолей взят пневматический распылитель с индуцирующим электродом [ II ]. С целью предотвращения обратного осаждения распыленной жидкости на распылитель он снабжен щитом. На рис. I изображена принципиальная схема генератора, причем названный щит показан в продольном разрезе. Распылитель I питается от источника 2 сжатого воздуха. На индуцирующий электрод 3 относительно распыливаемой жидкости 4 подается потенциал от источника 5 постоянного напряжения через клеммы 6 и 7. Щит 8 выполнен в виде воронки, имеющей две сопряженные конические поверхности, образующие резервуар для распыливаемой жидкости 4. Последняя заземлена лишь через микроамперметр 9, позволяющий измерять ток заряженных капель, покидающих генератор.

При работе сжатый воздух, поступающий от источника 2, подсасывает жидкость 4 и распыливает ее. В зоне распыления электрическое поле между индуцирующим электродом 3 и слоем распадающейся на капельки жидкости наводит на последний элек-

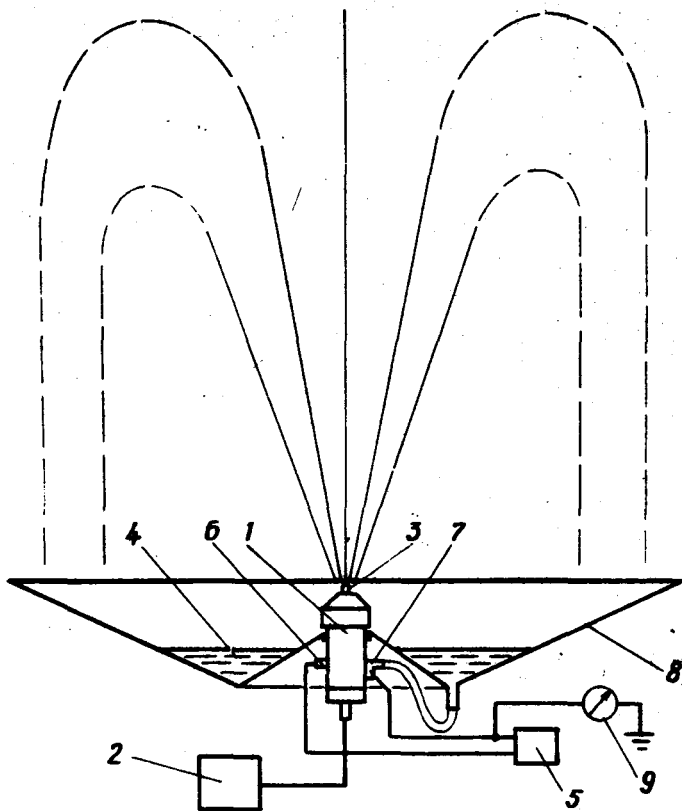


Рис. I.

Принципиальная схема генератора электроаэрозолей.

I - распылитель; 2 - источник сжатого воздуха; 3 -  
 - индуцирующий электрод; 4 - распыливаемая жидкость;  
 5 - источник индуцирующего напряжения; 6 и 7 - клеммы;  
 8 - щит; 9 - микроамперметр.

трические заряды, которые остаются на капельках распыла. Заряженные капельки увлекаются потоком воздуха вверх, образуя струю электроаэрозоля. При этом часть капелек под действием гравитационных и электрических сил возвращается к генератору, попадает на щит 8 и стекает обратно к распыливаемой жидкости 4. Щит 8, таким образом, предохраняет распылитель от намокания, защищая тем самым внешнюю изоляцию индуктирующего электрода 3, и улавливает возвращающиеся капельки для повторного распыления. Это обеспечивает надежность электрической части генератора и уменьшает потери распыливаемой жидкости. Если на электрод 3 напряжение не подается, то генератор работает как обыкновенный пневматический распылитель, создавая струю незаряженного аэрозоля.

Основные параметры генератора электроаэрозолей и его режима работы при проведении опытов следующие:

ширина зазора и площадь поперечного сечения кольцевых сопел сжатого воздуха	0,3 мм и 4 мм <sup>2</sup>
жидкости	0,2 мм и 3 мм <sup>2</sup>
диаметр щита	400 мм
расчетная напряженность электрического поля в зоне индукции	1,0 кв/мм
избыточное давление сжатого воздуха	3,0 ат
расход воздуха	3,3 г/сек
расход жидкости	1,6 г/сек
сила конвективного тока электроаэрозоля	4,0 мка
угол расширения струи незаряженного распыла	24°
осевая скорость струи в основном участке на расстоянии X и от распылителя	3,3/X м/сек.

Опыты по дезинфекции проводили в закрытом помещении, схема и размеры которого указаны на рис. 2. Тут же даны координаты расположения генератора электроаэрозолей и мест прикрепления пластинок с тест-микробами.

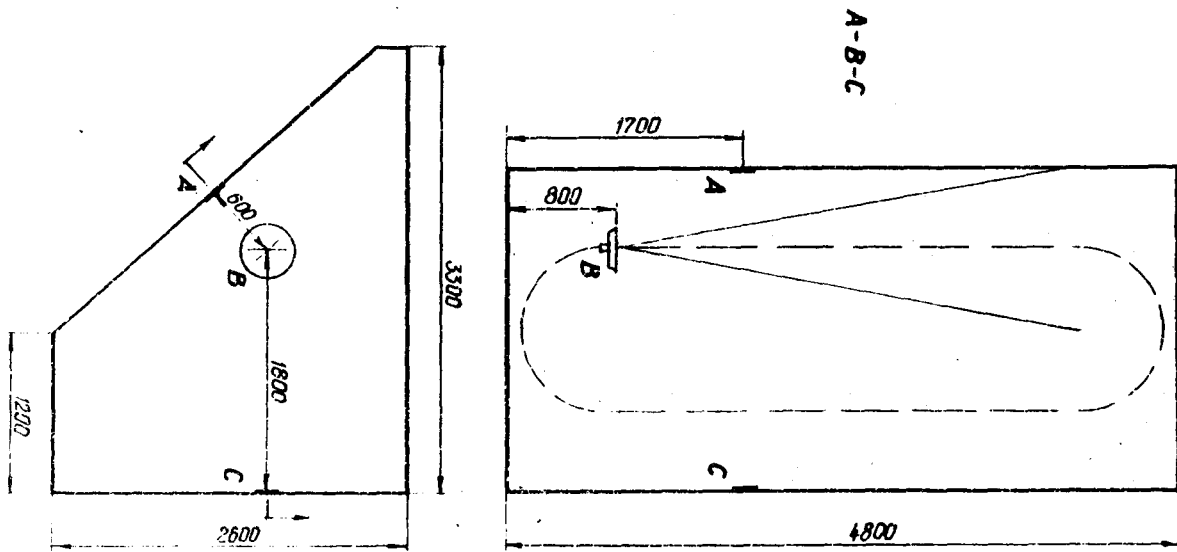


Рис. 2.

План помещения и расположения в нем генератора электроаэрозолей (В) и пластинок (А,С).

Перед распылением препарата температура и относительная влажность воздуха в помещении составляли соответственно  $20^{\circ}\text{C}$  и 50 %. Генератор был установлен не в середине помещения, а вблизи одной из стен, чтобы выявить, насколько это сказывается на равномерности дезинфекционного действия в случае аэрозоля и электроаэрозоля. Струя распыла направлялась вертикально вверх под потолок, откуда капельки жидкости конвекционными токами, гравитационными и электрическими (при электроаэрозоле) силами распределялись по всему объему помещения.

Осаждение капелек на вертикальные поверхности помещения, на которых нами оценивался дезинфекционный эффект, обуславливалось, по-видимому, преимущественно конвективной и турбулентной диффузией при аэрозоле и, кроме того, электростатическим рассеянием, при электроаэрозоле.

Для каждого опыта в 300 мл воды растворялось определенное количество дезинфицирующего вещества, необходимое для получения концентраций, указанных в таблице I. Приготовленный раствор распыливался в закрытом помещении, на стенах которого предварительно были прикреплены в вертикальном положении по две стеклянные пластинки с разными тест-микробами. При создании электроаэрозоля (на индуцирующий электрод генератора подано напряжение) в течение всего процесса распыления в помещении не наблюдалось изменения прозрачности воздуха. При получении же аэрозоля (на электрод напряжение не подано) в воздухе накапливался заметный туман, сохраняющийся около 10 минут. Это свидетельствует о различной скорости осаждения электроаэрозоля и аэрозоля.

Об эффективности дезинфекции судили по выживаемости тест-микробов, нанесенных на стеклянные пластинки площадью  $100\text{ см}^2$ . Тест-микробами служили один штамм *Escherichia coli* и один - *Staphylococcus aureus*. В опыт брали односуточные культуры микробов в мясо-пептонном бульоне, разведенные 1:10 0,9 %-ным раствором хлористого натрия. На каждую пластинку наносили 0,1 мл микробной

взвеси и растирали ее ватным тампоном по всей поверхности. Контролем являлись пластинки с тест-микробами, защищенные от дезинфицирующего раствора. Спустя 20 мин после распыления дезинфицирующего раствора с пластинок брали смывы ватным тампоном, смоченным или 0,9 %-ным раствором хлористого натрия, или 1 %-ным раствором гипосульфита (при работе с хлорамином). Этими же тампонами делали посеvy на среду Эндо (*E. coli*) и мясо-пептонный агар (*St. aureus*), разлитые в чашки Петри. Посевы выращивали двое суток при 37°C и сосчитывали число выросших колоний.

Дезинфекционная эффективность оценивалась по показателям интенсивности роста тест-микробов после обработки:

среднее число колоний на одну чашку Петри	0-10	11-50	51-250	251-1000
показатель интенсивности роста	0	+	++	+++

Положение исследуемых точек А и С поверхности помещения показано на рис. 2.

Результаты бактериологического контроля приведены в таблице I, каждый показатель которой отражает среднее число колоний микробов по трем опытам. Число колоний в посевах со смывов контрольных пластинок всегда превышало тысячу.

Анализируя полученные данные, приходим к следующим выводам, имеющим место при вышеизложенных условиях:

1. Дезинфекционный эффект электроаэрозоля и аэрозоля уменьшается с удалением от струи. Различие в степени обеззараживания в близкой и удаленной от струи точках примерно одинаково как при аэрозоле, так и при электроаэрозоле.

2. Как в близлежащей, так и удаленной от генератора точках обрабатываемой поверхности эффективность дезинфекции электроаэрозодем выше или не ниже, чем аэрозодем.

Таблица I

Дезинфекционная эффективность электроаэрозолей (показатели без скобок) и аэрозолей (в скобках) некоторых веществ при обработке помещения (30 м<sup>3</sup>)

Тест-микроб	Исследуемая точка поверхности	Дезинфицирующее вещество, его концентрация в растворе и доза $\left( \frac{\text{г активнодействующего вещества}}{\text{м}^3 \text{ обрабатываемого помещения}} \right)$							
		фенол				хлорамин		перекись водорода	
		0,3 %	2 %	3 %	5 %	2 %	5 %	3 %	10 %
		0,03	0,2	0,3	0,5	0,2	0,5	0,3	1,0
E. coli	A	+	0	0	0	0	0	0	0
		(+)	(0)	(0)	(0)	(+)	(0)	(0)	(0)
E. coli	C	++	0	0	0	+	0	0	0
		(+++)	(++)	(0)	(0)	(+)	(0)	(0)	(0)
St. aureus	A	+++	0	0	0	0	0	0	0
		(+++)	(0)	(0)	(0)	(+)	(0)	(++)	(+)
St. aureus	C	+++	++	0	0	++	0	+	0
		(+++)	(++)	(+)	(0)	(++)	(+)	(++)	(+)



Для достижения равномерной дезинфекции всех поверхностей помещения струя электроаэрозоля или аэрозоля должна быть направлена так, чтобы весь объем помещения равномерно заполнялся частицами распыла.

3. При электроаэрозолях обеззараживание достигается, как правило, при меньших дозах, чем при аэрозолях. Минимальные дозы активнодействующих веществ, необходимые для обеззараживания стен помещения, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Минимальные дозы активнодействующих веществ в виде электроаэрозолей (без скобок) и аэрозолей (в скобках), необходимые для обеззараживания тест-микробов на поверхностях помещения

Тест-микроб	Точка поверхности	Дезинфицирующее вещество и его минимальная доза (г/м <sup>3</sup> )		
		фенол	хлорамин	перекись водорода
E. coli	A	0,2 (0,2)	0,2 (0,5)	0,3 (0,3)
	C	0,2 (0,3)	0,5 (0,5)	0,3 (0,3)
St.aureus	A	0,2 (0,2)	0,2 (0,5)	0,3 (> 1,0)
	C	0,3 (0,5)	0,5 (> 0,5)	1,0 (> 1,0)

Авторы признательны В.М. Цетлину, по инициативе которого была начата данная работа, А.А. Ленцнеру за любезное предоставление помещения для проведения опытов и Я.Ю. Рейнету за постоянный интерес и участие в обсуждении вопросов в ходе работы.

## Л и т е р а т у р а

1. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. Изд-во АН СССР, М., 1955, 106.
2. Дунский В.Ф., Китаев А.В. Электростатическое опрыскивание. "Защита растений", 1958, № 4, 17-18.
3. Дунский В.Ф., Китаев А.В. Осаждение униполярно заряженного аэрозоля в закрытом помещении, "Коллоидный журнал", 1960, вып. 2, 159-167.
4. Закомырдин А.А., Чкония Т.Т. Исследование электрозаряженных аэрозолей дезинфицирующих веществ. Материалы (тезисы) Всесоюзной научно-технической конференции по применению аэрозолей в народном хозяйстве. М., 1967, 202-203.
5. Чкония Т.Т. К вопросу об эффективности дезинфицирующего действия электроаэрозолей химических препаратов. Там же, 204-206.
6. Чкония Т.Т. Электризация аэрозолей инсектицидных препаратов. Там же, 206-208.
7. Рейнет Я.Ю., Виснапуу Л.Ю., Закомырдин А.А., Чкония Т.Т. Исследование электроаэрозолей дезинфицирующих и инсектицидных препаратов. Труды ВНИИ ветеринарной санитарии. М., 1969, т. 32. 537-551.
8. Закомырдин А.А. Испытание эффективности электроаэрозолей дезинфицирующих средств. Проблемы электроаэрозолей (материалы научно-технического совещания). Тарту, 1969, 23-24.
9. Цетлин В.М., Вилькович В.А. Физико-химические факторы дезинфекции. Изд-во "Медицина", М., 1969.
10. Бочевин Ю.И. О влиянии температуры поверхностей при аэрозольном способе дезинфекции. Материалы

(тезисы) Всесоюзной научно-технической конференции по применению аэрозолей в народном хозяйстве. М., 1969, 198-199.

- II. Рейнет Я.Д., Виснапуу Я.Д. Рапылитель для электроаэрозольной терапии. Авт. св. № 193 690. "Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки". М., 1967, № 7, 87.

**PNEUMAATILINE ELEKTROAEROSOOLIGENERAATOR  
RUUMIDE DESINFITSEERIMISEKS**

L. Visnapuu, H. Lenzner, T. Siirde  
Resümees

Töös on kirjeldatud elektroaerosooligeneraatorit, mida kasutati desinfitseerivate ainete aerosoolide ja elektroaerosoolide saamiseks, ja toodud tehnilised andmed. Eksperimentaalselt on määratud fenooli, klooramiini ja vesinikülühapendi minimaalsed kogused test-mikroobide E. coli ja S. aureuse hävitamiseks ruumi (30 m<sup>3</sup>) vertikaalpindadelt. Võrdlevalt on hinnatud aerosoolide ja elektroaerosoolide desinfitseerivaid omadusi ja efekti sõltuvust nende jõe kaugusest uuritavatest pindadest. Tulemused näitavad, et elektriliselt laetud aerosool sadestub ruumis kiiremini ja tagab desinfitseeriva efekti dispergeeritud aine väiksema kulu korral, kui vastav laadimata aerosool.

PNEUMATIC ELECTROAEROSOL GENERATOR FOR THE  
DISINFECTION OF ROOMS

L. Visnapuu, H. Lenzner, T. Siirde

Summary

The paper describes an electroaerosol generator used for the preparation of aerosols and electroaerosols of disinfectants and carries the necessary specifications. Minimum amounts of phenol, chloramine and hydrogen peroxide have been determined for the killing of the test microbes of *E. coli* and *S. aureus* on the vertical surfaces of a room ( $30 \text{ m}^3$ ). The disinfectant properties and the effect of aerosols and electroaerosols have been assessed on a comparative basis, depending on the distance of the jet from the surfaces under study. The results show that an electrically charged aerosol settles in a room quicker and ensures the disinfectant effect of a dispersed substance at the expense of smaller consumption than the corresponding uncharged aerosol.

## К ТЕОРИИ ИНДУКЦИОННОЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ РАСПЫЛЯЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Л.Ю. Виснапуу

Образование заряженных частиц при пневматическом распылении жидкостей, над поверхностью которых создано электрическое поле, теоретически рассмотрено в нескольких работах [ 1 - 5 ].

Настоящая статья посвящена анализу и сопоставлению результатов указанных работ с некоторыми экспериментальными данными, полученными нами. В заключении предложена новая модель, отражающая электризацию жидкости произвольной удельной электропроводности с учетом интенсивности распада ее поверхности. Все нижеприведенные формулы представлены в системе СИ с едиными обозначениями.

Буркхардт (1935) рассматривает слой распыливающего воздуха и пленку распыливаемой жидкости между электродами распылителя как два последовательно соединенных конденсатора. В первоначальный момент появления пленки жидкости в межэлектродном промежутке напряжение делится между соответствующими емкостями. Наличие электрического поля и свободных зарядов в жидкости обуславливает перераспределение их, приводящее к разряжению емкости, образованной пленкой жидкости, и накопление их на поверхности раздела жидкость - воздух. Исходя из уравнения непрерывности, Буркхардт находит

$$\varrho = \varrho_0 \exp(-\lambda t / \epsilon_0 \epsilon), \quad (I)$$

где  $\varrho$  и  $\varrho_0$  - объемная плотность заряда в жидкости за время  $t$  и в начале действия поля;  $\lambda$  и  $\epsilon$  - удельная электропро-

водность и диэлектрическая проницаемость жидкости;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м - электрическая постоянная. Этому изменению плотности заряда соответствует разряжение упомянутой емкости. Отсюда делается вывод, что время, необходимое для разряжения, т.е. накопления зарядов на поверхности жидкости, зависит лишь от  $\lambda$  и  $\epsilon$ . Но зависимости конвективного тока заряженных частиц, получаемых при распылении жидкости, от параметров распылительного процесса и геометрии сопла распылителя не устанавливается.

Китаев и Смирнова (1963), повторяя Буркхардта и определяя время отрыва капель с радиусом 5 мкм по релеевскому механизму распада струи при скорости воздуха 100 м/сек, приходят к выводу, из которого следует, что для полной электризации жидкости необходимо обеспечить

$$\epsilon/\lambda \leq 4,2 \cdot 10^5 \text{ ом}\cdot\text{м}. \quad (2)$$

Согласно результатам измерений, проведенных при распыливании бензола с примесью ацетона, сила конвективного тока

$$I = \begin{cases} 0,5 \text{ мка, если } \epsilon/\lambda \geq 3 \cdot 10^7 \text{ ом}\cdot\text{м}, \\ 36 - 4,8 \lg \frac{\epsilon}{\lambda} \text{ мка, если } 3 \cdot 10^5 < \frac{\epsilon}{\lambda} < 3 \cdot 10^7 \text{ ом}\cdot\text{м}, \\ 9,5 \text{ мка, если } \epsilon/\lambda \leq 3 \cdot 10^5 \text{ ом}\cdot\text{м}. \end{cases} \quad (3)$$

При этом авторы, однако, не приводят параметров режима распыливания и не рассматривают, как от них зависит конвективный ток частиц.

Таммет (1963), исследуя распыление жидкости с поверхности, на которой индуцируются заряды, уже находит зависимость конвективного тока как от свойств распыливаемой жидкости, так и от условий распыления:

$$I = E_r S \left( \frac{\alpha r_2 S}{3 \epsilon_0 \gamma^2 \Phi} + \frac{\epsilon}{\lambda} \right), \quad (4)$$

где  $E_r$  - напряженность электрического поля над поверхностью жидкости площадью  $S$ ;  $\alpha$  - отношение кубов среднекубического  $r_3$  и среднеквадратического  $r_2$  радиусов образующихся частиц;  $\gamma \approx 1$  - постоянная распылительного процесса;  $\Phi$  - объем

ный расход жидкости.

Согласно (4) при хорошо проводящей жидкости, когда

$$\begin{aligned} \epsilon/\lambda &< \alpha r_2 S / 3\epsilon_0 \gamma \Phi, \\ I &\approx 3\epsilon_0 \gamma \Phi E_r / \alpha r_2, \end{aligned} \quad (5)$$

а при плохо проводящей жидкости, когда

$$\begin{aligned} \epsilon/\lambda &>> \alpha r_2 S / 3\epsilon_0 \gamma \Phi, \\ I &\approx E_r S \lambda / \epsilon. \end{aligned} \quad (6)$$

Точная экспериментальная проверка и практическое применение формул (4) и (5) усложнены тем, что они содержат величины, зависящие от размеров частиц и их распределения. Как показывают наши опыты с пневматическими распылителями различных типов [6 - 9], снабженными индуцирующими электродами, линейная зависимость конвективного тока от напряженности электрического поля с точностью 20 % имеет место до 1 кв/мм. При дальнейшем увеличении напряженности поля становится заметным ток проводимости между жидкостью и индуцирующим электродом, что уменьшает возрастание конвективного тока. Пропорциональность между расходом хорошо проводящей жидкости и конвективным током частиц распыла по формуле (5) подтвердилась с точностью 10 % тогда, когда расход жидкости изменяли в пределах 0,3... 1,0  $\Phi_{\text{млк}}$  варьированием избыточного давления распыляющего воздуха от 0,5 до 2,5 ат. При изменении же расхода жидкости регулированием подачи ее в распылитель

$$I \approx \Phi^\beta, \quad (7)$$

где  $0,5 < \beta < 1$ . Заключение о точности выполнения формулы (5) осложнено отсутствием у нас экспериментальных данных по изменению величины  $\gamma/\alpha r_2$ .

Значение конвективного тока, оцененное по формуле (5), заметно меньше соответствующих наших экспериментальных данных.

Для проверки зависимости (6) распылителем, предложенным в [ 6 ], мы распыляли смесь трансформаторного масла и этилового спирта. Расход изменяли ограничением подачи жидкости. Силу конвективного тока измеряли по принципиальной схеме, изображенной на рис. 3. Измерителем тока служил милливольт-микроамперметр типа Ф П6/2. Полученные данные представлены на рис. I.

