

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
Киевский институт инженеров гражданской авиации

На правах рукописи

ФРАНЧУК Григорий Михайлович

УДК 629.735.088.02:658.345:502 (048.8)

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОФАЗНЫХ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ

Специальность: 05.22.14 - Эксплуатация воздушного
транспорта

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

К и е в 1998



Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Киевском институте инженеров гражданской авиации.

Научные консультанты - Доктор технических наук,
профессор Касьянов В.А.,
доктор технических наук,
профессор Ушаков В.В.

Официальные оппоненты - Доктор технических наук,
профессор Комарев А.А.,
доктор технических наук,
профессор Терещенко Г.М.,
доктор технических наук
Маслов В.Т.

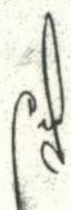
Ведущая организация - Авиаремонтный завод № 410

Защита состоится 28 января 1994 г. в 15 часов на заседании специализированного Совета Д 072.04.01 при Киевском институте инженеров гражданской авиации по адресу: 252601, ГСП, Киев-58, проспект Космонавта Комарова, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского института инженеров гражданской авиации.

Автореферат разослан 21 декабря 1993 года.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
доктор технических наук



Н.Ф.Дмитриченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие современного промышленного производства сопровождается применением технологических процессов, при которых в больших количествах используются токсические пожароопасные вещества, неблагоприятно влияющие на окружающую среду. В большинстве случаев эффективность и экономичность этих процессов крайне низкие из-за низкой скорости процессов, больших расходов применяемых материалов, а также высокой энергоёмкости и материалоемкости применяемого промышленного оборудования.

Интенсификация традиционных методов очистки и неразрушающего контроля (НК) деталей осуществляется применением ультразвука (ультразвуковая очистка и дефектоскопия) или электрического тока в жидкости (электролитическая очистка). Ультразвуковой и электролитический способы очистки связаны с большими энергетическими затратами и сложностью оборудования и применяются главным образом для очистки мелких деталей. В качестве рабочих жидкостей при ультразвуковой и электролитической очистке применяются органические растворители, отличающиеся повышенной токсичностью и пожароопасностью.

Основным недостатком применяемых в настоящее время механических способов очистки является низкий класс шероховатости, шаржирование и повреждение поверхности обрабатываемых деталей, увеличение газонасыщенности поверхностного слоя, а также высокая стоимость работ по обеспечению безопасных условий труда и экологической чистоты производственного процесса.

В связи с увеличением объемов производства, широким внедрением новых конструкционных материалов, защитных и декоративных покрытий, в связи с возрастающими требованиями рационального расходования природных ресурсов, повышения экологической чистоты и обеспечения безопасных условий труда возникает необходимость поиска новых более эффективных, безопасных и не оказывающих неблагоприятного влияния на окружающую среду способов и средств очистки и неразрушающего контроля деталей.

Теории и практике очистки деталей от загрязнений посвящены основополагающие работы С.Спринга, И.Корыта, И.Дсоржака, В.Богаичиковой, В.А.Волосатова, А.Е.Проволоцкого, К.С.Азлова, С.К.Кузнецова, А.Ф.Тельнова и др. Исследования механизмов уноса массы с поверхности деталей проводили К.Прис, Д.Саммерс, М.С.Вольнский

А.С.Липатов, М.Е.Дейч, Г.А.Филиппов, Р.Г.Перельман, Дж.Спринжер и др. Однако вопросы интенсификации очистки с использованием энергии газового потока, переносящего нейтральные и электрически заряженные жидкие и твердые аэрозольные частицы в работах указанных авторов не рассматривались.

Проблемам совершенствования капиллярного контроля посвящены работы А.С.Боровикова, П.П.Прохоренко, А.К.Денеля, Т.Мак-Мостера и др. Исследования влияния электрических и магнитных полей на свойства полярных жидкостей проводили Э.Я.Блум, А.И.Русанов, В.Я.Антонченко, Т.Эрден-Груз и др. Однако оценки влияния внешних воздействий, в частности электрического поля, на процессы капиллярного контроля авторами не проводились.

Появление новых высокоскоростных технических средств для обслуживания и ремонта авиационной техники (АТ), широкое внедрение в производство новых синтетических и полимерных материалов, развитие всепогодной авиации, предполагающее полеты воздушных судов (ВС) в условиях повышенной электрической активности атмосферы, выдвигают проблему защиты людей и техники от опасных проявлений статического и атмосферного электричества.

В связи с этим возникает необходимость разработки научно обоснованных методик и аппаратурных средств, позволяющих с помощью многофазных многокомпонентных потоков оценить в наземных условиях эффективность молниеэлектростатической защиты элементов АТ, а также влияние коронного, стримерного и искрового разрядов на работу электрорадиооборудования ВС.

С этой целью, а также для исследования влияния электрического поля на процессы очистки и неразрушающего контроля деталей необходимо разработать генераторы ионов и аэрозольных частиц с большими объемными зарядами.