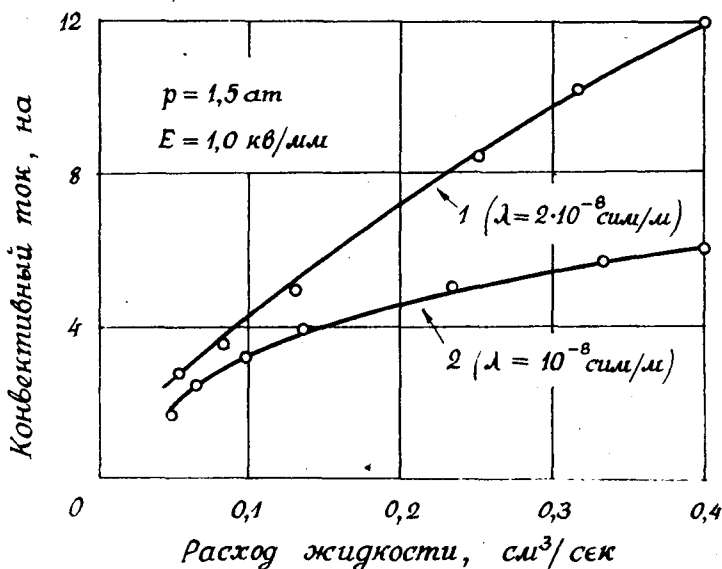


Рис. I.

Зависимость конвективного тока от расхода плохо проводящей жидкости ( $p$  – избыточное давление газа на входе распылителя)

Пропорциональность между конвективным током и удельной электропроводностью, как видно, выполняется лишь при максимальном расходе жидкости. Независимость конвективного тока от



расхода жидкости приведенными графиками однако не подтверждаются.

Щетлини и Кекки (1966) изучают образование заряженных частиц при распылении жидкости, для которой время накопления свободного заряда на поверхности пленки намного меньше времени пребывания пленки в электрическом поле ( $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  сек), т.е. жидкости, имеющей  $\epsilon/\lambda \ll 10^7$  ом-м. Представляя зону индукции зарядов в виде двухслойного конденсатора (воздух - вода) и исходя из условия равенства плотности тока через эти слои в установившемся режиме, они допускают неточность. Ведь ток через слой жидкости превышает ток через слой воздуха на величину, равную конвективному току. В более общих словах, динамический процесс рассматривается статически. Кроме того, при выводе формулы для поверхностной плотности заряда на пленке жидкости используется неравенство  $\lambda \gg \lambda_r$  ( $\lambda_r$  - удельная электропроводность воздуха), которое не учитывается при самой этой формуле. Как и у Таммета [ 3 ], заряд каждой частицы считается пропорциональным площади ее поверхности и поверхностной плотности заряда. Это предположение по сути дела и проверялось экспериментально авторами работы [ 4 ]. Полученная ими конечная формула для заряда одиночной частицы

$$q = 4\pi\epsilon_0 K \lambda U r^2 / (h\lambda_r + h_r\lambda), \quad (8)$$

где  $K = 0,85$  - постоянная распылительного процесса,  $U$  - напряжение между электродами распылителя,  $r$  - радиус частицы,  $h$  и  $h_r$  - толщина слоя жидкости и воздуха в зоне распыления. При этом следовало бы уточнить, что максимальное значение  $U$  определено не пробивным его значением, как полагают авторы, а некоторым меньшим, оптимальным напряжением [ 10, рис. 8 ]. К тому же при больших напряжениях зависимость заряда частиц от напряжения становится слабее линейной. Этим, по крайней мере, отчасти объясняется расхождение опытных данных максимального заряда частиц от соответствующих расчетных, приведенных в [ 4, рис. 5 ].

Дунский (1966) предлагает приближенную теорию электризации хорошо проводящих жидкостей, для которых выполнено неравенство  $\epsilon E \ll E_r$  ( $E$  - напряженность электрического поля в пленке распыливаемой жидкости). Моделью служит пневматический распылитель с кольцевым соплом. Предполагается, что пограничный слой между потоком воздуха и пленкой жидкости ламинарный и что расход жидкости определен напряжением трения на ее поверхности. Исходя из того, что конвективный ток равен произведению скорости образования поверхности пленки жидкости на поверхностную плотность заряда, находится

$$I = \frac{115 \epsilon_0 k U}{h + h_r} \left( \frac{\alpha \Phi}{2\mu} \right)^{1/2} \left( \frac{\mu_r \rho_r w_r^3}{L} \right)^{1/4}, \quad (9)$$

где  $k = 2,35$  - поправочный коэффициент, учитывающий возмущения на поверхности жидкости;  $\alpha$  и  $L$  - ширина и длина пленки жидкости в зоне индукции;  $\mu$  и  $\mu_r$  - динамическая вязкость жидкости и воздуха;  $\rho_r$  и  $w_r$  - плотность и средняя скорость воздуха в зоне распыления. Формула (9) практична тем, что она выражает зависимость конвективного тока заряженных частиц от параметров распылителя и режима распыления.

Автором работы [5] экспериментально проверялись в формуле (9) зависимости  $I \sim \Phi^{1/2}$  при  $w_r = 110$  м/сек и  $I \sim U$  при  $w_r = 85$  м/сек (распыливалась вода), которые хорошо подтвердились. Примененные скорости воздуха являются докритическими [11], а число  $Re = \Phi g / \alpha \mu$  для пленки жидкости по приведенным параметрам ( $\Phi = 6 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/сек;  $g = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha = 0,3$  м;  $\mu = 10^{-3}$  н·сек/м<sup>2</sup>) составляет 200. Это дает основание полагать, что режим течения пленки жидкости при проведенных опытах действительно был близкий к ламинарному с волнистой поверхностью раздела фаз [12]. Отсюда и согласно опытных данных с теорией, предполагающей ламинарное течение. При этом привлекает внимание обстоятельство, что экспериментально определенный коэффициент  $k$  в формуле (9) численно с большой точностью совпадает с отношением фазо-

вой скорости воли к среднеобъемной скорости жидкости, равным 2,4 [ 12, стр. 286 ]. Указанные зависимости в определенных пределах согласуются также с нашими экспериментальными результатами [ 10, рис. 8 и 9 ] .

Мы провели ряд опытов по выяснению применимости формулы (9) при критическом режиме истечения расширяющегося газа и, вероятно, турбулентном режиме течения пленки жидкости ( $Re > 200 \dots 400$ ). Эти режимы представляют интерес потому, что именно при них достигается наиболее высокая дисперсность струи [ 13 ] .

Зависимость конвективного тока от расхода воды изучалась на распылителе [ 6 ], при котором  $U = 1$  кв,  $h+h_p = 1,5$  мм,  $\alpha = 0,8$  мм,  $L = 1$  мм,  $w_f = 3 \cdot 10^2$  м/сек. Расход регулировался изменением сопротивления жидкостного канала. Полученные данные сопоставлены со значениями тока, вычисленными по формуле (9), в табл. I.

Таблица I

Сравнительные данные конвективного тока  
в зависимости от расхода жидкости

$\Phi$ , см <sup>3</sup> /сек	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
I эксп., мка	0,5	0,8	1,0	1,1	1,15
I по ф-ле(9); мка	0,07	0,10	0,14	0,17	0,20

Как видно, экспериментальные значения конвективного тока примерно на порядок величины превышают расчетные. Аналогичные результаты получены при испытании распылителей других типов.

Характер зависимости конвективного тока от расхода жидкости при двух типах распылителей иллюстрируется рис. 2. Приведенные графики показывают, что практически конвективный ток может зависеть от расхода слабее и сильнее, чем в сте-

пени 1/2.

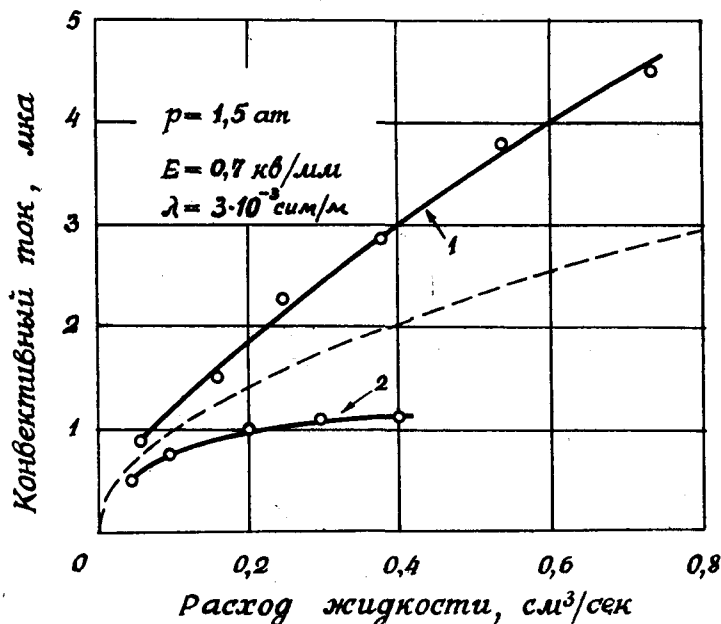


Рис. 2.

Зависимость конвективного тока от расхода хорошо проводящей жидкости: 1 - распылитель типа [ 9 ] с диаметрами сопел  $d_1 = 1$ ,  $d_2 = 2$ ,  $d_3 = 3$  мм; 2 - распылитель типа [ 6 ] с  $d = 0,8$  и  $d_T = 0,6$  мм. Прерывистой линией показана  $I \sim \phi^{1/2}$ .

Проверялась также зависимость конвективного тока от вязкости распыливаемой жидкости. При одном и том же расходе  $\phi = 0,2 \text{ см}^3/\text{сек}$  и прочих равных условиях распылителем типа [ 6 ] распыливались хорошо проводящие жидкости глицерин ( $\lambda = 10^{-4} \text{ сим/м}$ ) и ацетон ( $\lambda = 3 \cdot 10^{-5} \text{ сим/м}$ ), для которых  $\mu = 2$  и  $3 \cdot 10^{-4} \text{ н·сек/м}^2$ .

Соответствующие значения конвективного тока составляли 0,3 и 0,8 мка, т.е. отличались друг от друга всего лишь в 3 раза, в то время как по формуле (9) следовало бы ожидать отличия более чем в 80 раз.

Все вышеприведенные примеры расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями конвективного тока свидетельствуют о несоответствии указанных моделей образования зарядов действительному процессу в случае турбулентного течения пленки жидкости.

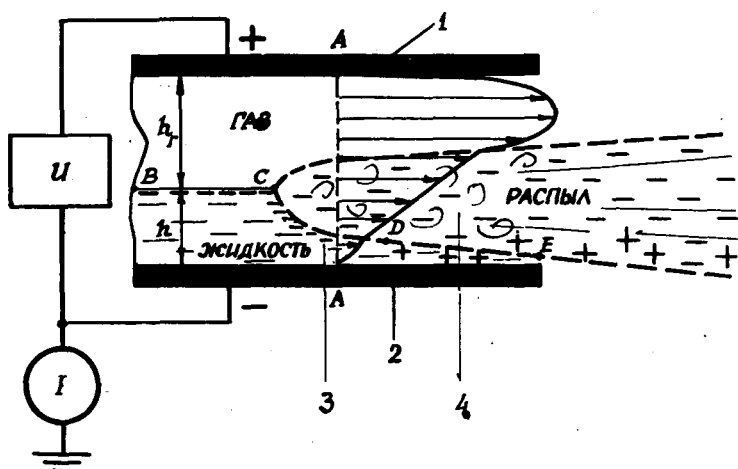


Рис. 3.

Принципиальная схема образования и измерения конвективного тока заряженных частиц при электростатической индукции.  $U$  - источник напряжения,  $I$  - измеритель тока.

Рассмотрим зону электростатической индукции зарядов и распыла, схематически изображенную на рис. 3. Через промежуток между электродом 1, называемым индуцирующим, и пленкой жидкости, текущей по поверхности электрода 2, проходит

поток газа. Последний препятствует попаданию жидкости на электрод I. Разность потенциалов, поданная от источника  $\mathcal{U}$  на электроды I и 2, создает между ними электрическое поле, которое наводит на поверхности жидкости заряды. Поток газа, взаимодействуя с пленкой жидкости, вызывает деформацию ее поверхности с образованием волн. Если на некотором начальном участке BC взаимодействия газа и жидкости течение последней является близким к ламинарному, то увеличивающиеся по потоку возмущения становятся настолько большими, что в точке C образуется турбулентный пограничный слой [14, стр. 41]. Таким образом, на участке CE жидкость разделяется на ламинарный подслои 3 и турбулентный слой 4. Для сечения A - A стрелками показан примерный профиль скоростей течения газа и жидкости. Так экспериментально установлено в работе [15], характер течения пленки жидкости, взаимодействующей с потоком газа, зависит от ее толщины и скорости течения газа. При этом с увеличением скорости газа увеличивается интенсивность срыва жидкости с поверхности пленки.

Отделяющиеся от пленки жидкости капельки благодаря наведенным поверхностным зарядам электризованы с самого начала их существования. Поэтому говорить о зарядке капель (или аэрозоля) способом электростатической индукции, как это иногда делается, не точно.

Часть заряженных капелек в зоне индукции, как показывает расчет и специальные измерения, может пройти слой газа и достичь электрода I, образуя ток утечки через газ.

В литературе распространено мнение, что распыление жидкости при электростатической индукции позволяет получить совершенно униполярно заряженный аэрозоль. Однако измерения полярных плотностей объемного заряда получаемого таким образом аэрозоля [16] свидетельствует о том, что в струе имеются и противоположно заряженные частицы. Вероятный механизм образования таких частиц следующий. Заряды частиц, отделившихся от сплошной части пленки жидкости, создают электрическое поле, которое на некотором участке DE может навести заряды противоположной полярности. Последние, переходя

в распыл, и обуславливает примесь противоположно заряженных частиц. К образованию равноименно заряженных частиц может привести также распад вытянутых капель, в которых поле между струей распыла и индуцирующим электродом вызвало перераспределение свободных зарядов.

На основании сказанного уносимые от генератора газовым потоком заряды составляют конвективный ток

$$I = \frac{aL \sigma(\tau)}{\tau} - I_1, \quad (10)$$

где  $\sigma(\tau)$  - средняя поверхностная плотность заряда, образующаяся на пленке жидкости ко времени ее распада  $\tau$ ;  $I_1$  - сумма тока, обусловленного обратной индукцией зарядов на поверхности распыливаемой жидкости, и тока утечки через газ, к которому относится также ток заряженных частиц, входящих из-за электростатического рассеяния на струю и возвращающихся к генератору [17].

Время  $\tau$  является статистически средней величиной, характеризующей степень взаимодействия между струей сжатого газа и пленкой жидкости, приводящего к отколке капель. Согласно [14, стр. 650], наибольшее значение этого времени выражается формулами

$$\tau = \begin{cases} \frac{h}{w_r} \sqrt{g/g_r} & \text{для маловязкой жидкости,} \\ \mu / (g_r w_r^2) & \text{для весьма вязкой жидкости.} \end{cases} \quad (11)$$

Если время  $\tau$  равно или превышает время прохождения поверхности жидкости через зону индукции, т.е. когда жидкость распадается на капли в конце зоны индукции или за ее пределами, то в уравнении (10) следует считать

$$\tau = L/w_n, \quad (12)$$

где  $w_n$  - средняя скорость движения поверхности жидкости в зоне индукции.

Для определения зависимости между конвективным током и условиями электризации выразим поверхностную плотность заряда как функцию параметров и режима работы распылителя. В дифференциальной форме

$$d\sigma = idt = \lambda E dt, \quad (I3)$$

где  $i$  - плотность тока в пленке жидкости (нормальная составляющая),  $t$  - время.

Приняв во внимание, что приближенно

$$\sigma/\epsilon_0 = \epsilon_r E_r - \epsilon E \quad (I4)$$

и

$$E_r = (u - hE)/h_r, \quad (I5)$$

находим  $E$ . Подставив соответствующее выражение в уравнение (I3), получим

$$d\sigma = \lambda \frac{\epsilon_0 \epsilon_r u - \sigma h_r}{\epsilon_0 (\epsilon h_r - \epsilon_r h)} dt. \quad (I6)$$

Интегрирование (I6) в пределах от  $t = 0$  до  $t = \tau$  при условии  $\sigma|_{t=0} = 0$  дает

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r u}{h_r} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h_r \lambda \tau}{\epsilon_0 (\epsilon h_r + \epsilon_r h)}\right) \right]. \quad (I7)$$

С учетом (I7) формула (I0) примет вид

$$I = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r u a l}{h_r \tau} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h_r \lambda \tau}{\epsilon_0 (\epsilon h_r + \epsilon_r h)}\right) \right] - I_1. \quad (I8)$$



Отсюда следует, что при распылении жидкости определенной электропроводности  $I$  достигает максимального значения, когда  $\tau \rightarrow 0$  :

$$I_{max} = \frac{\lambda \epsilon_r U a L}{\epsilon h_r + \epsilon_r h} - I_1. \quad (19)$$

Таким образом, конвективный ток тем больше, чем быстрее распадается поверхность жидкости в зоне индукции. При этом предполагается, что  $I_1$  сохраняется постоянным.

Без учета  $I_1$  формула (19) по существу совпадает с формулой (6), что объяснимо тем, что в случае плохо проводящих жидкостей на поверхности пленки не успевает накопиться больших зарядов, а это соответствует малому значению  $\tau$ .

Минимальное значение  $I$  получается тогда, когда жидкость в зоне индукции не распадается, т.е. когда  $\tau$  определяется формулой (12):

$$I_{min} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r U a w_n}{h_r} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{L h_r \lambda}{\epsilon_0 (\epsilon h_r + \epsilon_r h) w_n} \right) \right] - I_1. \quad (20)$$

Точный теоретический расчет величин  $I_1$ ,  $\tau$  и  $w_n$  затруднителен. Как показывают измерения, в случае эффективно-го удаления образующихся частиц от распылителя  $I_1 \ll I$  и им можно пренебречь.  $\tau$  и  $w_n$  зависят в основном от геометрии сопла, удельного расхода газа и вязкости жидкости. Установлено, что опытные значения  $I$  действительно не превышают  $I_{max}$  по (19).

В отношении электропроводности при фиксированном значении  $\tau$  подходящими для электризации можно условно считать жидкости, для которых выражение в квадратных скобках (18) больше 0,5, т.е. те, для которых

$$\lambda > \frac{0,7 \epsilon_0 (\epsilon h_r + \epsilon_r h)}{h_r \tau}. \quad (21)$$

Итак, наряду с электропроводностью существенным фактором, определяющим конвективный ток заряженных частиц при электростатической индукции, является интенсивность срыва капель с поверхности распыливаемой жидкости.

#### Л и т е р а т у р а

1. Burkhardt E. Die Erzeugung hoher Spannungen mit Hilfe eines monopolar beladenen Luftstromes. *Annalen der Physik*, Bd. 23, Leipzig, 1935, 339-370.
2. Китаев А.В., Смирнова Л.А. Характеристики электроаэрозолей некоторых лекарственных растворов. "Труды ВНИИМИО", 1963, вып. I, 164 - 171.
3. Таммет Х.Ф. Индукционная электризация при распылении жидкостей. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1963, вып. 140, 90-95.
4. Щеткин А.П., Кекин А.А. Новый ороситель и методика расчета заряда капель. "Вестник АН Каз. ССР", 1966, № 9, 42-47.
5. Дунский В.Ф. Индукционный способ униполярной электризации при образовании аэродисперсных систем. "Коллоидный журнал", 1966, № I, 34-38.
6. Рейнет Я.Ю., Таммет Х.Ф. Аэрозоль-ионизатор. Авт. св. № 123636. Бюлл. изобр., 1959, № 21.
7. Китаев А.В., Прошин В.А. Ручной аэрозоль-ионизатор. Авт.св. № 181749. Бюлл. изобр., 1966, № 10.
8. Рейнет Я.Ю., Виснапуу Л.Ю. Распылитель для электроаэрозольной терапии. Авт. св. № 193690. Бюлл.изобр., 1967, № 7.
9. Golitzine N., Sharp C.R., Badham L.G. Spray nozzles for simulation of cloud conditions in icing tests of jet engines. National aeronautical establishment.

10. Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю. Изучение возможности использования пневматических распылителей для электрической зарядки распыливаемых жидкостей. Сб. Окраска изделий в электрическом поле. Изд-во "Химия", М., 1966, 71-79.
11. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. Изд-во "Энергия", М., 1968, 273.
12. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. Изд-во "Энергия", М., 1968, 281.
13. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкости форсунками. Госэнергоиздат, М.-Л., 1962, 85.
14. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. Физматгиз, М., 1959.
15. Чернухин В.А. Исследование течения пленки жидкости при взаимодействии ее с нестабилизированным потоком газа. "Изв. вузов, Машиностроение", 1962, № 8.
16. Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю. О создании электрически заряженных аэрозолей в камерах. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1970, вып. 240, 297-304.
17. Виснапуу Л.Ю. Электростатическое рассеяние заряженных частиц в турбулентной струе. - В настоящем выпуске.

**PIHUSTATAVATE VEDELIKE INDUKTSIOON-  
LAADIMISE TEORIAST**

L. Viisapuu

Resüme

Analüüsitakse vedelike pneumaatilisel pihustamisel elektriväljas saadavate laetud osakeste voolutugevuse arvutamise valemeid. Eksperimentaalselt on kontrollitud nende kehtivust mõningate pihustamisrežiimide korral. Kirjeldatakse laetud osakeste tekkimise mudelit, mille põhjal näidatakse, et konvektiivne vool on määratud põhiliselt vedeliku erijuhtivuse ja selle pinnalt tilkade ärarebimise intensiivsusega. Esitatakse hüpotees mõningate vastasmärgiliselt laetud osakeste moodustumise mehhanismi kohta.

**ON THE THEORY OF INDUCTION ELECTRIZATION  
OF LIQUIDS TO BE ATOMIZED**

L. Viisapuu

Summary

Formulas for the calculation of the current of charged particles obtained by the pneumatical atomization of liquids in the electric field are analysed here. Their validity in case of some conditions of atomization has been checked up experimentally. The model of formation of charged particles is described and on the basis of that model it is shown that convective current is determined mainly by the specific conductivity of the liquid and the intensity of tearing off drops from its surface. A hypothesis is proposed on the mechanism of formation of some charged particles of opposite signs.

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ

Л.В. Виснапу

При генераторах электроаэрозолей, а также генераторах ионов, при которых удаление заряженных частиц от источника осуществляется газовой струей, электростатическое рассеяние зарядов может привести к значительным потерям их. Под потерями зарядов в данном случае будем понимать заряды, вышедшие за пределы газовой струи. Сказанное обосновано тем, что покинувшие струю заряженные частицы не подчинены транспортирующему действию основного газового потока, истекающего из генератора. Под влиянием электрического поля или каких-либо других факторов эти частицы могут возвращаться к генератору, осаждаться на близлежащие тела или рассеиваться в окружающую среду. Учет потерь зарядов необходим при нахождении закономерности изменения плотности заряда в струе, при оценке эффективности транспортировки заряженных частиц и при определении параметров режима работы генераторов.

В известных работах [1 - 3], в которых затронуты вопросы электростатического рассеяния зарядов в струях, авторы исходят из условия непрерывности тока по оси струи, в связи с чем потери зарядов исключаются из рассмотрения. Поэтому остается открытым объяснение ряда существенных эффектов, имеющих место при генераторах заряженных частиц. На этих эффектах мы остановимся в конце данной статьи.

Рассмотрим осесимметричную затопленную турбулентную струю, содержащую заряженные частицы и вытекающую из круглого отверстия радиусом  $R_0$ . Координатную ось  $Ox$  направим

по оси струи и начало координат совместим с начальным сечением струи. Для упрощения расчетов допустим, что скорости  $W$  частиц, равные скорости увлекающего их газового потока, и плотность заряда  $q$  постоянны по всему поперечному сечению струи и зависят лишь от расстояния  $x$  между данным сечением и начальным, а подвижности  $k$  всех заряженных частиц одинаковы и неизменны.

Если по мере удаления от начального сечения часть заряженных частиц выходит за пределы струи, то сила тока в струе убывает.

По закону сохранения заряда на отрезке  $dx$

$$J_{dx} - J = dJ, \quad (1)$$

где  $J_{dx}$  и  $J$  - сила тока в сечениях струи с координатами  $x + dx$  и  $x$  соответственно, а  $dJ$  - сила тока зарядов, покинувших струю на отрезке  $dx$ . Так как

$$J = qwS, \quad (2)$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения струи с координатой  $x$ , то левая часть уравнения (1)

$$J_{dx} - J = d(qwS). \quad (3)$$

Поскольку выход зарядов из струи обусловлен электростатическим рассеянием [ 4 ], то можем написать

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{k}{\epsilon_0} q^2, \quad (4)$$

где  $t$  - время и  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная.

Умножив обе части этого уравнения на объем рассматриваемого отрезка струи, получим для правой части (1)

$$dJ = -\frac{k}{\epsilon_0} q^2 S dx. \quad (5)$$

Теперь с учетом (3) и (5) уравнение (1) примет вид

$$d(\varrho w S) = -\frac{k}{\varepsilon_0} \varrho^2 S dx, \quad (6)$$

или

$$\frac{d(\varrho w S)}{dx} = -\frac{k}{\varepsilon_0} \varrho^2 S. \quad (6')$$

После раскрытия скобок и преобразования получим

$$\frac{d\varrho}{dx} + \frac{\varrho}{S} \frac{dS}{dx} + \frac{\varrho}{w} \frac{dw}{dx} + \frac{k}{\varepsilon_0 w} \varrho^2 = 0. \quad (7)$$

С целью конкретизации последнего уравнения выразим  $S$  и  $w$  через  $x$ . Для круглой струи согласно [ 5 ]

$$S = S_0 (Ax + 1)^2. \quad (8)$$

Здесь  $S_0$  - площадь начального сечения струи и

$$A = 3,4 \frac{\alpha}{R_0}, \quad (9)$$

причем  $\alpha = 0,08$  - коэффициент турбулентности, определяющий степень расширения струи;  $R_0$  - радиус начального сечения струи.

Для выражения  $w$  воспользуемся условием сохранения суммарного количества движения вещества в струе:

$$Mw_0 = [M + \gamma(S - S_0)w]w, \quad (10)$$

где  $M = (M_{\text{г}} + M_{\text{жс}})$  - суммарный массовый расход газа и жидкости через начальное сечение струи;  $w_0$  - скорость струи в начальном сечении;  $\gamma$  - плотность подмешивающегося к струе окружающего воздуха.

Приняв во внимание соотношение (8) и что

$$M = \gamma_0 S_0 w_0, \quad (II)$$

где  $\gamma_0$  - плотность вещества струи в начальном сечении, из (10) находим

$$w = \frac{2w_0}{B} \frac{\sqrt{Q} - 1}{Ax(Ax + 2)}, \quad (12)$$

причем введены обозначения

$$B = 4\tau/\gamma_0, \quad (13)$$

$$\sqrt{Q} = \sqrt{BAx(Ax + 2) + 1}. \quad (14)$$

Подставив выражения (8) и (12) в уравнение (7), после вычислений имеем

$$\frac{d\varphi}{dx} + \frac{kBAx(Ax + 2)}{2\varepsilon_0 w_0 (\sqrt{Q} - 1)} \varphi^2 + \left[ \frac{2A}{Ax + 1} + \frac{BA(Ax + 1)}{\sqrt{Q}(\sqrt{Q} - 1)} - \frac{2(Ax + 1)}{x(Ax + 2)} \right] \varphi = 0. \quad (15)$$

Это дифференциальное уравнение Бернулли [ 6 ], решением которого при граничном условии  $\varphi|_{x=0} = \varphi_0$  является

$$\varphi = \frac{\frac{2\varepsilon_0 w_0 B}{k} \frac{A^2 x(Ax + 2)}{(Ax + 1)^2 (\sqrt{Q} - 1)}}{\frac{Ax(BAx + 4) - 2(\sqrt{Q} - 1)}{Ax + 1} + 2\sqrt{B} \ln \frac{\sqrt{Q} + \sqrt{B}(Ax + 1)}{1 + \sqrt{B}}} + \frac{4\varepsilon_0 w_0 A}{k\varphi_0}. \quad (16)$$

Полученная формула выражает закономерность уменьшения плотности заряда в струе с удалением от начального сечения. В определенном сечении струи, как видно, плотность заряда тем



Большее, чем больше начальная плотность заряда и скорость заряженных частиц и чем меньше их подвижность. Из общей формулы (16) следуют частные случаи, когда

а) отсутствует электростатическое рассеяние частиц, тогда  $k = 0$  и

$$\varphi = 2\varphi_0 \frac{\gamma}{\gamma_0} \frac{Ax(Ax+2)}{(Ax+1)^2(\sqrt{Q}-1)} ; \quad (17)$$

б) отсутствует механическое рассеяние, тогда  $\alpha = 0$  ( $A = 0$ ) и

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 \frac{kx}{\varepsilon_0 w_0} + 1} ; \quad (18)$$

в) рассматриваемое сечение струи находится на достаточно большом расстоянии от генератора, т.е.

$$x \gg \frac{1}{A\sqrt{B}} , \quad (19)$$

и тогда

$$\varphi \approx \frac{2\varepsilon_0 w_0}{kx[\sqrt{B}Ax + 2 \ln(2\sqrt{B}Ax) + (4\varepsilon_0 w_0 A / \sqrt{B} k \varphi_0)]} \cdot (20)$$

Если в последнем случае имеет также место

$$x \gg \frac{4\varepsilon_0 w_0}{Bk\varphi_0} , \quad (21)$$

то

$$\varphi \approx \frac{2\varepsilon_0 w_0}{xk[\sqrt{B}Ax + 2 \ln(2\sqrt{B}Ax)]} \cdot (22)$$

При этом плотность заряда в струе почти не зависит от производительности генератора по заряду, она пропорциональна начальной скорости и обратно пропорциональна плотности заряженных частиц. Далее, приняв во внимание обозначения (9) и (13), из (22) следует, что плотность заряда на определенном расстоянии от генератора тем больше, чем больше площадь начального сечения струи и чем меньше отношение плотностей газа, подменивающегося к струе из окружающей среды, и исходного вещества струи.

Формулы, аналогичные (17) и (18), приведены Абрамовичем [ 7 ] для концентрации тяжелой примеси и Уэтби и Мак-Фарландом [ 2 ] для концентрации легких ионов в турбулентной струе.

На основании уравнения (2), воспользовавшись выражениями (8), (12) и (16), можно определить силу тока в струе

$$J = \frac{4\epsilon_0 w_0^2 S_0 A}{k \left[ \frac{Ax(BAx+4) - 2(\sqrt{q}-1)}{Ax+1} + 2\sqrt{B} \ln \frac{\sqrt{q} + \sqrt{B}(Ax+1)}{1+\sqrt{B}} \right] + \frac{4\epsilon_0 w_0 A}{g_0}} \quad (23)$$

При выполнении неравенств (19) и (21)

$$J \approx \frac{4\epsilon_0 w_0^2 S_0}{k \left[ Bx + \frac{2\sqrt{B}}{A} \ln(2\sqrt{B} Ax) \right]} \quad (24)$$

И так как  $\gamma_0 w_0 S_0 = M$ , то с учетом (13) можно записать

$$J \approx \frac{\epsilon_0 w_0 M}{k\gamma \left[ x + \frac{2}{\sqrt{B}A} \ln(2\sqrt{B} Ax) \right]} \quad (25)$$

Таким образом, при указанных условиях сила тока в струе приблизительно пропорциональна скорости истечения и массовому расходу исходного вещества струи и обратно пропорциональ-

на подвижности заряженных частиц и плотности подменивающегося к струе газа.

Если из газового сопла пневматического генератора электроаэрозолей вытекает газ, к которому подменивается жидкость с нулевой начальной скоростью, то  $w_0 = w_1 M_1 / M$  и

$$J \approx \frac{\epsilon_0 w_1 M_1}{k\gamma \left[ x + \frac{2}{\sqrt{BA}} \ln(2\sqrt{BA}x) \right]}, \quad (26)$$

т.е. сила конвективного тока в струе увеличивается с увеличением начальной скорости и массового расхода распыливаемого газа.

Для оценки эффективности транспортировки заряженных частиц целесообразно пользоваться безразмерной величиной  $J/J_0$ , показывающей, какая доля зарядов, выходящих из генератора, сохранится в струе до определенного расстояния от него. Названная эффективность тем выше, чем больше значение силы тока, выраженной последними формулами.

Полученные результаты позволяют объяснить некоторые эффекты, наблюдаемые при работе пневматических генераторов электроаэрозолей.

1. Возрастание тока, отдаваемого генератором, при приближении к его выходному отверстию какого-либо тела. Измерение тока производится при этом микроамперметром, включенным в единственную цепь заземления генератора. Дело в том, что рассеянные из струи заряженные частицы, оказавшись в относительно неподвижной окружающей среде, подвергаются воздействию электрического поля струи, направляющего часть зарядов на близлежащее тело, а другую часть обратно на генератор. Чем ближе названное тело, тем меньше зарядов возвращается к генератору, так как участок струи, с которого силовые линии поля направлены на генератор, меньше. Для оценки соотношения длин участков струи, с которых рассеянные заряды осаждаются на генератор и близлежащее тело, предположим, что все заряды любого поперечного сечения струи сосредоточены на оси. Тогда с учетом (8) и (22) линейная плотность заряда

$$\tau = S\varphi \approx \frac{2\varepsilon_0 w_0 S_0 A}{k \left[ \sqrt{B} + \frac{2}{Ax} \ln(2\sqrt{BAx}) \right]} \quad (27)$$

Как видно, линейная плотность заряда по оси почти постоянна. В таком случае интересующие нас длины участков приблизительно равны и заряды, покинувшие первую по длине половину струи, возвращаются к генератору, образуя потери. (Здесь под генератором будем понимать распылитель и электрически связанные с ним предметы, заземленные через микроамперметр). При этом согласно (25) сила тока, отдаваемого генератором,

$$J \approx \frac{\varepsilon_0 w_0 M}{k_T \left[ \frac{L}{2} + \frac{2}{\sqrt{BA}} \ln(\sqrt{BAL}) \right]}, \quad (28)$$

где  $L$  - расстояние от генератора до близлежащего постороннего не связанного с генератором тела.

Данная закономерность уменьшения конвективного тока с удалением близлежащего тела от генератора имеет силу до тех пор, пока половина отделившихся от струи зарядов возвращается к генератору. По мере дальнейшего увеличения расстояния  $L$  относительная доля возвращающихся зарядов однако будет уменьшаться из-за рассеяния их в окружающее пространство и уменьшение тока  $J_1$  будет ослабевать, т.е. конвективный ток будет асимптотически приближаться к некоторому постоянному значению  $J_2$ .

Следовательно, чтобы по вышеуказанной методике измерить силу тока  $J_0$  заряженных частиц, вылетающих из выходного отверстия генератора, необходимо перед последним на возможно близком расстоянии установить заземленное тело, например, сетку. Для определения же  $J_2$  струю нужно направить в сторону, где вблизи нет посторонних тел. Разность  $J_0 - J_2$  будет выражать наибольшую силу тока зарядов, могущих возвратиться из струи обратно на генератор.

2. Сила тока, отдаваемого генератором, при выполнении неравенств (19) и (21) существенно не зависит от произ-

водительности по заряду и увеличивается с увеличением массового расхода газа, транспортирующего заряженные частицы. Это следует непосредственно из формул (26) и (28). Для увеличения конвективного тока поэтому целесообразно применять добавочный воздух как предложено, например, в [ 8 ] .

3. При соответственно равных параметрах режима работы большей эффективностью транспортировки заряженных частиц обладает генератор, у которого площадь эффективного начального сечения струи меньше. Под эффективным начальным сечением при этом следует понимать сечение, определяющее формирование основного участка струи. Например, в случае пневматического генератора с кольцевым распылительным соплом [ 9 ] начальный участок струи имеет поперечное сечение в виде кольца, которое в переходном участке переходит в круг. Рассматривая формирование основного участка струи, можно принять, что эффективное начальное сечение струи представляет собой круг с радиусом кольцевой щели распылителя, а соответствующая начальная скорость струи определяется из граничного условия объемного расхода первоначальной смеси как

$$\overline{w}_0 = \frac{S_k}{S_0} w_k , \quad (29)$$

где  $\overline{w}_0$  - эффективная начальная скорость кольцевой струи, имеющей в кольцевом сечении начальную скорость  $w_k$  ;  $\overline{S}_0$  - площадь эффективного начального (кругового) сечения, образованного кольцевой щелью с площадью поперечного сечения  $S_k$ .

Подставив выражение (29) вместо начальной скорости в уравнениях (25) и (28), получим

$$J \approx \frac{\epsilon_0 S_k w_k M}{k \gamma \overline{S}_0 \left[ x + \frac{2}{\sqrt{BA}} \ln(2\sqrt{BA}x) \right]} \quad (30)$$

$$J_1 \approx \frac{\varepsilon_0 S_{\kappa} w_{\kappa} M}{k \gamma \bar{S}_0 \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\sqrt{BA}} \ln(\sqrt{BA} L) \right]} \quad (31)$$

Отсюда следует, что сила тока в струе, создаваемой генератором с кольцевым соплом, а следовательно, и эффективность транспортировки заряженных частиц обратно пропорциональны площади эффективного начального сечения струи при прочих равных условиях. На основании сказанного можно заключить, что в отношении меньших потерь зарядов из-за электростатического рассеяния их из струи распылитель с круговым выходным отверстием более целесообразен, чем распылитель с кольцевым отверстием.

Формулы (22), (28) и (31) подтверждаются многочисленными экспериментальными данными, полученными при испытании различных пневматических генераторов электроаэрозолей и аэроинсизаторов. В частности, о влиянии расхода добавочного воздуха и подвижности заряженных частиц на эффективность транспортировки их описано в статьях [10] и [11]. О зависимости плотности заряда в струе от расстояния до генератора сообщено в [12].

Автор признателен Я.И. Салыму и Э.И. Тамму за полезные обсуждения вопросов, связанных с данной работой.

#### Л и т е р а т у р а

1. Burkhardt E. Die Erzeugung hoher Spannungen mit Hilfe eines monopolar beladenden Luftstromes. Annalen der Physik, Bd. 23, Leipzig, 1935, S. 339-370.
2. Whitby K.T., McFarland A.R. The decay of unipolar small ions and homogeneous aerosols in closed spaces and flow

- systems: Proceedings of International Conference on ionization of the air. Philadelphia, 1961, P.VII (1-30).
3. Таммет Х.С. Удаление ионов от аэроинизаторов. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", вып. 140. Тарту, 1963, 103-112.
  4. Фуко Н.А. Механика аэрозолей. Изд-во АН СССР, М., 1955, 104.
  5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Госэнергоиздат, М.-Л., 1960, 369.
  6. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Физматгиз, М., 1961, 311 (1.34).
  7. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Гостехиздат, М., 1953, 281.
  8. Виснапуу А.Ю., Рейнет Я.Ю. Распылитель для электроаэрозольной терапии. Авт. св. № 211035. Бюлл., 1968, № 7, 66.
  9. Рейнет Я.Ю., Виснапуу А.Ю. Распылитель для электроаэрозольной терапии. Авт. св. № 193690. Бюлл., 1967, № 7, 87.
  10. Виснапуу А.Ю., Рейнет Я.Ю., Ютс Э.Б. Коронный нейтрализатор со сквозным потоком воздуха. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", вып. 240, Тарту, 1970, 243-251.
  11. Виснапуу А.Ю., Рейнет Я.Ю., Тетсов Э.А. Сравнительное исследование эффективности нейтрализации электростатических зарядов посредством генераторов аэроионов и электрически заряженного аэрозоля. Там же, 262-270.
  12. Виснапуу А.Ю. Измерение распределения объемной плотности заряда по оси струи пневматического электроаэрозольного генератора. Проблемы электроаэро-

золей (материалы научно-технического совещания 15-17 сент. 1969 г.) Тарту, 1969, 14-16.

**LAETUD OSAKESTE ELEKTROSTAATILINE HAJUMINE  
TURBULENTSES JOAS**

**L. Visnapuu**  
**Resüme**

Käsitletakse laetud osakeste elektrostaatilist hajumist telgsümmeetrilises turbulentses joas. Arvutuste abil leitakse joa laengu ruumtiheduse ja konvektiivse voolu sõltuvus generaatori kaugusest, konstruktiivsetest parameetritest ja töörežiimist ning laetud osakeste liikuvusest. Saadud tulemuste põhjal seletatakse mõningaid efekte, mis esinevad elektroaerosooligeneraatorite konvektiivse voolu mõõtmisel.

**ELECTROSTATIC SCATTERING OF CHARGED PARTICLES  
IN A TURBULENT JET**

**L. Visnapuu**  
**Summary**

The article deals with the electrostatic scattering of charged particles in an axially symmetric turbulent jet. The dependence of the spatial charge density and the convection current of the jet on the distance from the electroaerosol generator, the design parameters and the operating conditions as well as the mobility of charged particles has been established by means of calculations. The results obtained enable one to explain some effects taking place in measuring the convection current of the electroaerosol generators.



## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ВОЛОКОН ПРИ ФОРМОВАНИИ ДЛИННОВОЛОКНИСТОЙ БУМАГИ

А.Е. Гудин, Л.Д. Высоцкому

Как уже ранее сообщалось [ 1 ] , электризация волокон, возникающая в процессе формования длинноволокнистой бумаги сухим способом, нарушает однородность бумажного полотна вследствие образования волокнистых хлопьев.

До последнего времени изучение процесса электризации волокон при формовании длинноволокнистой бумаги было затруднено из-за отсутствия методики определения электростатического заряда волокон, движущихся в воздушном потоке.

Новая методика, разработанная для этой цели в проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозольей Тартуского государственного университета [ 1 ] , позволила успешно изучить процесс электризации волокон при образовании бумажного полотна.

Принцип действия формующего устройства бумагоделательной машины для производства длинноволокнистой бумаги заключается в следующем [ 2 ] .

Волокнистый материал разделяется на отдельные волокна и небольшие агрегаты вращающимся диспергирующим барабаном, снабженным зубьями. Далее волокно поступает в воздушный поток, создаваемый вентилятором в вертикальной аэродинамической трубе, сопряженной с диспергирующим барабаном.

Так создается волокнистая воздушная суспензия. В результате фильтрации этой суспензии через движущуюся сетку на последней образуется волокнистый слой заданной толщины,

который затем проклеивается полимерным связующим, прессуется и сушится — получается бумага.

Для математического описания процесса электризации волокон при разделении волокнистого материала было применено факторное планирование эксперимента типа  $2^n$  [ 3 ] .

Предполагалось, что наибольший эффект электризации волокон возникает при разделении волокна диспергирующим барабаном вследствие значительной окружной скорости последнего.

Предполагалось также, что трению о стенки аэродинамической трубы подвергается незначительная часть волокон из общего потока, в силу чего образующимися при этом дополнительными зарядами можно пренебречь.

Критериями оптимизации при проведении экспериментов служили абсолютные значения удельных электростатических зарядов волокон, измеренные методом коллектора [ 1 ] .

На основании изучения априорной информации [ 4 ] были намечены следующие входные параметры:

$X_1$  — модалная длина волокна  $l_m$  . При постоянной конструкции узла разделения волокнистого материала  $l_m$  предопределяет длину той части волокна, которая подвергается непосредственному воздействию зубьев диспергирующего барабана, до того момента, пока волокно не покинет зону разделения.

$X_2$  — безразмерный критерий разделения волокон  $B$  [ 5 ] , характеризующий степень разделения волокнистого материала диспергирующим барабаном и косвенно определяющий длительность воздействия зубьев барабана на волокна.

$X_3$  — линейная (окружная) скорость диспергирующего барабана  $v$  , от которой зависят сила удара зубьев и сила трения граней зубьев о волокна.

В соответствии с точкой зрения Гельмгольца [ 4 ] влияние трения при возникновении зарядов сводится, главным образом, к увеличению поверхности двойного электрического слоя, что увеличивает перенос зарядов.

В табл. I представлены намеченные независимые переменные, уровни и интервалы их варьирования

Таблица I

Факторы, уровни и интервалы их варьирования при изучении процесса электривакации волокон

Факторы	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	-I	0	+I	
X <sub>1</sub> - модальная длина волокна, мм ( $l_m$ )	10	20	30	10
X <sub>2</sub> - безразмерный критерий разделения волокон (B)	600	1300	2000	700
X <sub>3</sub> - линейная скорость зубьев диспергирующего барабана, м/мин ( $v$ )	600	1200	1800	600

В качестве волокнистого материала при проведении опытов служили модельные волокна, которые качественно можно представить в виде "вытянутых цилиндров". Применялись волокна "лавсан" диаметром 16 мкм с модальной длиной 10, 20, 30 мм. Распределение длины волокон в материале гауссово со среднеквадратичным отклонением (соответственно для указанных длин) 2, 4, 6 мм. Распределение симметричное.

Применялись волокна, обработанные антистатическим препаратом, содержащим в своем составе NaCl, и волокна без антистатической обработки.

В результате реализации факторного эксперимента получены следующие математические модели, адекватные при вероятности 95 % и уровне значимости 0,05:

Для волокон, не обработанных антистатическим препаратом,

$$(-) y' = 3,11 + 0,496x_1 + 0,352x_2 - 0,069x_1x_2 + 0,078x_1x_3 - 0,089x_2x_3;$$

$$S_{1y} = 0,02 ; \quad \pm \Delta b'_i = 0,046 ; \quad (1)$$

$$F'_{\text{экс}} = 0,3 < 2,45 = F_{0,05} (\text{таб}).$$

Для волокон, обработанных антистатическим препаратом,

$$(+) y'' = 0,490 + 0,101x_1 + 0,051x_2 + 0,091x_3 + 0,039x_1x_3;$$

$$S_{2y} = 0,014 ; \quad \pm \Delta b_i = 0,032 ; \quad (2)$$

$$F''_{\text{экс}} = 1,29 < 2,45 = F_{0,05} (\text{таб}).$$

Здесь  $S_y$  - ошибка опыта;  $\pm \Delta b_i$  - интервал варьирования коэффициентов регрессии [ 3 ] ;  $F$  - критерий Фишера;

$$x_1 = \frac{X_1 - 20}{10} ; \quad x_2 = \frac{X_2 - 1300}{700} ; \quad x_3 = \frac{X_3 - 1200}{600} .$$

(см. табл. I)

Полученные уравнения дают возможность оценить вклад каждого из намеченных факторов при образовании электростатических зарядов.

При изучении электризации волокон ограничились линейной моделью.

На рис. I представлены данные, иллюстрирующие влияние удельного электростатического заряда на неравномерность

бумаги. Последняя определялась оптическим способом на микрофотометре МФ-4 [6] .

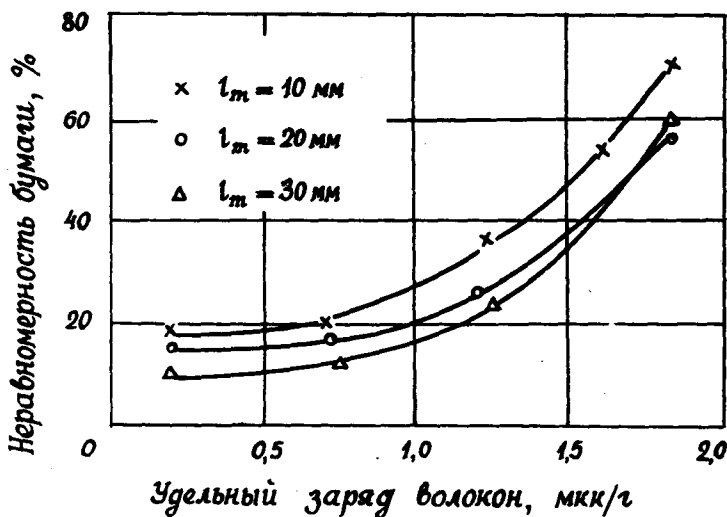


Рис. 1. Влияние удельного заряда волокон на неравномерность бумажного листа.

На основании полученных данных можно констатировать, что величина удельного электростатического заряда, равная 1,2 мкк/г, является критической, интервал значений  $0,8 \div 1,2$  мкк/г - переходным.

При значениях удельных зарядов, превышающих критическую величину, наблюдается осаждение волокон на стенках аэродинамической трубы формирующего устройства бумагоделательной машины в виде непрерывного слоя.

После того, как слой волокон на стенках трубы достигает определенной толщины, под действием силы тяжести и динамического давления воздушного потока происходит отделение

крупных хлопьев от слоя осевших волокон. Падая на сетку, хлопья нарушают равномерность бумажного полотна.

В табл. 2 представлены результаты экспериментов, свидетельствующие о наличии в воздушном потоке волокон с зарядами обеих полярностей. При проведении экспериментов определение полярных удельных зарядов производилось методом заряженного конденсатора [ I ] .

Принимая во внимание тот факт, что образование хлопьев происходит вследствие осаждения заряженных волокон на стенках аэродинамической трубы, а так же и то, что в потоке находятся волокна с разноименными зарядами, можно выдвинуть две гипотезы:

1. Образование хлопьев происходит только лишь из-за осаждения волокон на стенках аэродинамической трубы. При этом предполагается, что кулонова сила, действующая между волокнами, несущими заряды противоположных знаков, невелика и притягивание их друг к другу значительно меньше воздействия турбулентного воздушного потока на эти волокна.

2. Кулоновы силы, действующие между разноименно заряженными волокнами (при удельном заряде, превышающем критическое значение), вызывают дополнительный эффект агрегирования волокон между собой, вследствие чего образуются хлопья, которые невозможно обнаружить в воздушном потоке из-за достаточно большой скорости их движения.

Судить об образовании таких хлопьев путем анализа бумаги на микрофотометре так же невозможно, т.к. одновременно происходит значительное хлопьеобразование вследствие осаждения заряженных волокон на стенках аэродинамической трубы формующего устройства.

Для проверки выдвинутых гипотез путем специальной обработки стенок аэродинамической трубы препаратом, являвшимся одновременно антистатиком и слабополяризуемым веществом (по сравнению с оргстеклом, из которого изготовлена труба), эффект осаждения волокон на стенках трубы был сведен практически к нулю и в чистом виде выделено взаимодействие заряженных волокон.

Полученные данные, приведенные в табл. 3, убедительно показывают, что взаимодействие заряженных волокон в воздушном потоке дополнительного образования хлопьев не вызывает.

Таблица 2

Полярные удельные заряды волокна

№	Вид волокна	Полярный удельный заряд, мкк/г	
1	Лавсан, $l_{тл} = 30$ мм	+9,1	-13,1
2	То же, обработанный антистатиком	-	-
3	Лавсан, $l_{тл} = 20$ мм	+4,7	-7,2
4	Лавсан, $l_{тл} = 10$ мм	+0,7	-2,8

Таблица 3

Результаты по проверке гипотез 1 и 2  
(средние значения на пяти параллельных опытах)

№	Условия формирования бумаги	Неравномерность бумаги, %
1	Из волокон, обработанных антистатическим препаратом, $l_{тл} = 20$ мм, $Q = +0,5$ мкк/г	25
2	Из волокон, не обработанных антистатическим препаратом, $Q = -3,1$ мкк/г, сильное осаждение волокон на стенках труб	49 - 52
3	То же, но стенки трубы покрыты специальным составом - волокна на стенках труб не осаждаются	28

## ВЫВОДЫ

1. Величина удельного электростатического заряда на волокнах зависит от модальной длины волокна, величины критерия разделения волокон при их диспергировании, линейной скорости диспергирующего барабана.

2. С целью предотвращения нарушения равномерности бумажного полотна величина удельного электростатического заряда на волокнах не должна превышать 0,8 - 1,2 мкк/г.

3. Образование хлопьев при электризации волокон происходит вследствие осаждения их на стенки аэродинамической трубы формуемого устройства бумагоделательной машины. Взаимодействие разноименнозаряженных волокон в воздушном потоке заметного хлопьеобразования не вызывает.

## Л и т е р а т у р а

1. Виснапуу Л.Ю., Гудин А.Е., Лепки М.Э. Об измерениях электростатических зарядов волокнистых материалов, транспортируемых воздушным потоком. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та". 1970, вып. 240, 271-278.
2. Дмитриев М.Д., Бондаренко М.В. Сухой способ изготовления длинноволокнистой бумаги. "Научные труды" ЦНИИ бумаги, Гослесбумиздат, М.-Л., 1956, вып. 41.
3. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. Изд-во "Наука". Главная редакция физико-математической литературы, М., 1956.



4. Радовицкий В.П., Стрельцов Б.Н. Электродинамика текстильных волокон. Изд-во "Легкая индустрия", М., 1967.
5. Гуцин А.Е. Причины хлопьеобразования при получении бумаги сухим способом. "Бумажная промышленность", 1964, № 5.
6. Гуцин А.Е. Некоторые предпосылки для проектирования аэродинамической трубы формующего узла бумагоделательной машины сухого способа формования. "Труды ВНИИ бумаги", Л., 1970, вып.56.

**KIUDUDE ELEKTRISEERUMISE UURIMINE PIKAKIULISE  
PABERI VORMIMISEL**

A. Guštš'in, L. Visnapuu  
Resüme

Matemaatiliste mudelite abil on uuritud kiudude elektriseerumist kiudmaterjali dispergeerimisel ja kiudude liikumisel aerodünaamilises torus. On näidatud, et kiudude puntide moodustumine on tingitud kiudude kogunemisest aerodünaamilise toru seintele, kusjuures vastasmärgiliselt laadunud kiudude omavaheline koaguleerumine puntide tekkimist esile ei kutsu.

**INVESTIGATION OF THE ELECTRIFICATION OF FIBRES  
IN FORMING LONG-FIBRED PAPER**

A. Gushchin, L. Visnapuu  
Summary

The electrification of fibres in the dispersion of fibrous material and in the motion of fibres in an aerodynamical

tube has been studied by means of mathematical models. It has been shown that the formation of bundles of fibres is due to the accumulation of fibres on the walls of the aerodynamical tube while the intercoagulation of oppositely charged fibres does not produce formation of bundles.

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

В.П. Матулявичюс

### I. Условия и данные эксперимента

Эффективность электрофильтра (коэффициент проскока естественных радиоактивных аэрозолей) определялась относительно аспирационного метода. Использовалась фильтровальная ткань ФПП-15, устанавливаемая как в системе регистратора, так и в отдельном фильтродержателе. Это оправдывается тем, что характеристики фильтрующих тканей в настоящее время хорошо изучены и в определенных условиях их можно принять в качестве эталонных.

Меченым аэрозолем служил естественный радиоактивный аэрозоль. Так удалось максимально приблизить условия эксперимента к естественным. Аэрозольные порошки, пары масла, обычно применяемые при исследовании электрофильтров, обладают специфическими характеристиками и поэтому не дают полной картины для оценки их эффективности.

Определение коэффициента проскока производилось при параллельном подключении электрофильтра и аспиратора к насосам в трех аэродинамических режимах:

1. скорости прокачки воздуха в аспирационном регистраторе (или отдельном держателе) и электрофильтре одинаковы;

2. скорость прокачки воздуха в электрофильтре в 1,5 -  
- 1,9 раза больше;

3. скорость прокачки воздуха в электрофильтре в 2,4 -  
- 3,2 раза больше скорости прокачки в регистраторе.

Последовательная цепь протяжки воздуха по схеме "электрофильтр - аспиратор" не применялась, так как с изменением скорости воздушного потока эффект задержки радиоактивных аэрозолей менялся не только в электрофильтре, но и в фильтрующей ткани, при этом затруднялась сравнительная оценка.

В указанных режимах испытывались две модели электрофильтров. Одна из них представляет собой цилиндрическую модель типа ЭФ-2, основные конструктивные данные которой изложены в работе [ 1 ]. Другая модель выполнена в виде плоского конденсатора. На верхней обкладке смонтированы коронирующие иглы. Нижней обкладкой служит съемная металлическая площадка. Направление воздушного потока в этой модели электрофильтра, в отличие от модели ЭФ-2, перпендикулярно коронирующим иглам.

Применение двух систем электрофильтров позволило более наглядно наблюдать влияние электрических и аэродинамических характеристик этих приборов на величину коэффициента проскока аэрозолей.

Некоторые результаты таких испытаний представлены в табл. I. Данные относятся к исследованию модифицированной модели электрофильтра типа ЭФ-2, описанного в работе [ 2 ], в режиме I. Время забора проб 60 мин. В графе 2 табл. I дается объем воздуха, прососанного соответственно через фильтровальную ткань и электрофильтр. В графе 3 указывается максимальное количество импульсов без фона, сосчитанное механическим счетчиком за 10 мин измерения, соответственно для проб, взятых фильтровальной тканью и электрофильтром. В графе 4 приводится величина относительной активности проб - отношение числа импульсов при ткани к числу импульсов при электрофильтре, приведенных к  $1 \text{ м}^3$  воздуха.

Согласно аналогичным экспериментальным данным, полученным при испытании обеих моделей электрофильтров в трех аэродинамических режимах, результат оказался следующим. В режиме I эффективность модифицированной модели электрофильтра ЭФ-2 меньше, чем у фильтрующей ткани в среднем 6,6 раза,

Таблица I

Сравнительная оценка эффективности  
улавливания радиоактивных аэрозолей  
фильтрующей тканью ФП-15 (данные без скобок)  
и электрофильтром ЭФ-2 (данные в скобках)

Номер пробы	Объем воздуха, м <sup>3</sup>	Число импульсов	Отн. акт-ть проб ФП/ЭФ
I	2	3	4
1	8,11 (8,22)	381,3 (38,9)	9,9
2	7,90 (8,09)	263,4 (49,0)	5,5
3	8,24 (8,33)	169,1 (28,6)	6,0
4	8,31 (9,02)	459,0 (47,4)	10,6
5	8,47 (8,74)	731,9 (70,3)	10,8
6	8,29 (8,34)	473,0 (139,4)	3,4
7	8,33 (8,72)	561,7 (94,8)	6,2
8	8,11 (8,25)	684,1 (76,9)	9,0
9	8,26 (8,09)	795,7 (178,4)	4,3
10	8,21 (8,32)	890,0 (134,8)	6,6
11	6,29 (6,22)	135,9 (22,1)	6,1
12	7,76 (7,81)	192,6 (32,7)	6,0
13	8,97 (9,90)	731,1 (125,1)	5,8
14	8,94 (8,91)	610,6 (94,7)	6,4
15	9,27 (9,06)	741,8 (122,3)	5,9
16	9,76 (9,89)	737,9 (128,4)	5,7
17	8,24 (8,27)	557,1 (76,8)	7,3
18	7,92 (7,93)	415,8 (92,6)	4,9
19	7,81 (7,79)	615,4 (107,8)	5,6

а у плоской модели соответственно 12,9 раза. В режимах 2 и 3 соответствующие средние значения составляют: (ЭФ-2) - 13,5 и 21,9; (плоская модель) - 21,2 и 27,3.

Это свидетельствует о том, что эффективность улавливания радиоактивных аэрозолей электрофильтрами в значительной степени зависит от расхода, т.е. от аэродинамических характеристик фильтра.

## 2. Анализ работы электрофильтра, исходя из общих основ электрофильтрации

Осаждению аэрозолей в электрофильтре типа ЭФ-2 способствуют три вектора, направленные перпендикулярно к осадительной мишени: скорость потока воздуха, напряженность электрического поля, скорость электрического ветра.

Для выявления основных факторов, ухудшающих эффективность применяемых нами электрофильтров, произведем оценку некоторых параметров этих устройств.

Зарядка осаждаемых частиц аэрозолей во внешней области униполярного коронного разряда до предельного заряда является важнейшим требованием электрофильтрации. Необходимы наибольшая концентрация ионов в области коронирования и возможные наилучшие условия подзарядки частиц. При этом аэродинамические условия фильтра, естественно, играют тоже важную роль. Весьма наглядную оценку этих факторов попытаемся дать путем рассмотрения экспериментальных данных исследования электрофильтров, приведенных в разделе I. Прежде всего рассмотрим условия зарядки частиц в обоих фильтрах. Для этого будем руководствоваться экспериментально-теоретическими работами [ 3, 4 ], касающимися вопросов электрофильтрации.

Для расчета зарядов, приобретаемых частицами в поле коронного разряда, определим время пребывания частиц в электрофильтре. Расчет произведем для аэродинамических режимов I и 3. Средние скорости прокачки воздуха при этом принимаем равными 8 и 25 м<sup>3</sup>/час. Средний расчетный путь частицы во внешней области короны в фильтре типа ЭФ-2 считаем равным 6 мм, исходя из геометрических параметров коронирования игольчато-

го электрода и учитывая неравномерность результирующего ионного потока, обусловленную взаимодействием ионных лавин отдельных коронирующих электродов.

Средний расчетный путь частицы во внешней области короны в плоской модели электрофильтра с 50-ю коронирующими иглами, расположенными в шахматном порядке, составит 15 мм.

Среднее время пребывания частиц во внешней области коронирующего электрода электрофильтра типа ЭФ-2 в режиме I составляет  $t_1 = 2,1 \cdot 10^{-3}$  сек. В режиме 3  $t_3 = 0,67 \cdot 10^{-3}$  сек; для плоской модели электрофильтра соответственно  $t'_1 = 2 \cdot 10^{-3}$  сек,  $t'_3 = 0,63 \cdot 10^{-3}$  сек.

Средняя скорость движения ионов при температуре  $+20^\circ\text{C}$  и нормальном давлении для электрофильтра с электрическими параметрами, аналогичными применяемым нами,  $v = 0,9 \cdot 10^4$  см/сек [ 3 ]. Результирующая сила коронного тока при этом определяется как  $i = S v N e$ , где  $S$  - площадь мишени (определялась по эффекту осаждения аэрозоля в зоне одной иглы и численно равна  $0,6 \text{ см}^2$ ),  $e$  - элементарный заряд,  $i$  - сила тока коронного разряда при рабочем напряжении 8 кв равна в среднем 380 мка. Отсюда средняя плотность ионов

$$N = \frac{i}{S v e} = 4,4 \cdot 10^{11} \text{ ионов/см}^3.$$

По найденной плотности ионов нетрудно приблизительно определить по кривым зарядки частиц [ 4 ] величину заряда естественного радиоактивного аэрозоля.

Воспользовавшись кривой комбинированной зарядки частиц по теории Капцова, когда зарядка осуществляется под действием сил электрического поля и теплового движения ионов, для частиц с радиусом, равным 1 мкм, найдем, что при плотности ионов  $4,4 \cdot 10^{11}$  ионов/см<sup>3</sup> для получения предельного заряда требуется время  $0,045 \cdot 10^{-3}$  сек. Следовательно, частицы с радиусом более 1 мкм безусловно будут достигать предельного заряда, так как время их пребывания в области короны в нашем эксперименте значительно больше времени, необходимого для получения предельного заряда.

Время обогащения фильтров аэрозолем длилось I час, при скорости прокачки воздуха 130 л/мин. Время экспонирования ядерной фотопластишки А-2 - двое суток.

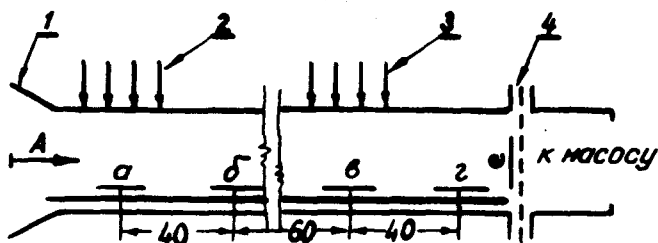


Рис. I. Схема расположения ядерных фотопластинок при исследовании электрофильтров: 1 - корпус плоской модели электрофильтра, 2 - первая группа коронирующих игл, 3 - вторая группа коронирующих игл, 4 - мембранный фильтр, 5 - осадительный электрод.

Схема проведения эксперимента с плоским электрофильтром показана на рис. I. Буквами а, б, в, г, е обозначены места, которые после обогащения электрофильтра аэрозолем приводились в контакт с ядерной фотопластишкой. Стрелкой "А" обозначено направление движения воздуха. В табл. 3 приведены полученные результаты.

Анализируя данные таблицы, видно, что активность осадительного электрода в области "в" (II каскад фильтра) превышает активность области "а" более чем в два раза. Эти вторичные осадения можно объяснить как осадения, происходящие за счет дальнейшей зарядки аэрозоля и удержания уже осевших, но "случных" частиц с I-го каскада электрофильтра.



Численно для частиц с радиусом 1 мкм предельный заряд будет равен 1054 е. Для меньших частиц экспериментально установлено, что величина предельного заряда пропорциональна радиусу, поэтому, принимая заряд частиц с радиусом 0,1 мкм равным 105 е, для частиц с радиусом 0,01 мкм – предельный заряд порядка 10 е. Рассчитаем, какое количество элементарных зарядов, согласно теории Потенье, получают частицы естественных радиоактивных аэрозолей за время пребывания их в области короны в электрофильтрах типа ЭФ-2 и плоской модели при различных режимах работы. Данные расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Заряды частиц естественных радиоактивных аэрозолей, выраженные числом элементарных зарядов

Радиус частиц, мкм	ЭФ-2		Плоская модель	
	I режим	II режим	I режим	II режим
1	1022	959	1022	950
0,1	102	95	102	95
0,01	10	9	10	9

Из приведенных данных видно, что частицы естественных радиоактивных аэрозолей в исследованных нами моделях электрофильтра достигают предельного заряда.

Эффективность электрофильтра любой конструкции в конечном счете определяется совокупностью как электрических, так и аэродинамических его характеристик. Однако для более полного изучения этого вопроса одновременно рассмотрим некоторые детали, касающиеся только электрических или аэродинамических характеристик фильтра, играющих самостоятельную роль и влияющих прямым или косвенным образом на его эф-

**фактивность.**

Как указывает Капцов [ 4 ] , электрическое объяснение принципа электрофильтрации далеко не отображает ряда специфических явлений в электрофильтрах. Нехватает достоверных экспериментальных данных о работе этих устройств.

Осаждение частиц различной природы, формы, несомненно, происходит различно. Существенную роль играет поверхностная проводимость частиц. От этого в конечном счете будет зависеть величина приобретаемого заряда и, наконец, степень удерживания частиц на осадительном электроде.

Так, например, при хорошей проводимости частицы ее заряд быстро стекает и частица может быть легко снесена с электрода потоком газа.

Несомненно, что процесс разрядки частиц будет протекать различно в зависимости от того, попали они на чистый металлический электрод или на электрод, покрытый плохо проводящим слоем.

Количественная детальная оценка этих явлений затруднительна, однако их роль практически ощутима. Скопления неудаляемых на осадительном электроде частиц на различных конструктивных деталях электрофильтров можно заметить даже визуально.

Приведем некоторые данные, полученные в результате применения метода толстослойных ядерных фотопластинок, дающих приблизительную оценку  $\alpha$ -активности вторичных осадений, количественно характеризующих степень сноса радиоактивных частиц с осадительных электродов электрофильтров.

Отметим, что подобная качественная оценка была возможна только путем применения метода  $\alpha$ -радиографии. Одновременное измерение радиоактивности в нескольких точках, расположенных на различных, геометрически неодинаковых деталях электрофильтров, обычными приемами радиометрирования затруднительно. Для этого потребовалось бы снимать маски, применять несколько идентичных радиометров, что привело бы к значительным погрешностям.

Таблица 3

$\alpha$  - активность, выраженная числом треков  
на  $1 \text{ см}^2$  исследуемой поверхности

обл. "а"	обл. "б"	обл. "в"	обл. "г"	обл. "д"
933	638	2000	311	3882

Полученные данные в какой-то мере можно сравнивать с экспериментальными данными исследования плоской модели электрофильтра в режиме I. Так как в последнем случае применена последовательная цепь расположения фильтров, то активность мембранного фильтра принимаем как сумму осадений во всех областях (а, б, в, г, е). Тогда отношение активностей мембранный фильтр/электрофильтр составит 8,4, что немного меньше средней величины, полученной при параллельном подключении аспираторов. Незначительные расхождения могут быть объяснены некоторым различием применяемого фильтрующего материала и меньшей рабочей площадью фильтра (диаметром 32 мм).

Для уменьшения сноса частиц осадительный электрод смазывался вазелином, согласно описанию в работе [ 5 ] . Поверхность электрода покрывалась также тонкими слоями различных изоляционных лаков, трансформаторного, иммерсионного масел. Практически ощутимого увеличения эффективности электрофильтра при этом не достигнуто.

Из краткого рассмотрения некоторых аэродинамических и электрических характеристик двух моделей электрофильтра

можно заключить следующее.

Эффективность захвата естественного радиоактивного аэрозоля электрофильтрами, определяемая коэффициентом проскока, как и волокнистых фильтрующих материалов, в сильной степени зависит от скорости прокачки воздуха. При скорости прокачки воздуха  $8 \text{ м}^3/\text{час}$  и нормальных метеорологических условиях для модифицированной модели фильтра типа ЭФ-2 эффективность составляет 0,16, а плоской модели, обладающей лучшими электрическими характеристиками, - 0,055.

При скорости прокачки воздуха  $23 \text{ м}^3/\text{час}$  эффективность захвата для модифицированной модели фильтра ЭФ-2 составляет 0,032, а для плоской модели - 0,026.

Приведенные численные величины эффективности электрофильтров указывают, что при больших скоростях прокачки воздуха конструктивно выгодно выделяется плоская модель электрофильтра, отличающаяся исключительной простотой устройства.

Основная причина низкой эффективности электрофильтров определяется, видимо, сносом частиц радиоактивного аэрозоля, несмотря на то, что естественный радиоактивный аэрозоль получает в поле коронного разряда предельный электрический заряд.

#### Л и т е р а т у р а

1. Сборник радиохимических и дозиметрических методик. Медгиз, М., 1959.
2. Матулявичюс В.П., Стыро Б.И. Многоканальный регистратор радиоактивности атмосферы, Литовский физ. сб. IУ, I, 1964.
3. Штуккенберг Ю.М., Калугин К.С., Бобков А.И. Электрофильтр для определения концентрации активных аэрозолей. Сб. "Исследования в области дозиметрии ионизирующих излучений". Изд. АН СССР, М., 1957.

4. Капцов Н.А. Коронный разряд. М-Л., 1947.
5. Bergstedt, A. Properties of electrostatic precipitators for the measurement of radioactive aerosols, Int.Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy A (Conf) /8/ P 788, 1955.

**RADIOAKTIIVSE AEROSOO LI SADESTAMISEKS KASUTATUD  
ELEKTROFILTRITE EFEKTIIVSUSEST**

V. Matulevicius

Resüme

Uuriti elektrofiltrite efektiivsust nende kasutamisel loodusliku atmosfääri radioaktiivse aerosooli filtreerimisel erinevates aerodünaamilistes režiimides. Elektrofiltrite efektiivsus on 6,6 kuni 27,3 korda väiksem kui filtermaterjalil FPP samades tingimustes. Andmed, mis puudutavad elektrofiltrite omadusi, on samuti esitatud artiklis.

**ON THE EFFICIENCY OF ELECTROFILTERS USED FOR  
DEPOSITION OF RADIOACTIVE AEROSOLS**

V. Matulevicius

Summary

The efficiency of electrofilters was investigated by adjusting them for the deposition of natural atmospheric radioactive aerosol in various aerodynamic states. The efficiency of electrofilters in the deposition of radioactive aerosols is 6.6 to 27.3 times less than that of the filtering material FPP used for this purpose. The data concerning the properties of electrofilters are also presented in the article.

## К РАСЧЕТУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ С СЕТКОЙ И ВИБРИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ

А.Г. Гросс, В.Д. Возжаев

Преобразователь с вибрирующим электродом, расположенным за металлической сеткой, превращающей однородное электрическое поле в неоднородное, предложен Имянитовым [ 1 ] . Проведенные нами исследования показывают, что при определенных параметрах преобразователя могут быть созданы высокочувствительные малогабаритные и экономичные по питанию измерители электростатических полей. Оптимальными в этом смысле характеристиками обладают такие конструкции преобразователей, у которых расстояние  $x_0$  между осью проволок сетки и вибрирующим электродом в несколько раз меньше шага сетки  $b$  . Этот случай не охватывается расчетами преобразователя [ 2 ] , основанными на теории трехэлектродных электронных ламп [ 3-5 ] , ограниченной областью  $b/x_0 \leq 2$  , и поэтому требует самостоятельного рассмотрения. Ниже будет показано, что при упомянутых выше параметрах измерителя наибольшим коэффициентом преобразования обладают конструкции преобразователей, удовлетворяющих условию

$$4 < b/x_0 < 7. \quad (1)$$

Принципиальная схема преобразователя, представляющего собой разновидность "электрического генератора" [ 6 ] , приведена на рис. 1, на котором штриховкой помечена область возможных положений электрода 3 в процессе колебаний с амплитудой  $\Delta x$  .

### 1. Расчет потенциала вибрирующего электрода.

Для определения напряженности поля  $E$  у поверхности виб-

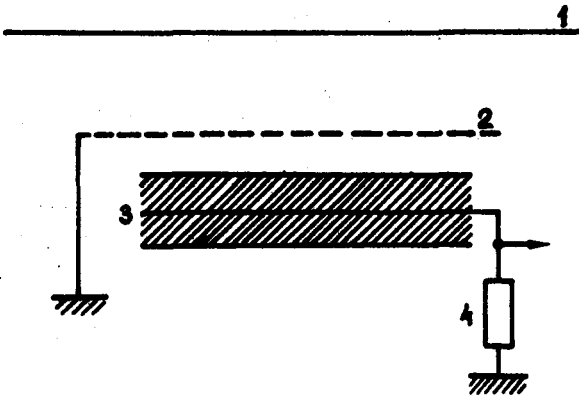


Рис. 1. Принципиальная схема преобразователя.

- 1 - источник поля,
- 2 - сетка из параллельных проволок,
- 3 - вибрирующий электрод,
- 4 - сопротивление  $R$  нагрузки преобразователя.

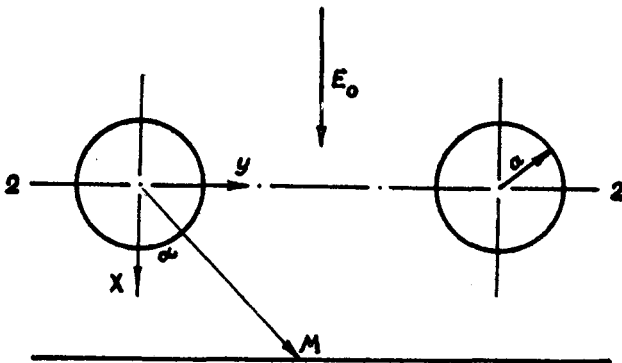


Рис. 2. Цифровые обозначения те же, что и на рис. 1.

вибрирующего электрода воспользуемся уравнением Лапласа  $\nabla\varphi=0$ , решение которого дает

$$E = E_0 \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $a$  - радиус проволоки,  $r$  - радиус-вектор точки наблюдения  $M$  (см. рис. 2).

Учитывая, что поверхность вибрирующего электрода эквипотенциальна, напряженность поля у поверхности может быть описана формулой

$$E = \frac{E_0 n}{n-1} \left( \frac{b}{\sqrt{x^2 + b^2} \arcsin \frac{b}{\sqrt{x^2 + b^2}}} - \frac{2a}{\sqrt{x^2 + 4a^2} \arcsin \frac{2a}{\sqrt{x^2 + 4a^2}}} \right), \quad (3)$$

полученной интегрированием (2) в пределах шага сетки при условии, что  $E=0$ , когда  $b=2a$ , так как сетка при этом полностью экранирует вибрирующий электрод. Здесь  $n$  - число проволок, а  $n-1$  - число шагов сетки.

С целью упрощения дальнейших расчетов и принимая во внимание условие (1), заменим в (3)  $x$  на  $x_0$ , что внесет ошибку не более одного процента. Тогда выражение потенциала поверхности вибрирующего электрода можно записать в виде

$$\varphi = -\frac{E_0 n}{n-1} \left( \frac{b}{\sqrt{x_0^2 + b^2} \arcsin \frac{b}{\sqrt{x_0^2 + b^2}}} - \frac{2a}{\sqrt{x_0^2 + 4a^2} \arcsin \frac{2a}{\sqrt{x_0^2 + 4a^2}}} \right) \cdot dx + A, \quad (4)$$

где  $A$  - постоянная интегрирования, которая определяется из условия  $\varphi=0$  при  $x=a$ . Поэтому

$$\varphi = -\frac{E_0 n}{n-1} \gamma(x-a), \quad (5)$$

где

$$\gamma = \frac{b}{\sqrt{x_0^2 + b^2} \arcsin \frac{b}{\sqrt{x_0^2 + b^2}}} - \frac{2a}{\sqrt{x_0^2 + 4a^2} \arcsin \frac{2a}{\sqrt{x_0^2 + 4a^2}}} \quad (6)$$

имеет смысл коэффициента перераспределения индуцированного заряда между сеткой и вибрирующим электродом.



Полагая  $n \approx n-1$ , можем написать

$$\varphi = -E_0 \gamma (x-a). \quad (7)$$

Примем, что при колебании электрода

$$x = x_0 + \Delta x \cos \omega t, \quad (8)$$

и тогда для выражения потенциала получим

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta \varphi \cos \omega t, \quad (9)$$

где

$$\varphi_0 = -E_0 \gamma (x-a), \quad (10)$$

$$\Delta \varphi = -E_0 \gamma \Delta x. \quad (11)$$

## 2. Решение уравнения колебательного процесса преобразователя.

Это уравнение имеет вид:

$$\varphi_0 + \Delta \varphi \cos \omega t - \frac{q}{C_0 + \Delta C \cos \omega t} = R \frac{dq}{dt}, \quad (12)$$

где  $q$  - мгновенное значение заряда на вибрирующем электроде.

Первые два члена в левой части означают потенциал поверхности электрода 3, создаваемый измерительным полем  $E_0$ . Третий член выражает собой потенциал электрода 3, обусловленный натеканием на него или стеканием зарядов в процессе колебания с амплитудой колебаний  $\Delta x < x_0 - a$  при изменяющейся емкости

$$C = C_0 + \Delta C \cos \omega t.$$

Правая часть уравнения представляет собой падение напряжения на сопротивлении  $R$  нагрузки преобразователя.

Решением уравнения (12) является функция

$$q = \frac{\varphi_0}{R\omega} - \frac{\Delta \varphi}{R\omega} \left( \beta^2 \sin \omega t + \beta \cos \omega t \right) + B e^{-\frac{\omega t}{\beta}}, \quad (13)$$

где

$$\beta = RC_0 \omega \left( 1 + \frac{\Delta C}{C_0} \right). \quad (14)$$

Дифференцируя эту функцию по  $t$ , принимая, что при  $t=0$  напряжение  $U$  на выходе преобразователя равно нулю и произведя некоторые тригонометрические преобразования, получим

$$U = \Delta\varphi \beta \sqrt{1 + \beta^2} \sin(\omega t - \delta) - \Delta\varphi \cdot e^{-\frac{\omega t}{\beta}}, \quad (15)$$

где

$$\delta = \arcsin \frac{\beta}{\sqrt{1 + \beta^2}} \quad (16)$$

начальная фаза колебания первой составляющей сигнала  $U$ .

### 3. Анализ выражения сигнала преобразователя и сопоставление с экспериментом.

Из выражений (II), (14), (15) видно, что напряжение на выходе преобразователя пропорционально напряженности  $E_0$  измеряемого поля, амплитуде  $\Delta x$  колебаний электрода 3 и коэффициенту  $\gamma$  распределения зарядов между сеткой и вибрирующим электродом.

При малых значениях параметра  $\beta$ , например, при  $\beta \ll 0,1$ , вторым членом в (16) можно пренебречь и тогда сигнал преобразователя пропорционален величине  $\beta$ , т.е. частоте  $\omega$ , сопротивлению нагрузки  $R$  и емкости  $C_0$ . Последняя пропорциональна площади преобразователя и может быть представлена эмпирической формулой

$$C_0 = \frac{6,9 \cdot 10^{-12} D^2 \left( 1 + \frac{a}{x_0} \right)}{x_0 + b \frac{a}{2x_0}}, \quad (17)$$

где  $D$  - диаметр электрода 3, выполненного в виде диска.

В этом выражении и в дальнейшем все величины выражены в системе СИ. Из (17) можно найти приращение емкости, входящее в (14),

$$\Delta C = 13,8 \cdot 10^{-12} D^2 \frac{ab - 4ax - 2x^2}{(2x_0^2 + ab)^2} \Delta x. \quad (18)$$

С ростом параметра  $\beta$  от 0,1 до 1 вклад второго члена в выражении (15) возрастает до 35 %, а затем снова убывает и при  $\beta > 10$  составляет менее 1 %. При этом  $\delta$  монотонно возрастает от  $5,8^\circ$  при  $\beta = 0,1$  до  $90^\circ$  при  $\beta > 10$ .

Подстановкой (11), (17), (14) в (15) можно найти максимум  $\mathcal{U}$  в зависимости от шага сетки  $b$ . Он обеспечивается при  $b/x_0 = 5$ . При дальнейшем увеличении этого отношения  $\mathcal{U}$  уменьшается, но медленнее, чем при уменьшении  $b$  до  $b/x_0 < 2$ . Исследование выражения (6) показывает, что максимум  $\mathcal{U}$  в функции  $a$  достигается при  $a = x_0/4$ .

Из приведенного анализа видно, что наиболее интересным в практическом отношении является режим работы преобразователя, при котором  $\beta \leq 0,1$ , так как при этом получаются наименьшие нелинейные и фазовые искажения сигнала датчика. В связи с этим в табл. I приведены данные расчета преобразователя, работающего в этом режиме и имеющего параметры:  $a = 1 \cdot 10^{-4}$  м;  $x_0 = 3 \cdot 10^{-4}$  м;  $\Delta x = 6 \cdot 10^{-5}$  м;  $R = 2,2 \cdot 10^6$  ом и частоту  $f = 330$  гц.  $E_0 = 1,5 \cdot 10^3$  в/м,  $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$  м.

Таблица I

$b, \text{ м}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-4}$	$21 \cdot 10^{-4}$
$b/x_0$	1	3	5	7
$\mathcal{U}, \text{ в}$	$377 \cdot 10^{-6}$	$1140 \cdot 10^{-6}$	$1300 \cdot 10^{-6}$	$560 \cdot 10^{-6}$

Для проверки результатов расчета было изготовлено несколько макетов преобразователей с сетками, выполненными из обычной металлической проволоки и полученными методом фотохимического травления из металлической фольги. Во всех случаях величина  $\mathcal{U}$  преобразователя изменялась строго пропорци-

онально измеряемой напряженности поля и при  $\beta \leq 0,1$  в пределах ошибок эксперимента подчинялась уравнению (15).

Для иллюстрации сказанного в табл. 2 приведены данные сопоставления расчета с экспериментом для преобразователя, имеющего указанные выше параметры при том же значении  $E_0$ ,  $b = 12,5 \cdot 10^{-4}$  м и изменяющемся  $x_0$ .

Таблица 2

$x_0$ , м	$U$ расч., в	$U$ экспер., в	$\Delta U/U$
$3 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-3}$	-0,05
$4 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$0,97 \cdot 10^{-3}$	0,06
$5 \cdot 10^{-4}$	$0,76 \cdot 10^{-3}$	$0,65 \cdot 10^{-3}$	0,14

Для проверки выражения (15) при  $\beta > 0,1$  был проведен эксперимент с тем же преобразователем при  $b = 12,5 \cdot 10^{-4}$  м,  $x_0 = 3,0 \cdot 10^{-4}$  м и  $E_0 = 5 \cdot 10^4$  в/м при различных сопротивлениях нагрузки, результаты которого приведены в табл. 3. В 3 и 4 столбцах таблицы приведены расчетные и экспериментальные значения сдвига фаз, а в столбце 7 относительная ошибка измеренного и вычисленного значения сигнала преобразователя. Имеющиеся расхождения между расчетными и измеренными значениями объясняются, в основном, ошибками при определении параметров преобразователя и наличием дополнительной емкости входной цепи усилителя.

В целом, как видно из таблицы, соответствие теории и эксперимента удовлетворительное.

#### 4. Выводы.

1. Дан метод расчета преобразователя электростатического поля с экранирующей сеткой и вибрирующим электродом.

2. На основании проведенного анализа выявлены оптимальные соотношения размеров элементов преобразователя.

3. Получено экспериментальное подтверждение основных расчетных соотношений.

Таблица 3

R, мм	$\beta$	$\delta_{расч.}^0$	$\delta_{эксп.}^0$	$U_{расч.}$ В	$U_{эксп.}$ В	$\Delta U/U$
0,5	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0,17	1,0	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	0,04
1,2	$3,2 \cdot 10^{-2}$	2,0	6	$18,8 \cdot 10^{-3}$	$18,4 \cdot 10^{-3}$	0,02
5,0	0,13	8,0	18	$78 \cdot 10^{-3}$	$58 \cdot 10^{-3}$	0,27
10,0	0,26	15	24	$142 \cdot 10^{-3}$	$106 \cdot 10^{-3}$	0,25
42,0	1,08	52	60	$630 \cdot 10^{-3}$	$530 \cdot 10^{-3}$	0,16

В заключении авторы благодарят В.Л. Тиховидова и В.А. Царева за предоставление данных проведенных экспериментов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Имянитов И.М. Устройство для измерения напряженности электрического поля. Авт. св. № 90151. "Бюллетень изобретений", 1951, № 4.
2. Шварц Я.М., Андреева С.И., Бородулина В.Г. Возможности и опыт создания электростатического флюксметра вибрационного типа. Атмосферное электричество, Труды ГГО, 1967, вып. 204.
3. Шпангенберг К.Р. Электронные лампы (перевод с англ.). Советское радио, 1953, т. I.

4. Лукошков В.С. Моделирование источников поля в электрической ванне при решении задач математической физики. "Электроника", 1958, № 7.
5. Кацман Д.А. Электронные лампы для высоких и низких частот. Госэнергоиздат, 1961, 147.
6. Имянитов И.М. Приборы для измерения напряженности электрического поля и их применение. "Журнал технической физики", 1949, 19, 1020.

#### VÕRE JA VIBREERIVA ELEKTROODIGA ELEKTROSTAATILISE VÄLJA MUUNDI ARVUTUSEST

L. Gross, V. Voszajev  
Resümees

Artiklis on esitatud ekraneeriva võre ja vibreeriva täismetallist elektroodiga muundi arvutusmeetod. On leitud muundi elementide mõõtmete ja nende paigutuse vahelised optimaalsed suhted, mis tagavad muundi väikeste mõõtmete korral küllalt kõrge muundusteguri. On näidatud, et muundustegur on maksimumaalne, kui võresammu ja traatide keskpunktide ning täismetallist elektroodi vahelise kauguse suhe on 4-7. Saadud arvutustulemusi kinnitavad katseandmed, mistõttu neid võib soovitada tehnilisteks arvutusteks.

#### ON THE CALCULATION OF ELECTROSTATIC FIELD TRANSFORMER WITH GRID AND VIBRATING ELECTRODE

L. Gross, V. Voszhayev  
Summary

The present article discusses a calculation method of the transformer with a screening grid and a metallic vibrating electrode. Optimum correlations between the sizes and the

arrangement of transformer elements providing a high enough factor of transformation at its small dimensions have been determined. In particular it is shown that the greatest factor of transformation in this case may be obtained when the ratio of the grid pitch to the distance between the wire axes and the surface of the electrode ranges from 4 to 7. The estimation expressions obtained are in agreement with the experimental data and may be recommended for engineering calculations.

## ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. В. Бичевин

Описан гибридный электрометрический усилитель с входным каскадом на лампе ЭМ-4 и автогенераторным резонансным усилителем постоянного тока. В схеме применена 100% отрицательная обратная связь (ООС).

В литературе описано много различных схем электрометрических усилителей с входными каскадами на электрометрических лампах и имеющие ООС [1 - 4].

Ввиду того, что эти схемы нуждаются в дополнительных усилителях, которые ранее выполняли на электронных лампах и с появлением транзисторов - на последних, в настоящей работе описан, главным образом, т.н. автогенераторный усилитель постоянного тока, пригодный для усиления тока электрометрической лампы.

Описанная схема предназначена в основном для усиления фототоков, но это не исключает возможности ее применения для измерения слабых токов вообще и тока аэроионов в частности [5].

Усилитель состоит из электрометрического входного каскада на лампе ЭМ-4 (рис. I) с входными сопротивлениями  $R_1 - R_3$ , модулятора по схеме автогенератора на транзисторе  $T_1$  (IT 308B), резонансного усилителя (465 кГц) на транзисторах  $T_2, T_3$  (оба IT 308B), демодулятора со смещением ( $L_6, C_{11}, D_2, R_{24}, R_{25}$ ) и блока питания.

Питающее схему напряжение стабилизировано стабилитроном Д813 (14 в), что возможно благодаря относительно малому потреблению тока всей схемой - примерно 30 ма.



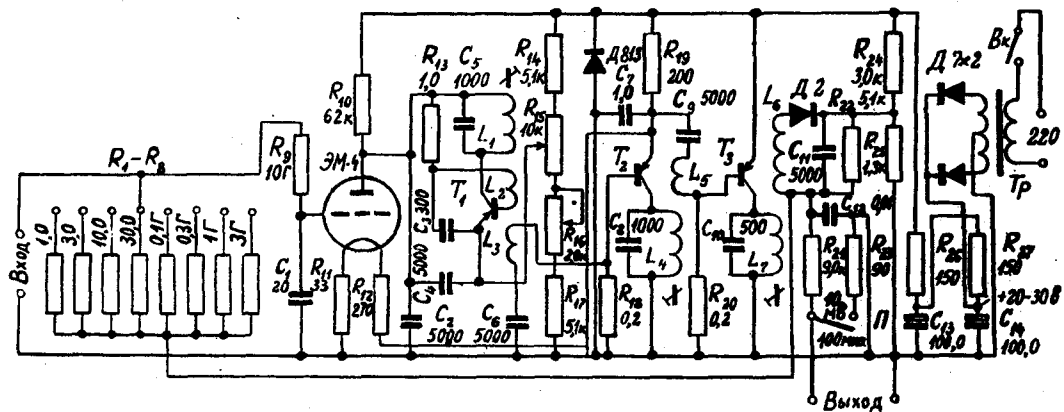


Рис. I.

Принципиальная схема усилителя.

Входной каскад выполнен по общепринятой для усилителей с ООС схеме, за исключением фильтра  $R_9C_1$ , предназначенного для уменьшения разного рода наводок, поступающих на вход усилителя.

Наиболее интересной частью схемы является модулятор, выполненный по схеме автогенератора, оптимизированного на генерацию при минимальном потребляемом токе -  $3\div 5$  мка при напряжении  $0,15-0,2$  в.

После установки нуля ( $R_{15}$  - грубо,  $R_{16}$  - плавно) в модуляторе установившийся уровень колебаний будет таким, что он, увеличенный усилителем переменного тока и предтктированный, даст на сопротивлении  $R_{22}$  постоянную составляющую, равную падению напряжения на  $R_{25}$ . Ввиду того, что эти напряжения противоположны, величина напряжения отрицательной обратной связи ( $U_{ООС}$ ) будет равной нулю. Как видно из схемы,  $U_{ООС}$  поступает на вход схемы через измерительные сопротивления  $R_1 - R_8$  и на выход ( $R_{21}, R_{23}$ ).

При входном токе положительной полярности, например, через  $R_1$ , ток через модулятор и напряжение на  $R_{22}$  увеличиваются и установившееся значение  $U_{ООС}$ , отрицательное по полярности, будет близко к падению напряжения на  $R_1$ .

При входном токе отрицательной полярности падение напряжения на  $R_{22}$  уменьшается и  $U_{ООС}$  становится положительным по полярности.

Таким образом,  $U_{ООС}$  по полярности и по величине прямо связано с измеряемым током.

Регистрация выходного тока усилителя возможна микроамперметром (100 мка, 1 ком) при положении переключателя в положении "100 мка" или самописцем (10 мв) в положении переключателя "10 мв". При указанных на схеме значениях  $R_{21}$  и  $R_{23}$  входное напряжение, соответствующее максимальному выходному (100 мка или 10 мв), равно 1 в.

На рис. 2 приведены эволюция нулевого тока после включения прибора /I/ и стабильность показаний при-

бора при входных токах  $-2 \cdot 10^{-9}$  а /2/ и  $+2 \cdot 10^{-9}$  а /3/.

Как видно из рисунка, дрейф нулевого тока, а также изменение показаний во времени вполне позволяют увеличить чувствительность по входу до 0,3 в, а в специальных случаях еще больше. Для этого следует лишь рассчитать величину сопротивлений  $R_{21}$ ,  $R_{23}$  с учетом сопротивления микроамперметра.

В случае чувствительности по входу в 0,3 в  $R_{21}$  следует взять равным 2 ком при сопротивлении микроамперметра в 1 ком и  $R_{23}=69$  ом.

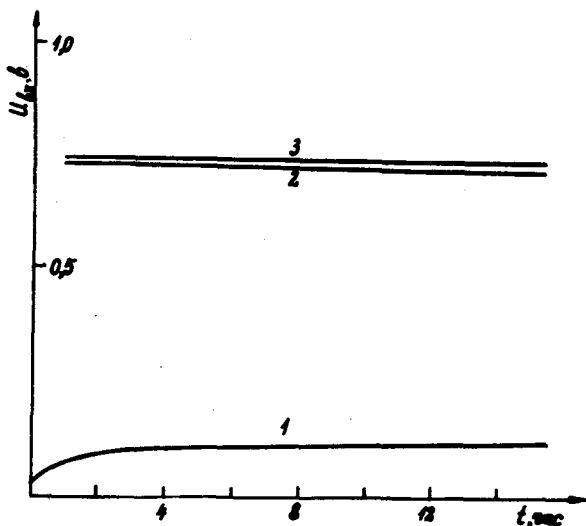


Рис. 2.

эволюция нулевого тока (1) и стабильность показаний (2, 3) прибора.

## Л и т е р а т у р а

1. Устинова Л.Б. "Приборы и техника эксперимента", 1961, №4, 3.
2. Бомч-Бруевич Л.М. Радиотехника в экспериментальной физике. М., 1966.
3. Паршин А.В., Устинова Л.Б. "Приборы и техника эксперимента", 1964, №3, 102.
4. Электрометрический усилитель постоянного тока УИ-2. Техническое описание. Л., 1965.
5. Таммет Х.Ф. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1967, вни. 195.

### ELEKTROMEETRILINE ALALISVOOLU VÕIMENDI

V. Bitševin

Resümees

Vaadeldud hübrid - elektromeetriline alalisvoolu võimendi 100%-lise negatiivse tagasisidega võimaldab mõõta nii positiivseid kui ka negatiivseid voolu suurusega  $10^{-10}$  -  $10^{-6}$  A. Võimendi on küllaltki kompaktne (üks elektromeetriline lamp EM-4 ja kolm transistorit) ja ökonoomne. Peale esialgset võtendamist elektromeetrilisel lambil sisendsignaali moduleeritakse 465 kHz-se sagedusega ja võimendatakse resonantsvõimendis ning seejärel demoduleeritakse. Väljundsignaali võib registreerida kas mikroampermeetriga (100  $\mu$ A, 1 k $\Omega$ ) või isegi isekirjutava potentiomeetriga (10 mV).

## ELECTROMETRIC DC AMPLIFIER

V. Bichevin

### Summary

The discussed hybrid - an electrometric d.c. amplifier with a 100 per cent feedback - makes it possible to measure positive as well as negative currents ranging from  $10^{-10}$  to  $10^{-6}$  A. The amplifier is rather small-sized (one electrometer valve EM-4 and three transistors) and economical. After preliminary amplification the input signal of the electrometer valve is modulated at a frequency of 465 kHz and amplified in the resonance amplifier and then demodulated. The output signal can be recorded by a microammeter (100  $\mu$ A, 1 k $\Omega$ ) or by a self-recording potentiometer (10 mV).

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ,  
ИСПОЛЪЗУЕМОГО В ОСЦИЛЛЯЦИОННОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ РАЗМЕРОВ  
И ЗАРЯДОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

М.М. Фишер, А.А. Мирме

Использованные обозначения:

- $r$  - радиус аэрозольной частицы;  
 $r_0, r_{max}$  - минимальный и максимальный радиусы исследуемых частиц;  
 $r_k$  - верхняя граница  $k$ -го промежутка радиусов;  
 $i$  - общее число частот электрического поля, используемых в устройстве;  
 $f$  - частота электрического поля;  
 $f_k$  - частота, используемая в  $k$ -м промежутке радиусов;  
 $\gamma, m$  - плотность и масса частицы;  
 $\gamma'$  - плотность газообразной фазы аэрозоля;  
 $\eta$  - динамическая вязкость среды;  
 $\lambda$  - средняя длина свободного пробега молекул газа;  
 $A$  - числовой коэффициент,  $A = 0,873 [ I ]$ ;  
 $h$  - высота поля зрения фотографической системы;  
 $n$  - число полных колебаний, совершаемых частицей в поле зрения;  
 $V_y$  - скорость падения частицы под действием силы тяжести;  
 $g$  - ускорение силы тяжести;  
 $q$  - заряд аэрозольной частицы;  
 $q_0, q_{max}$  - минимальный и максимальный заряды частиц;

- $q_{k,m}$  - верхняя граница  $m$ -го промежутка зарядов;
- $j$  - число промежутков зарядов;
- $D$  - двойная амплитуда колебаний частиц в направлении электрического поля;
- $E$  - напряженность электрического поля;
- $p$  - отношение  $n_{max}/n_{min}$  ;
- $d$  - отношение  $D_{max}/D_{min}$  .

### Введение

В последнее время разработан целый ряд методов определения размеров и зарядов частиц аэрозоля. Несмотря на это, будет не лишним остановиться на уже давно известном методе измерения, а именно на вопросах, связанных с осцилляционным методом измерения, поскольку он обладает высокой разрешающей способностью и является одним из самых точных методов одновременного определения зарядов и размеров аэрозольных частиц.

Некоторое уменьшение интереса к осцилляционному методу, по-видимому, объясняется тем обстоятельством, что обработка информации, получаемой от измерительного устройства для нахождения распределения частиц дисперсной фазы аэрозоля, очень велика по объему. Также до сих пор отсутствуют алгоритмы нахождения оптимальной конструкции устройств, работающих на осцилляционном методе.

Целью настоящей работы является нахождение формул для определения оптимальных значений частоты и напряженности переменного электрического поля в соответствии с требованиями к устройству со стороны экспериментатора.

Проблема оптимальной формы электрического поля уже рассматривалась ранее [ 2 ] , и на ней останавливаться не будем. Отметим только, что оптимальная напряженность электрического поля выбрана в предположении использования прямоугольного симметричного импульса, который является наи-

лучшим с точки зрения чувствительности по заряду.

$$E(t) = \begin{cases} E, & \text{если } k/f \leq t \leq (2k+1)/2f, \\ -E, & \text{если } (2k+1)/2f \leq t \leq (k+1)/f, \end{cases}$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$

Также предполагается, что величина заряда частицы определяется по ее двойной амплитуде  $D$  колебаний в направлении электрического поля [ 3 ]:

$$q = \frac{D m \alpha^2}{2E \ln \operatorname{ch}(\alpha/4f)}, \quad (I)$$

где  $m = \frac{4}{3} \pi r^3 \gamma$  и

$$\alpha = \begin{cases} \frac{6\pi\eta r}{m} & \text{в области действия закона Стокса,} \\ \frac{6\pi\eta r^2}{m(r+\Lambda\lambda)} & \text{в области действия закона Кенингема.} \end{cases}$$

#### Выбор оптимальных частот электрического поля

Здесь покажем, как найти оптимальные значения частот электрического поля, необходимых для измерения частиц, относящихся к интересующей нас области радиусов ( $r_0, r_{\max}$ ).

От частоты электрического поля, высоты поля зрения измерительного устройства и скорости падения частицы зависит число полных колебаний, совершаемых частицей за время нахождения в поле зрения фотографирующей системы:

$$n = \frac{fh}{V_y}. \quad (2)$$



Чтобы по фотографии можно было определить заряд частицы по формуле (I), частица за время нахождения в поле зрения должна совершить по крайней мере одно полное колебание, т.е. должно быть выполнено требование

$$n_{\min} > 1.$$

Анализ формулы (I) показывает, что в первом приближении  $D \sim 1/f$ . Отсюда видим, что с точки зрения чувствительности по заряду более выгодно использовать минимальную возможную частоту, при которой  $n = 1$ .

Такой выбор частоты электрического поля возможен только при исследовании монодисперсного аэрозоля. В случае полидисперсного аэрозоля это привело бы к необходимости проводить измерения при бесчисленном множестве различных частот.

Чтобы для нахождения законов распределения объем необходимых измерений был возможно меньше, мы должны некоторую часть аэрозольных частиц измерить на частотах, при которых они за время нахождения в поле зрения совершают более одного полного колебания. Как велико может быть  $n_{\max} > 1$ , это зависит в каждом конкретном случае от задачи, поставленной экспериментатором. Если нужно измерить частицы с относительно малым удельным зарядом,  $n_{\max}$  не должно быть очень большим; в противном случае оно может быть значительно больше единицы.

Таким образом, задача нахождения оптимальных частот состоит в следующем. Область радиусов ( $r_0, r_{\max}$ ), в зависимости от значения  $p$ , следует выбором частот  $f_k$  ( $k=1, 2, \dots, i$ ) разделить на  $i$  промежутков измерения ( $r_{k-1}, r_k$ ), так чтобы при каждой частоте  $f_k$  частицы размером  $r_{k-1}$  за время нахождения в поле зрения совершали  $n_{\max}$ , а частицы с размером  $r_k$   $n_{\min}$  полных колебаний. Также необходимо в соответствии с выбранными частотами определить границы промежутков измерения  $r_k$ . Число необходимых частот  $i$  минимально, если промежутки измерения не перекрываются, т.е.  $r_k$  является верхней границей  $k$ -го промежутка и нижней границей  $(k+1)$ -го промежутка измерений. Оказывается, что этим

условиям удовлетворяют частоты

$$f_k = p^{k-1} f_1, \quad (3)$$

где частоту первой области измерения можно найти из формулы (2):

$$f = \frac{n_{\max} V_{y0}}{h}. \quad (4)$$

Здесь  $V_{y0}$  - скорость падения минимальной частицы ( $r = r_0$ ).

а) В области применимости закона Стокса скорость падения частицы

$$V_y = \frac{2g(r-r')r^2}{9\eta}.$$

Оказывается, что здесь и границы промежутков измерения представляют собой элементы геометрической прогрессии

$$r_k = p^{k/2} r_0. \quad (5)$$

б) В области применимости закона Кенингтама скорость падения частицы

$$V_y = \frac{2g(r-r')r(r+A\lambda)}{9\eta}. \quad (6)$$

Здесь границы промежутков измерения можно определить по формуле

$$r_k = (a^2 + bp^k)^{1/2} - a, \quad (7)$$

где

$$a = \frac{A\lambda}{2}, \quad b = \frac{9\eta f_1 h}{2g(r-r') n_{\max}}.$$

Число необходимых частот  $i$  можно оценить при помощи условия

$$r_{\max} = r_i . \quad (8)$$

В области применимости закона Стокса из (5) и (8) получим, что

$$i \approx 2 \frac{\ln(r_{\max}/r_0)}{\ln p} . \quad (9)$$

### Выбор оптимальных напряженностей электрического поля

Частицы аэрозоля могут нести электрические заряды, относящиеся к очень широкой области зарядов ( $q_0, q_{\max}$ ). Величина отношения  $q_{\max}/q_0$  в зависимости от ширины области исследуемых радиусов ( $r_0, r_{\max}$ ), вещества дисперсной фазы аэрозоля и механизма зарядки частиц может быть очень большой. Ясно, что в случае полидисперсного аэрозоля при одинаковой напряженности электрического поля невозможно определить заряд частиц даже монодисперсного аэрозоля, не говоря уже о полидисперсном аэрозоле. Поэтому и при нахождении оптимальных значений напряженности электрического поля необходимо разделить область зарядов исследуемых частиц ( $q_0, q_{\max}$ ) на промежутки измерения так, что при использовании одних определенных значений напряженности  $E_{k,m}$  и частоты  $f_k$  электрического поля можно измерить те частицы, размеры которых относятся к промежутку ( $r_{k-1}, r_k$ ), а заряды к определенному промежутку зарядов.

Чтобы заряды частиц были с необходимой точностью определены по измеренному с фотограммы  $D$ , двойная амплитуда колебаний частиц должна оставаться в определенных границах между  $D_{\min}$  и  $D_{\max}$ . Величина  $D_{\max}$  непосредственно зависит от ширины поля зрения фотографической системы, выбор вели-

чины  $D_{\min}$  зависит от параметров как осветительной, так и фотографической системы, а также от того, какая точность необходима при измерении  $D$ . Выбор значений напряженности электрического поля и границ промежутков зарядов можно считать оптимальным только в том случае, когда отдельные пределы измерения не перекрываются.

Для решения поставленной задачи в первом приближении сделаны следующие упрощения.

а) Использован закон Стокса и в той области, где закон Кенингема точнее. Поэтому всюду принято  $r_k = p^{k/2} r_0$  и  $\alpha = 6\pi\eta r/m$ .

б) Функция  $\ln \operatorname{ch}(\alpha/4f)$  в формуле (I) заменена ее аргументом  $\alpha/4f$ . Как показывает простой анализ, такая замена при больших значениях аргумента вполне допустима. При  $x > 70$  замена  $\ln \operatorname{ch} x \rightarrow x$  дает ошибку, не превышающую 1%.

При таких упрощениях на основании формулы (I) получаем, что

$$D \sim \frac{qE}{rf} \quad (10)$$

Отдельные пределы измерения не перекрываются только в том случае, когда их пограничными линиями являются  $r=r_k = \text{const}$  и  $D = D_{\max} = \text{const}$ . Притом линия верхней границы  $D = D_{\max}$  каждого предела должна быть и линией нижней границы  $D = D_{\min}$  следующего предела измерения. Если дополнительно потребовать еще то, чтобы линии  $D = \text{const}$  были непрерывны во всей области ( $r_0, r_{\max}$ ), то по формуле (10) нетрудно установить, что искомые значения напряженности электрического поля должны удовлетворять

$$E_{k,m} = E_{00} (p^k/d^m), \quad (11)$$

а узлы сетки формуле

$$q_{k,m} = p^{k/2} d^m q_{00}. \quad (12)$$

Сказанное иллюстрируется рис. I, а.

Если не требовать непрерывности линий  $D = \text{const}$ , то можно, выбрав

$$E_{k,m} = E_{00} \left( p^{3k/2} / d^m \right), \quad (13)$$

добиться того, что узлы сетки удовлетворяют формуле

$$q_{k,m} = \begin{cases} d^m q_{00} p^{1/2} & \text{при } E_{k,m} \text{ и } f_k \\ d^m q_{00} & \text{при } E_{k+1,m} \text{ и } f_{k+1} \end{cases} \quad (14)$$

Это показано на рис. I, б.

В общем случае, когда строго заданы нужные значения  $p$  и  $d$ , для измерения всех частиц  $i \times j$  различных значений  $E_{k,m}$ . Если в формуле (II) можно выбрать  $p = d$  или в формуле (13)  $d = p^{3/2}$ , то потребуются гораздо меньше различных значений  $E_{k,m}$ , так как в этих случаях

$$E_{k+1,m+1} = E_{k,m} = E_{k-1,m-1}.$$

#### Числовой пример

Пусть имеется измерительное устройство, высота поля зрения фотографической системы которого  $h = 2 \cdot 10^{-3}$  м. Пусть нас интересуют частицы в промежутке радиусов  $r_0 = 0,3$  мкм,  $r_{\text{max}} = 15$  мкм,  $\gamma = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Так как с помощью триггеров очень легко получить частоты, которые относятся как  $2^k$ , выберем  $p = 2$  ( $n_{\text{min}} = 1,5$ ;  $n_{\text{max}} = 3$ ).

Приступим к нахождению необходимых частот и границ промежутков радиусов. Так как сопротивление среды, действующее на частицу  $r_0$ , можно точнее вычислить по закону Кенингема, то с помощью формул (4) и (6) найдем

$$f_1 = \frac{2 n_{\text{max}} g (\gamma - \gamma') r_0 (r_0 + A \lambda)}{9 \eta h} \approx 0,02 \text{ гц}.$$

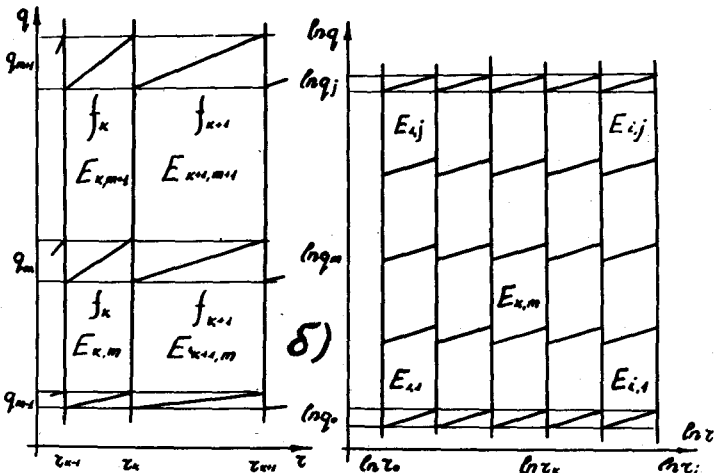
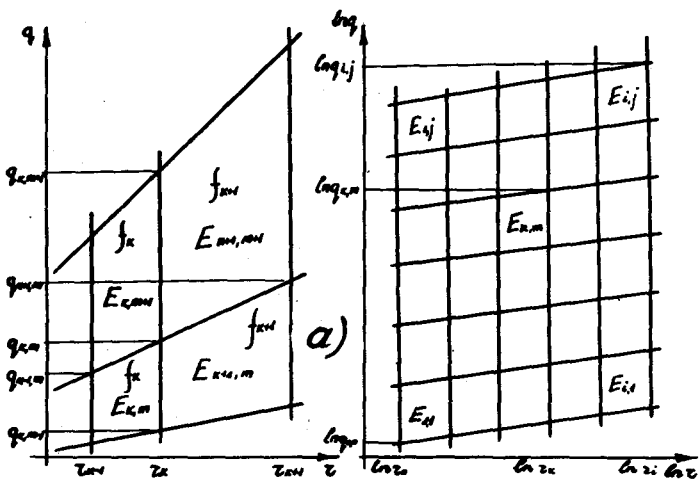


Рис. 1. Пределы измерения в декартовых и логарифмических координатах для двух разных случаев выбора напряженности электрического поля: а - согласно формуле (II), б - согласно формуле (I3).

Из формулы (3) получим

$$f_k = 2^{k-1} f_1 = 2^k \cdot 10^{-2} \text{ гц.}$$

Число необходимых частот  $i$  по формуле (9) равно

$$i \approx 2 \frac{\ln 30}{\ln 2} \approx 11,5.$$

Таким образом, максимальная необходимая частота

$$f_{\max} = 2^{11} \cdot 10^{-2} \text{ гц} = 20,48 \text{ гц.}$$

По формуле (7) находим границы промежутков радиусов:

$$\begin{aligned} r_0 &= 0,307; & r_1 &= 0,444; & r_2 &= 0,639; \\ r_3 &= 0,915; & r_4 &= 1,30; & r_5 &= 1,86; \\ r_6 &= 2,64; & r_7 &= 3,74; & r_8 &= 5,30; \\ & & & & r_9 &= 7,51 \text{ мкм.} \end{aligned}$$

Для частиц  $r \geq 8$  мкм более точным является закон Стокса. По формуле (5) получим далее  $r_{10} = \sqrt{2} r_9 = 10,6$  и  $r_{11} = 15,0$  мкм.

Приступим теперь к определению границ промежутков зарядов и необходимых значений напряженности поля. Пусть  $q_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  к. Из формулы (14) найдем  $q_{k,m}$ .

Чтобы число значений напряженности поля было минимальным, возьмем  $d = 2\sqrt{2}$ , т.е.  $d = p^{3/2}$ . В этом случае соответственно

$$q_{k,m} = \begin{cases} \sqrt{2}(2\sqrt{2})^m \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ к.} \\ (2\sqrt{2})^m \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ к.} \end{cases}$$

Напряженность поля  $E_{11}$  определим из формулы (1), учитывая, что частицы с радиусом  $r_0$  и зарядом  $q_1$  должны колебаться так, чтобы  $D = D_{\max}$ . Если выбрать  $D_{\max} = 2 \cdot 10^{-3}$  м,

то согласно (I), где

$$\alpha = \frac{6 \pi \eta r_0^2}{m(r_0 + \lambda \lambda)} ; \quad m = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \gamma ; \quad f = 0,02 \text{ гц},$$

получим

$$E_{II} = 1,68 \cdot 10^4 \text{ в/м.}$$

Таким образом с помощью формулы (I3) найдем

$$E_{k,m} = 1,68 \cdot 10^4 (\sqrt{8})^{k-m} \text{ в/м.} \quad (I5)$$

По формуле (I5) в каждом промежутке радиусов можно оценить минимальную измеримую величину заряда, если известна максимально допустимая или технически возможная напряженность электрического поля  $E_{\max}$  в кювете. Допустимая напряженность  $E_{\max}$  зависит от конфигурации электродов кюветы, их расположения и от других параметров, которые характеризуют самостоятельный электрический разряд в аэрозоле. К сожалению, вопрос о выборе оптимальной величины  $E_{\max}$  еще не решен.

#### Контроль полученных рекуррентных соотношений

При определении необходимых частот электрического поля  $f_k$  и границ  $r_k$  методической ошибки нет, поэтому их можно считать в пределах справедливости законов Стокса и Кенингема правильными.

Что касается точности формул (I2) и (I4), то оказалось, что упрощения, которые были сделаны при их получении, не дают значительной ошибки. В случае малых частиц ( $\alpha/4f$  очень велико) существенным источником ошибок является предположение а), для больших частиц - предположение б).

Для проверки формул (I2) и (I4) проведены следующие вычисления. Используя напряженности электрического поля, выб-



ранные с помощью формулы (15), для каждого  $r_k$  вычислены точные значения  $C_{k,m}$  всех  $q_{k,m}$  ( $m = 0, 1, 2, \dots, 10$ ) по формуле (I).

Оказалось, что относительная ошибка  $\delta = |C_{k,m} - q_{k,m}| / C_{k,m}$  независимо от  $m$  постоянна при фиксированном  $k$  и увеличивается с увеличением  $k$ :

$k$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
$\delta, \%$	0,05	7,0	11,7	14,8	17,0	18,5	19,6	20,4	21,2	22,7	28,2	46,2

Отсюда видно, что, если выбрать значения напряженности поля в соответствии с формулами (II) и (13), то все линии  $D = const$  искривляются с увеличением  $k$  вверх. Если этого нельзя допустить, надо во втором приближении ввести зависящий от  $k$  поправочный коэффициент  $x(k)$ , считая

$$E_{k,m} = x(k) E'_{k,m}.$$

Наконец, хотелось бы предложить одну возможность для определения распределения частиц по размерам и зарядам. Поскольку границы промежутков измерений выбраны так, что соответствующие частицы совершают не менее  $n_{min}$  и не более  $n_{max}$  полных колебаний и  $D$  остается в промежутке  $(D_{min}, D_{max})$ , то отпадает необходимость измерения фототрамм. По последним необходимо только подсчитать число частиц, выполняющих эти условия. Таким образом можно найти числа заполнения участков, изображенных на рис. 1 а или б; что и характеризует распределение частиц.

Ширина промежутков измерения, найденная вышеприведенным способом, не постоянна. При выборе частот и напряженностей поля можно учесть требование постоянства  $\Delta r$  и  $\Delta q$ , но в этом случае число промежутков измерения может оказаться неоправданно большим.

#### Заключение

В статье приведены методика и формулы нахождения оптимальных параметров (частота, напряженность) электрического

поля, применяемого в устройстве, работающем по методу Хоппера-Дэби. Здесь только надо выбрать напряженности так, чтобы угол наклона траектории  $\beta$  остался между  $\beta_{\min}$  и  $\beta_{\max}$ . В случае импульсного источника света по формуле (3) можно вычислить частоту повторения импульсов, если принять  $n$  за число световых импульсов, необходимое для определения траектории.

Предложен способ нахождения распределения частиц по размерам и зарядам без трудоемкого измерения параметров их траекторий.

### Л и т е р а т у р а

1. Millikan R. "Physic. Rev." 1913, 2, 109.
2. Опрус Я.В., Рейнет Я.О. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1970, вып. 240, 179-289.
3. Фишер М.М. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1970, вып. 240, 290-296.

### OSTSILLATSIOONIMEETODIL PÕHINEVAS AEROSOOliosAKESTE SUURUSE JA LAENGU MÄÄRAMISE SEADMES KASUTATAVA ELEKT- RIVÄLJA OPTIMAALSETE PARAMEETRITE VALIKUST

M. Fischer, A. Mirme

Resümee

Artiklis käsitletakse esitatud ostsillatsioonimeetodil põhinevas aerosooliosakeste suuruse- ja laengumõõtjas kasutatava elektrivälja parameetrite (sagedus, väljatugevus) optimaalse valiku meetodikat ja esitatakse valemid nende parameetrite arvutamiseks.

Lühidalt kirjeldatakse aerosooliosakeste suuruse ja laengu järgi jaotuvuste leidmise meetodit, mille eeliseks on see,

et ei ole tarvis läbi viia tšõmahukat osakeste trajektoorde parameetrite mõõtmist.

Artiklis esitatud materjal on rakendatav ka Hopper-Laby meetodil põhineva mõõteseadme konstrueerimisel.

ON CHOICE OF OPTIMUM PARAMETERS OF ELECTRIC FIELD  
USED IN OSCILLATION METHOD DEVICE FOR DETERMINING  
AEROSOL PARTICLE SIZE AND CHARGE

M. Fischer, A. Mirme

Summary

The article discusses the methods to be employed for the choice of the optimum parameters of the electric field (frequency, field strength) used in the device for measuring the size and the charge of aerosol particles, and presents formulas for the calculation of these parameters.

The method for the ascertainment of the distribution of aerosol particles according to their size and charge is described. Its advantage lies in the omission of the labour-consuming measurement of the parameters of the trajectories.

The material presented in the paper is also applicable to the design of a measuring device based on the Hopper-Laby method.

КОММУТАТОР ДЛЯ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРЕРЫВИСТОГО ОСВЕЩЕНИЯ  
С НАПРЯЖЕННОСТЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
В УЛЬТРАМИКРОСКОПИЧЕСКОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ  
РАЗМЕРОВ И ЗАРЯДОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

М.М. Фишер, А.Ф. Якобсон

В настоящей статье описывается электронное устройство, предназначенное для создания переменного электрического поля в кювете осцилляционного измерителя размеров и зарядов аэрозольных частиц, а также для синхронизации работы импульсного источника света.

Несмотря на свое специальное назначение, данный коммутатор можно использовать при различных экспериментальных исследованиях аэрозолей, когда изучаются траектории аэрозольных частиц.

Как известно, с помощью ультрамикроскопа регистрируется рассеянный на частицах свет на темном фоне. Для наблюдения маленьких частиц или фотографирования их траекторий необходимо использовать особенно интенсивные источники света. Большинство экспериментаторов применяло в качестве источника света либо электрическую дугу, либо ртутные лампы. Как показывает опыт лаборатории электронно-ионной технологии МЭИ [1], более перспективно использовать для этой цели импульсные лампы.

Основные преимущества импульсных ламп следующие. Так как продолжительность светового импульса очень мала, можно получить большую световую мощность в импульсе. При использовании импульсных ламп можно значительно уменьшить количество световой энергии, направляемой в кювету. Для достижения стабильного рабочего режима лампа не требует предварительного нагрева, вследствие чего в кювете уменьшается опасность появления конвекционных токов, искажающих ре-

зультаты измерений. Импульсные лампы позволяют просто регистрировать траектории частиц синхронно с работой остальных элементов измерительного устройства или давать световые метки, необходимые для измерения скорости частиц. Частоту и энергию импульса можно изменять в довольно широких пределах. Как показано далее, довольно простыми средствами можно устранить основной недостаток импульсных ламп — относительную сложность управления.

В измерительном устройстве, основанном на осцилляционном методе, наиболее оптимальной формой переменного электрического поля является прямоугольный симметричный импульс [ 2 ]. Коммутатор позволяет подавать на электроды измерительной киветы соответствующие импульсы напряжения на девяти дискретных частотах. Последние выбраны в соответствии с радиусом исследуемых частиц и высотой поля зрения фотографической системы на основе алгоритма, данного в статье [ 3 ]. Отношение  $n_{max}/n_{min}$  выбрано равным 2.

Точность и стабильность частоты электрического поля обеспечиваются применением камертонного задающего генератора. Необходимые для поджигания импульсной лампы импульсы коммутатор позволяет подавать так, что на один период электрического поля приходится 16, 24 или 32 световых импульса. При прямоугольном симметричном электрическом поле знак заряда частиц можно определить, если пометить их траектории световыми импульсами, синхронными с электрическим полем [ 2, 4 ]. Для этого коммутатор позволяет пропускать некоторые световые импульсы при определенной фазе электрического поля. Если коэффициент заполнения световых импульсов равен 16, то пропускается 7-й импульс, если коэффициенты заполнения равны 24 и 32, то соответственно пропускаются 10-й, 11-й и 14-й, 15-й импульсы.

Чтобы было удобнее проводить измерения, коммутатор позволяет также работать в трех различных режимах. Если необходимо следить за частицами в течение довольно про-

должительного времени, то используется непрерывный режим работы. Во втором режиме коммутатор дает световые импульсы и импульсы напряжения только тогда, когда затвор фотоаппарата открыт. В третьем режиме коммутация электрического поля и подача световых импульсов производится только в течение четырех периодов электрического поля после открытия затвора фотоаппарата. Последний режим предусмотрен для того, чтобы при наблюдении особенно маленьких аэрозольных частиц ограничить количество световой энергии, направляемой в кювету, и таким образом предотвратить конвекционные токи.

Структурная схема коммутатора приведена на рис. I. В схеме использованы полупроводниковые логические и функциональные элементы серии ЭТ [5, 6], обеспечивающие высокую надежность работы и простоту составления схемы. К сожалению, Калининский завод электроаппаратуры, ранее выпускавший эти элементы, прекратил их производство. Выпускаемые Заводом телемеханической аппаратуры г. Нальчика функциональные и логические элементы ГСП общепромышленного назначения и поэтому не применимы в лабораторных условиях. Более пригодны элементы типа ЭТ, т.е. блоки, содержащие в одном корпусе не более 1 - 2 логических элементов.

Условные обозначения на структурной схеме рис. I:

- Г - генератор импульсов, предназначенный для получения импульсов частотой 491, 52 гц;
- И - диодная приставка ЭТ-ЛО2, реализующая логическую функцию  $y = x_1 x_2 x_3$ ;
- Ф - релейный элемент ЭТ-Ф02, преобразующий входной сигнал в стандартный дискретный сигнал;
- Т - триггер ЭТ-ЛО3 или ЭТ-ЛО4;
- ИЛИ-НЕ - логический реостатно-транзисторный элемент ЭТ-ЛО1, реализующий логическую функцию  $y = \overline{x_1 + x_2 + x_3}$ ;
- ЛЗ - RC-цепочка ЭТ-ВО1, применяемая для задержки импульсов;

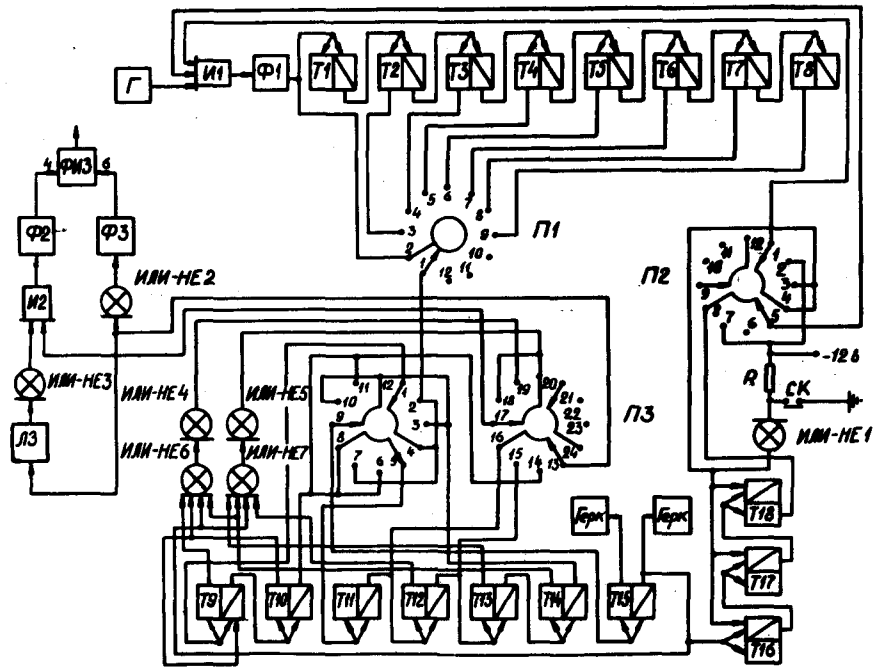


Рис.1. Структурная схема коммутатора.

П1, П2, П3 - переключатели галетные;

СК - синхροконтакт фотоаппарата;

Герк - обмотка герконового реле;

ФИБ - формирователь зажигающих импульсов импульсной лампы.

Схема генератора импульсов показана на рис. 2.

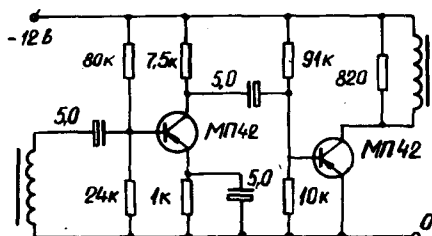


Рис. 2. Принципиальная схема генератора импульсов.

Импульсы из генератора Г (рис. 1) поступают через схему совпадения И1 и формирователь Ф1 на вход двоичного счетчика импульсов, составленного из триггеров Т1 - Т15. Счетчик импульсов применяется для изменения частоты следования импульсов.

Последний триггер Т15 счетчика управляет контактами реле Герк, которые подают напряжение на электроды измерительной кюветы, что изображено на рис. 3.

Изменяя положение переключателя П1, мы изменяем частоту опрокидываний триггера Т15, а тем самым частоту импульсов напряжения, подаваемых на электроды кюветы.

Выше было указано, что во время одного периода изменения электрического поля необходимо получить 16, 24 или 32 вспышки импульсной лампы.



Для этого через контакты I3, I4, I5 и I6 переключателя ПЗ на входы элементов ИЛИ-НЕ2 и Л3 подключаются выходы триггеров Т10, Т11 или Т12, совершающие I6, 24 или 32 опрокидывания за время одного опрокидывания триггера Т15.

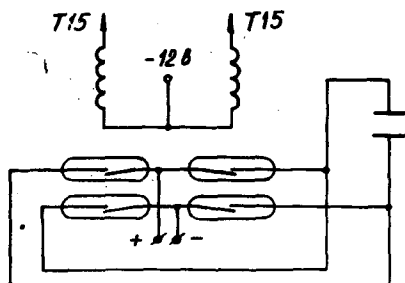


Рис. 3. Схема подачи напряжения на электроды кюветы.

От элементов ИЛИ-НЕ2 и Л3 импульсы подаются через формирователи Ф2 и Ф3 на тиристорный формирователь импульса зажигания ФИЗ, схема которого дана на рис. 4

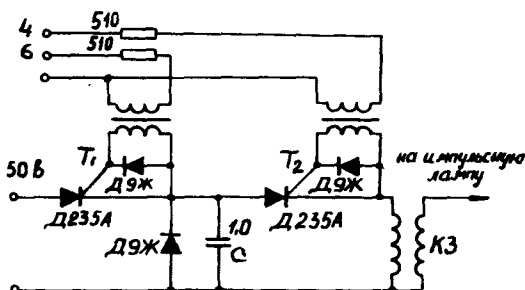


Рис. 4. Схема формирования импульса зажигания.

На вход 4 ФИЗ импульсы по сравнению со входом 6 подаются с некоторой задержкой, обеспечиваемой линией задержки ЛЗ. После подачи очередного импульса на вход 6 ФИЗ отпирает тиристор  $T_1$  и начинается зарядка конденсатора С. Когда конденсатор заряжен, импульсом со входа 4 отпирается тиристор  $T_2$ , через который конденсатор разряжается на первичную обмотку катушки зажигания КЗ. На выходе КЗ появляется высоковольтный поджигающий импульс, способный вызвать вспышку импульсной лампы.

Пропуск отдельных световых импульсов обеспечивается соответствующим включением элементов И2 и ИЛИ-НЕ4 - ИЛИ-НЕ7.

Для пропуска определенного светового импульса необходимо ко входам элементов ИЛИ-НЕ7 или ИЛИ-НЕ6 подключить обратные выходы триггеров, находящихся только во время данного импульса одновременно в состоянии "1". В этом случае на всех выходах элемента ИЛИ-НЕ6 (или ИЛИ-НЕ7), а также на выходе ИЛИ-НЕ4 (или ИЛИ-НЕ5) будет сигнал "0", который через контакты 17, 18, 19 и 20 переключателя ПЗ подается на вход ключа И2, который запирается, предотвращая прохождение данного импульса. Тиристор  $T_2$  ФИЗ не отпирается, конденсатор не разряжается, световой импульс не формируется.

Переключатель П2 предназначен для установки режима измерений. При замкнутых контактах 1-2 и 5-6 отрицательное напряжение -I2 подается на входы 1,2 ключа И1. При этом И1 отперт и импульсы, поступающие от генератора Г, свободно проходят на вход счетчика. Этим достигается непрерывный режим работы коммутатора.

При замыкании контактов 1-3 и 5-7 переключателя П2 на вход 2 И1 подается сигнал "1", а на вход 1 И1 сигнал "0". Только во время экспозиции, когда синхроконттакт СК замкнут, появляется на выходе элемента ИЛИ-НЕ1 сигнал, который отпирает диодный ключ И1, и коммутатор включается. При замкнутых контактах 1-4 и 5-8 переключателя П2 и

разомкнутых контактах СК на вход 2 элемента И1 подается сигнал "1", так как триггер Т18 находится в начальном положении, имея на своем обратном выходе сигнал "1". На вход 1 ключа И1 подается сигнал "0", так как на вход ИЛИ-НЕ1 от источника  $-I_2$  в через сопротивление R (СК разомкнут) поступает отрицательное напряжение, включающее инвертор ИЛИ-НЕ1. В начале экспозиции контакты СК замыкаются, на вход 1 элемента И1 подается сигнал "1", и счетчик импульсов включается.

Выход триггера И15 соединен со входом счетчика импульсов, состоящего из триггеров Т16, Т17 и Т18. После четвертого опрокидывания триггера Т15 в начальное положение включается Т13, на вход 1 элемента И1 подается сигнал "0", работа коммутатора прекращается. При размыкании контактов СК на выходе ИЛИ-НЕ1 появляется сигнал "0", который сбрасывает триггеры Т16, Т17, Т18 в начальное положение. Коммутатор готов к новому циклу работы.

Во многих случаях присутствие оператора, проводящего измерения, необязательно, например, при измерениях в аэрозольных камерах или при исследовании естественных аэрозолей. Тогда органы управления коммутатором П1, П2, П3, СК можно вынести за пределы места исследования. С помощью описанного коммутатора в дальнейшем возможен переход к полностью автоматизированному процессу измерений.

#### Л и т е р а т у р а

1. Пашин М.М. Сб. "Сильные электрические поля в технологических процессах". М., 1969, 103-138.
2. Опрус Я.В., Рейнет Я.Ю. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1970, вып. 240, 279-289.
3. Фишер М.М., Мирме А.А. В настоящем выпуске.
4. Фишер М.М. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1970, вып. 240, 290-296.

5. Гиршберг В.В. и др. Типовые узлы на полупроводниковых логических и функциональных элементах серии ЭТ. М., 1966.
6. Гиршберг В.В. и др. Единая серия полупроводниковых логических и функциональных элементов (ЭТ). М., 1966.

KOMMUTAATOR VILKUVA VALGUSE SÜNKRONISEERIMISEKS ELEKTRIVÄLJAGA OTSILLATSIOONIMEETODIL PÕHINEVAS AEROSOLIOSAKESTE RAADIUSE JA LAENGU MÄÄRAMISE ULTRAMIKROSKOOPILISES SEADMES

M. Fischer, A. Jakobson

Resüme

Artiklis kirjeldatakse elektroonikaseadet, mis kommuteerib mõõteküveti elektroodidele rakendatavat pinget ning juhib vilkuva valgusallika tööd sünkroonselt elektroodide vahel tekitatud elektriväljaga. Kirjeldatud seade on määratud spetsiaalseks otstarbeks - kasutamiseks otsillatsioonnimeetodil põhinevas ultramikroskoopilises aerosooliosakeste suuruse ja laengu määramise seadmes. Kirjeldatule analoogilist seadet võib rakendada neil aerosooli eksperimentaalse uurimise juhtudel, kus eksperiment seisneb aerosooliosakeste jälgimisel või nende trajektooride fotografeerimisel erinevates füüsikalistes tingimustes.

USE OF A COMMUTATOR IN AN ULTRAMICROSCOPIC DEVICE  
SERVING FOR THE DETERMINATION OF AEROSOL PARTICLES  
SIZE AND CHARGE

M. Fischer, A. Jakobson

Summary

The paper describes an electronic device which commutates the voltage applied to the electrodes of the measuring cuvette and controls the operation of the blinking light source synchronously with the electric field in the cuvette. The present device is intended for a special purpose - for use in an ultramicroscopic oscillation method device employed for the determination of the size and the charge of aerosol particles.

A device similar to the one described above can be applied to cases of an experimental study of aerosols where the experiment consists in the observation of aerosol particles or in photographing their trajectories under varying physical conditions.

## СОДЕРЖАНИЕ

РЕЙНЕТ Я.Ю. Краткий обзор научно-исследовательских работ по аэроионизации и электроаэрозолям	3
ТАММЕТ Х.Ф. Расчет аспирационного конденсатора на максимум удельной интенсивности осаждения аэроионов	16
ТАММЕТ Х.Ф. Вольт-амперная характеристика "обратной" квазикорони между цилиндрическими электродами	30
ТАММЕТ Х.Ф. Таблица специальной функции цилиндрического коронного разряда	37
ВЕЙМЕР В.А., КУДУ К.Ф. Изучение фаз развития униполярного ВЧ разряда в диапазоне 3-20 МГц	49
АЙНТС М.Х., ВЕЙМЕР В.А., КУДУ К.Ф. Вольт-вольтовые характеристики униполярного ВЧ разряда на частоте 0,4 МГц при пониженных давлениях в воздухе	62
ВЕЙМЕР В.А., ХАЛБЯСТЕ А.Я. О методике снятия счетных характеристик стримеров положительной короны в промежутке острие-плоскость	81
ХАЛЛЕР К.Э., САЛЪМ Я.И. Ионизатор газа с однородной ионизационной зоной	104
СИЙРДЕ Э.К., СИБУЛЬ С.Ф., ЙЕНТС А.К. О применении в оториноларингологии аэроионизаторов, аэрозольных и электроаэрозольных аппаратов, сконструированных тартускими физиками	110
СИБУЛЬ С.Ф. Использование терапии отрицательными кислородными электроаэрозолями в отделении уха-горла-носа Тартуской республиканской клинической больницы с 1962 по 1969 гг.	118

СУЛА Э.В., РЕЙНЕТ Я.Ю. Дозирование при аэрозольном методе вакцинации	124
ВИСНАПУУ Л.О., ЛЕНЦЕР Х.П., СМЯРДЕ Т.Э. Пневматический генератор электроаэрозолей для дезинфекции жилых помещений	129
ВИСНАПУУ Л.О. К теории индукционной электризации распыляемых жидкостей	141
ВИСНАПУУ Л.О. Электростатическое рассеяние заряженных частиц в турбулентной струе	157
ГУЩИН А.Е., ВИСНАПУУ Л.О. Изучение электризации волокон при формировании длинноволокнистой бумаги	169
МАТУЛЯВИЧУС В.П. Об эффективности электрофильтров, применяемых для улавливания радиоактивных аэрозолей	179
ГРОСС Л.Г., ВОЗЖАЕВ В.Д. К расчету преобразователя электростатического поля с сеткой и вибрирующим электродом	190
БИЧЕВИН В.В. Электронметрический усилитель постоянного тока	200
ФИШЕР М.М., МИРМЕ А.А. О выборе оптимальных параметров электрического поля, используемого в осцилляционном измерителе размеров и зарядов аэрозольных частиц	206
ФИШЕР М.М., ЖОБСОН А.Ф. Коммутатор для синхронизации прерывистого освещения с напряженностью электрического поля в ультрамикроскопическом измерителе размеров и зарядов аэрозольных частиц	220

## SISUKORD

REINET J. Lühiülevaade aeroionisatsiooni- ja elektroaerosoolide-alastest uurimistöödest	15
TAMMET H. Maksimaalse aeroioonide sadestumise erintensivsusega aspiratsioonkondensaatori arvutus	28
TAMMET H. "Pööratud" kvaasikoroona voltamperkarakteristik silindriliste elektroodide korral	35
TAMMET H. Silindrilise koroonalahenduse spetsiaal-funktsiooni tabel	48
VEIMER V., KUDU K. Unipolaarse KS lahenduse arengufaaside uurimine sageduste diapsoonil 3-20 MHz	61
AINTS M., VEIMER V., KUDU K. Unipolaarse kõrgsageduslahenduse volt-volt karakteristikud sagedusel 0,4 MHz õhus alarõhul	79
VEIMER V., HALJASTE A. Positiivse koroona striimrite loenduskarakteristikute määramise meetodikast lahendusvahemikus teravik-plaat	101
HALIER K., SAIM J. Homogeense ioniseerimistsooniga gaasioonisaator	108
SIIRDE E., SIBUL S., JENTS A. Tartu füüsikute poolt konstrueeritud aeroionisaatorite, aerosooli- ja elektroaerosooliaparaatide kasutamisest otorinolarüngoloogias	116
SIBUL S. Negatiivse hapniku elektroaerosoolravi kasutamisest Tartu Vabariikliku Kliinilise Haigla kõrva-nina-kurguosakonnas ajavahemikus 1962-1969.a.	122



SULA E., REINET J. Doseerimine vaksineerimisel aerosoolmeetodil	128
VISNAPOU L., IENZNER H., SIIRDE T. Pneumaatiline elektroaerosooligeneraator ruumide desinfitseerimiseks	139
VISNAPOU L. Pihustatavate vedelike induktsioonlaadimise teooriast	156
VISNAPOU L. Laetud osakeste elektrostaatiline hajumine turbulentses joas	168
GUSTŠIN A., VISNAPOU L. Kiudude elektriseerumise uurimine pikakiulise paberi vormimisel	177
MATULEVICIUS V. Radioaktiivse aerosooli sadestamiseks kasutatud elektrofiltrite efektiivsusest	189
GROSS L., VOSZAJEV V. Võre ja vibreeriva elektrootodiga elektrostaatilise välja muundi arvutusest	198
BITŠEVIN V. Elektrometriiline alalisvoolu võimendi	204
FISCHER M., MIRME A. Ostsillatsioonimeetodil põhinevas aerosooliosakeste suuruse ja laengu määramise seadmes kasutatava elektrivälja optimaalsete parameetrite valikust	218
FISCHER M., JAKOBSON A. Kommutaator vilkuva valguse sünkroniseerimiseks elektriväljaga ostsillatsioonimeetodil põhinevas aerosooliosakeste raadiuse ja laengu määramise ultramikroskoopilises seadmes	228

## CONTENTS

REINET J. Short survey of investigations on air ionization and electroaerosols	15
TAMMET H. Computation of the maximum settling of air ions for an aspiration capacitor of specific intensity	29
TAMMET H. Voltammeter characteristic of inverse quasi-corona for cylindrical electrodes	35
TAMMET H. Specific function table for the cylindrical corona discharge	48
VEIMER V., KUDU K. The development phases of the unipolar HF discharge within the frequency range of 3-20 MHz	61
AINTS M., VEIMER V., KUDU K. Unipolar HF discharge volt-volt characteristics at frequency of 0.4 MHz in the air at subnormal pressure	80
VEIMER V., HALJASTE A. On the method of determining counting curves of positive corona streamers in the point-to-plane discharge gap	102
HALLER K., SAIM J. A gas ionizer with a homogeneous ionization zone	108
SIIRDE E., SIBUL S., JENTS A. Aeroionizers, aerosol and electroaerosol apparatus designed by the physicists of Tartu and their use in otorhinolaryngology	117
SIBUL S. On the use of negative electroaerosols of oxygen in treatment in the ear, nose and throat department of Tartu Republican Clinical Hospital in 1962 - 1969	123

SULA E., REINET J. Dosage of vaccine necessary in vaccination of farm animals by the aerosol method	128
VISNAPUU L., LENZNER H., SIIRDE T. Pneumatic electroaerosol generator for the disinfection of rooms	140
VISNAPUU L. On the theory of induction electrification of liquids to be atomized	156
VISNAPUU L. Electrostatic scattering of charged particles in a turbulent jet	168
GUSHCHIN A., VISNAPUU L. Investigation of the electrification of fibres in forming long-fibred paper	177
MATULEVICIUS V. On the efficiency of electrofilters used for deposition of radioactive aerosols	189
GROSS L., VOSZHAYEV V. On the calculation of electrostatic field transformer with grid and vibrating electrode	198
BICHEVIN V. Electrometric DC amplifier	205
FISCHER M., MIRME A. On choice of optimum parameters of electric field used in oscillation method device for determining aerosol particle size and charge	219
FISCHER M., JAKOBSON A. Use of a commutator in an ultramicroscopic device serving for the determination of aerosol particles size and charge	229

УДК 551.594.12  
615.835.5  
615.847.1

КРАТКИЙ ОБЗОР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ ПО АЭРО-  
ИОНИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЯМ. Р е й н е т Я. Ю. "Уч. зап.  
Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 3-15.

Дан краткий обзор научно-исследовательских работ по  
аэроионизации и электроаэрозолям, выполненных в Тартуском  
государственном университете. Приложен перечень соответ-  
ствующих публикаций за 1969-1970 гг. и частично за 1971 г.  
Библ. 79. Рез. эст., англ.

---

УДК 551.508.941  
551.510.711  
621.317.792

РАСЧЕТ АСПИРАЦИОННОГО КОНДЕНСАТОРА НА МАКСИМУМ УДЕЛЬ-  
НОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАЖДЕНИЯ АЭРОИОНОВ. Т а м м е т Х. Ф.  
"Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 16-29.

Описан метод оптимизации измерительного конденсатора  
спектрометра подвижностей аэроионов. Постановка задачи  
ориентирована на применение в спектрометрии аэрозолей, в  
первую очередь радиоактивных. Задача сформулирована в тер-  
минах нелинейного математического планирования. Представ-  
лен практический алгоритм и в качестве примера приведены  
некоторые конкретные результаты.

Табл. 1. Библ. 4. Рез. эст., англ.

---

УДК 537:523.3  
621.3.015.532

ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА "ОБРАТНОЙ" КВАЗИКРОНЫ  
МЕЖДУ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ. Т а м м е т Х. Ф. "Уч.  
зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 30-36.

Изучается идеальная униполярная квазикрона между ко-  
аксиальными цилиндрами в предположении, что ионы эмитти-  
руются внешним цилиндром. При этом расширяется область  
определения специальной функции  $C_y(\alpha, \mu)$ , введенной в  
другой работе автора.

Табл. 2. Библ. 1. Рез. эст., англ.

УДК 537.523.3  
621.3.015.532

ТАБЛИЦА СПЕЦИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА. Т а м м е т Х. Ф. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 37-48.

Табулирована функция, используемая в выражении вольт-амперной характеристики идеальной униполярной квазикоромежду коаксиальными цилиндрическими электродами (эмиттер - внутренний электрод).

Табл. 1. Библ. 1. Рез. эст., англ.

---

УДК 537.525.2

ИЗУЧЕНИЕ ФАЗ РАЗВИТИЯ УНИПОЛЯРНОГО ВЧ РАЗРЯДА В ДИАПАЗОНЕ 3-20 МГц. В е й м е р В. А., К у д у К. Ф. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 49-61.

Методом фотоэлектрической обратной связи были получены фотографии фаз развития ВЧ разряда в диапазоне частот 3-20 МГц. Было найдено, что в начальные стадии внешний вид разряда на разных частотах сходный; значительные различия появляются в более поздние стадии развития. Яркость каналов растет с ростом частоты. Пробой промежутка наступает, когда один из каналов коснется пластины. По полученным фотографиям можно было оценить скорость развития разряда. Установлено, что она падает в зависимости от расстояния от острья, а также, что она наибольшая при частоте 10 МГц.

Илл. 20. Библ. 6. Рез. эст., англ.

---

УДК 537.525.2

**ВОЛЬТ-ВОЛЬТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УНИПОЛЯРНОГО ВЧ РАЗРЯДА НА ЧАСТОТЕ 0,4 МГц ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ В ВОЗДУХЕ.**  
А й н т с М. Х., В е й м е р В. А., К у д у К. Ф.  
"Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 62-80.

Выполнены измерения пороговых напряжений различных форм разряда в промежутке острие-плоскость (радиус кривизны острия 0,5 мм, плоскость - на расстоянии 40 мм над острием) при одновременном приложении к острию как постоянного, так и переменного напряжения в разных соотношениях. Частота переменной составляющей - 0,4 МГц. Измерения проводились в осушенном воздухе в области давлений 4-760 Тор.

Получены кривые пороговых напряжений разряда в осях постоянное напряжение - ВЧ напряжение (т.н. вольт-вольтовые характеристики) в вышеуказанном диапазоне давлений. Установлено, что в случае понижения давления при постоянной частоте переменной составляющей питающего напряжения изменения вольт-вольтовых характеристик аналогичны их изменениям в случае повышения частоты при нормальном давлении. Показано, что эта аналогия вызвана сходством между изменениями в элементарных процессах развития разряда в обоих случаях. Так причиной относительно более быстрого снижения порога ВЧ разряда с понижением давления является возникновение объемного разряда положительных ионов у поверхности острия. В итоге можно сказать, что существует аналогия в ходе процессов развития разряда между повышением частоты при постоянном давлении газа и понижением давления при постоянной частоте питающего напряжения.

Илл. 15. Библ. 11. Рез. эст., англ.

УДК 537.525.2

О МЕТОДИКЕ СНЯТИЯ СЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРИМЕРОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ КОРОНЫ В ПРОМЕЖУТКЕ ОСТРИЕ-ПЛОСКОСТЬ. Веймер В. А., Хальясте А. Я. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 81-103.

Описано автоматическое устройство для получения счетных характеристик стримеров положительной короны в асимметричных разрядных промежутках. Приведена блок-схема устройства. Подробно описаны главные узлы системы - формирователь линейно возрастающего высокого напряжения, логарифмический интенсиметр, разрядный промежуток. В качестве примера работы системы представлены результаты предварительных измерений в описанном разрядном промежутке острие-плоскость.

Илл. 13. Бюл. 7. Рез. эст., англ.

---

УДК 537.241

ИОНИЗАТОР ГАЗА С ОДНОРОДНОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ ЗОНОЙ.

Халлер К. Э., Сальм Я. И. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 104-109.

Рассматривается ионизатор в виде либо открытого, либо замкнутого канала, через который течет газ, подлежащий ионизированию. В начальном участке канала поддерживается однородное ионизационное излучение, а в конечном участке ионизация отсутствует, происходит только рекомбинация. При упрощающих предположениях теоретически выведены формулы для нахождения концентрации ионов на выходе ионизатора. Анализируется влияние скорости потока воздуха.

Табл. 1. Бюл. 1. Рез. эст., англ.

---

УДК 615.835.5

О ПРИМЕНЕНИИ В ОТОРИНОЛАРИНГОЛОГИИ СКОНСТРУИРОВАННЫХ ТАРТУСКИМИ ФИЗИКАМИ АЭРОИОНИЗАТОРОВ, АЭРОЗОЛЬ - И ЭЛЕКТРО-АЭРОЗОЛЬ-АППАРАТОВ. С и й р д е Э. К., С и б у л ь С. Ф., Й е н т с А. К. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. IIО-II7.

Дан обзор применения на кафедре оториноларингологии ТТУ аэроионизаторов, аэрозоль- и электроаэрозоль-аппаратов, сконструированных физиками университета. Описаны методы, которыми исследовалось действие электрических зарядов на организм, а также указаны возможности применения соответствующих аппаратов в лечебных целях.

Библ. 13. Рез. эст., англ.

---

УДК 615.451.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРАПИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ КИСЛОРОДНЫМИ ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЯМИ В ОТДЕЛЕНИИ УХО-ГОРЛО-НОСА ТАРТУСКОЙ РЕСПУБЛИКАНСКОЙ КЛИНИЧЕСКОЙ БОЛЬНИЦЫ С 1962 ПО 1969 ГГ. С и б у л ь С. Ф. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. II8-II3.

С 1962 по 1969 гг. ингаляция отрицательных кислородных электроаэрозолей (ОКЭ) назначалась 1402 больным. Чаще всего терапия ОКЭ использовалась при аллергических болезнях (34,1%), таких как аллергическая ринопатия, бронхиальная астма и др. За ними следуют атрофические процессы слизистой оболочки верхних дыхательных путей (21,3%) и неспецифические хронические воспаления верхних дыхательных путей (16,2%). Реже терапия ОКЭ применялась при острых воспалениях дыхательных путей (2,0%). В послеоперационный период ингаляция ОКЭ назначалась 9,7% больным (гайморотомия, операции на гортани) и в 16,5% случаев при различных других болезнях (невралгия и др.).

Илл. 1. Библ. 3. Рез. эст., англ.



УДК 182.2  
351.774.7

**ДОЗИРОВАНИЕ ПРИ АЭРОЗОЛЬНОМ МЕТОДЕ ВАКЦИНАЦИИ.** Су-  
ха Э. В., Рейнет Я. Ю. "Уч. зап. Тартуского гос.  
ун-та", 1971, вып. 283, стр. 124-128.

В статье выведены формулы для доз вакцины, получаемой животными в боксе вакцинации при вдыхании аэрозоля или электроаэрозоля.

Библ. I. Рез. зст., англ.

---

УДК 614.48

**ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЕЙ ДЛЯ ДЕЗИН-  
ФЕКЦИИ ХИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ.** Виснапуу Л. Ю., Лен-  
цнер Х. П., Сийрде Т. Э. "Уч. зап. Тартуского  
гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 129-140.

Описано устройство для получения дезинфекционных аэро-  
золей и приведены его технические характеристики. Экспери-  
ментально определены минимальные дозы фенола, хлорамин и  
перекиси водорода, необходимые для обеззараживания гест-  
микробов *E. coli* и *St. aureus*, нанесенных на вертикальные  
поверхности помещения. Оценено влияние электризованности и  
удаленности струй аэрозоля на дезинфекционную эффектив-  
ность препаратов.

Илл. 2. Табл. 2. Библ. II. Рез. зст., англ.

УДК 621.319.7.001  
532.5

К ТЕОРИИ ИНДУКЦИОННОЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ РАСПЫЛЯЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ. В и с н а п у у Л. Ю. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1971, вып. 283, стр. 141-156.

Приведен краткий обзор литературы по теоретическим вопросам зарядки жидкости способом электростатической индукции. Сопоставлены некоторые экспериментальные данные конвективного тока заряженных частиц, образующихся при пневматическом распылении, с расчетными. Анализированы причины встречающихся расхождений между результатами опыта и теории при определенных режимах распыления. Описана модель генератора заряженных частиц, на основании которой показано, что конвективный ток существенно определен как удельной электропроводностью распыливаемой жидкости, так и интенсивностью срыва капель с ее поверхности в зоне индукции. Предложена гипотеза механизма образования части капель, заряженных протиположно по отношению к зарядам, наведенным индуцирующим электродом генератора.

Илл. 3. Табл. 1. Библ. 17. Рез. эст., англ.

---

УДК 537.222:532.5

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ. В и с н а п у у Л. Ю. "Уч. зап. Тартуского гос. ун-та", 1971, вып. 283, стр. 157-168.

Расчетным путем показано, что плотность заряда и сила конвективного тока в турбулентной струе тем больше, чем больше начальная плотность заряда и скорость заряженных частиц и чем меньше их подвижность. На большом расстоянии от генератора плотность заряда и сила тока в струе почти не зависят от начальной плотности заряда и существенно определяются начальной скоростью и массовым расходом исходного вещества струи. Сделаны выводы, что при измерении истинного тока зарядов, создаваемых пневматическим генератором, перед его выходным отверстием на возможно близком расстоянии следует установить заземленное тело (сетку) и что при заданной производительности эффективность транспортировки заряженных частиц тем выше, чем меньше периметр начального сечения струи.

Библ. 12. Рез. эст., англ.

УДК 677.4.537.2

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ВОЛОКОН ПРИ ФОРМОВАНИИ ДЛИН-  
НОВОЛОКНИСТОЙ БУМАГИ. Г у щ и н А.Е., В и с н а п у  
Л. Д. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", вып. 283, 1971,  
стр. 169-178.

С применением математических моделей изучен процесс  
электризации волокон, происходящий при диспергировании  
волоконистого материала и движении его в аэродинамической  
трубе. Установлено, что образование хлопьев при электр-  
зации волокон обусловлено осаждением их на стенки аэроди-  
намической трубы, причем взаимодействие разноименнозая-  
женных волокон в воздушном потоке заметного хлопьеобразо-  
вания не вызывает.

Илл. 1. Табл. 3. Библ. 6. Рез. эст., англ.

---

УДК 551.510.71  
551.594

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ  
УЛАВЛИВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ. М а т у л я в и ч е с  
В. П. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283,  
стр. 179-189.

Приведены экспериментальные данные эффективности  
электрофильтров при улавливании радиоактивных аэрозолей.  
Эффективность электрофильтра оценивается по отношению к  
фильтрующему материалу ФШ-15. Степень улавливания есте-  
ственных радиоактивных аэрозолей электрофильтром по срав-  
нению с фильтром типа ФШ-15 при различных аэродинамичес-  
ких режимах меньше от 6,6 до 27,3 раза. В статье представ-  
лены некоторые данные работы электрофильтра, исходя из об-  
щих основ теории электрофильтрования.

Илл. 1. Табл. 3. Библ. 5. Рез. эст., англ.

УДК 537.7:537.212

К РАСЧЕТУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ С СЕТКОЙ И ВИБРИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ. Г р о с с Л. Г., В о з - ж а е в В. Д. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 190-199.

Дан метод расчета преобразователей с экранирующей сеткой и вибрирующим сплошным металлическим электродом, у которых расстояние между осью параллельных проволок сетки и поверхностью вибрирующего электрода в несколько раз меньше шага сетки, и установлено оптимальное соотношение размеров и взаимного расположения элементов преобразователя. Показано, что полученные расчетные соотношения согласуются с экспериментальными данными и могут быть рекомендованы для инженерных расчетов.

Илл. 2. Библ. 6. Рез. зст., англ.

---

УДК 621.375

ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА. Б и - ч е в и н В. В. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 200-205.

Описан гибридный электрометрический усилитель с входным каскадом на лампе ЭМ-4 и автогенераторным резонансным усилителем постоянного тока. В схеме применена 100%-ная отрицательная обратная связь.

Илл. 2. Библ. 5. Рез. зст., англ.

УДК 621.319.7.001

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ИСПОЛЪЗУЕМОГО В ОСЦИЛЛЯЦИОННОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ РАЗМЕРОВ И ЗАРЯДОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ. Ф и ш е р М. М., М и р м е А. А. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 206-219.

В статье приведены методика и формулы нахождения оптимальных параметров (частота, напряженность) электрического поля, применяемого в осцилляционном измерителе размеров и зарядов аэрозольных частиц. Кратко описан метод определения частиц по размерам и зарядам без трудоемкого измерения параметров траекторий частиц.

Приведенные в статье данные применимы и при конструировании измерительного прибора, работающего по методу Хоппера-Лэби.

Илл. 1. Библ. 3. Рез. эст., англ.

---

УДК 621.319.05

КОММУТАТОР ДЛЯ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРЕРЫВИСТОГО ОСВЕЩЕНИЯ С НАПРЯЖЕННОСТЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В УЛЬТРАМИКРОСКОПИЧЕСКОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ РАЗМЕРОВ И ЗАРЯДОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ.

Ф и ш е р М. М., Я к о б с о н А. Ф. "Уч. зап. Тартуского гос.ун-та", 1971, вып. 283, стр. 220-229.

Описывается электронное устройство, коммутирующее напряжение на электроды осцилляционного измерителя размеров и зарядов частиц и синхронизирующее работу импульсного источника света с напряженностью электрического поля между указанными электродами. Устройство может применяться также при слежении и фотографировании траекторий частиц в прочих условиях.

Илл. 4. Библ. 6. Рез. эст., англ.

ТРУДЫ ПО АЭРОИОНИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОАЭРОЛЯМ

У

На русском, эстонском и английском языках

Тартуский государственный университет  
ЭССР, г. Тарту, ул. Шакооли, 18

Ответственный редактор Л. Виснапу

Ротапринт ТГУ 1971. Подписано к печати 15/УП 1971 г.  
Печ. листов 14,69-1,25. Учетно-издат. листов 13,9  
Тираж 500 экз. Бумага типографская № 2, 30x45. 1/4  
МВ 06481. Зак. № 619.

Цена 1 руб. 15 коп.