Цель работы заключается в разработке нового комплексного подхода к интенсификации, повышению пожаро- взрывобезопасности и экологической чистоты процессов обслуживания и ремонта АТ на основе многофазных многокомпонентных потоков.

Основные Задачи исследований. Для достижения указанной цели возникла необходимость решить следующие задачи:

1) провести теоретические оценки и экспериментальные исследования влияния внешних воздействий на процессы очистки и НК деталей и выявить основные закономерности этих воздействий;

2) разработать научно обоснованные методики расчета и конструкции ионных (ИЗГД) и аэрозольных (АЭГД) генераторов, используемых в качестве источников внешних воздействий и для искусственной электризации АТ;

3) исследовать условия для интенсификации технологических процессов очистки и неразрушающего контроля деталей с учетом физико-химических свойств обрабатываемых поверхностей и рабочий составов;

4) разработать научные основы определения предельных значений геометрических, электрических и гидрогазодинамических параметров при использовании в технологических процессах очистки и НК деталей АГД потоков с жидкой и твердой дисперсными фазами;

5) выполнить экспериментальные исследования параметров процесса очистки твердых поверхностей жидкими и твердыми аэрозольными частицами, переносимыми газовой струей, и влияния этих параметров на состояние обрабатываемой поверхности;

6) провести исследования процессов очистки изделий микроэлектроники и разработать концепцию создания чистых производственных помещений;

7) разработать и обосновать методики определения антистатических свойств материалов и наземных испытаний молниезлектрозащитической защиты элементов ВС с применением ЭГД потоков.

8) разработать методику и провести сравнительные исследования эффективности цветного контроля деталей при кистевом нанесении, во внешнем электрическом поле, электрически нейтральными и заряженными аэрозольными частицами жидких дефектоскопических материалов на водной основе;

9) разработать научные основы и методы обеспечения безопасных условий труда и экологической чистоты процессов очистки и НК промышленных изделий;

Методы исследований. В ходе работы используются методы технической диагностики, теории поверхностных и капиллярных явлений, кинетической теории жидкостей, экспериментальной физики при измерении гидрогазодинамических и электрических характеристик, феноменологические подходы при трактовке взаимодействий электрического поля с очищающими и дефектоскопическими материалами вблизи обрабатываемой поверхности, при измерении параметров высоковольт-

ных испытательных установок, численные методы решения уравнений электрогидродинамики, уравнений Лагранжа, Эйлера и Бюсселя при расчете значений напряженности поля в исследуемых разрядных промежутках и уравнений Навье-Стокса при движении жидкости в капилляре.

Научная новизна. Впервые разработаны научные основы и методы, позволяющие интенсифицировать процессы очистки и НК промышленных изделий с использованием аэрозольных газодинамических потоков.

К основным научным положениям, обладающим новизной, относятся построение моделей и расчет характеристик электрогазодинамических (ЭГД) генераторов, решение систем уравнений, описывающих движение ионной и электрически заряженной аэрозольной компонент в ЭГД потоке.

Обоснована возможность интенсификации процессов очистки, сушки изделий и проникающей способности дефектоскопических материалов в присутствии внешнего электрического поля и при использовании ЭГД потока частиц рабочего вещества.

Получены теоретические и экспериментальные зависимости для оценки влияния внешнего электрического поля и характеристик ЭГД генераторов на процессы очистки и НК деталей.

Получены основные закономерности интенсивности очистки от геометрических и газодинамических параметров с учетом дисперсных характеристик аэрозоля, которые положены в основу разработанных способов очистки с помощью газодинамических потоков, содержащих твердую (кристаллы льда) или жидкую (вода или водная суспензия) дисперсионную фазу.

Разработаны аэрозольные электрогидродинамические (АЭГД) способы очистки и НК деталей и обоснована возможность повышения их пожаробезопасности и экологической чистоты в результате эффективного использования водных очищающих и дефектоскопических материалов.

Разработаны установки и выполнены исследования эффективности очистки и НК конкретных видов деталей авиационной техники - электрооборудования воздушных судов (ВЗ), фильтроэлементов, лопаток турбин и компрессоров авиадвигателей, изделий микроэлектроники, позволившие разработать концепцию повышения пожаробезопасности и экологической чистоты процессов очистки и НК деталей путем исключения использования кислотных, щелочных составов, органических

растворителей, токсичных и пожароопасных дефектоскопических материалов и перехода на водные очищающие составы и дефектоскопические вещества на водной основе.

Сформулированы научно обоснованные требования к установкам для наземных испытаний средств молниезлеktростатической защиты ВС, разработаны и изготовлены устройства для определения антистатических свойств материалов и комплексы испытательных установок для оценки молниезащищенности элементов ВС в наземных условиях.

Новизна разработанных автором способов и средств интенсификации процессов очистки и НК деталей подтверждается 25 авторскими свидетельствами на изобретение. Подготовлены также материалы на предполагаемое открытие "Электрогидродинамический капиллярный эффект".

На защиту выносятся:

1. Совокупность моделей и аппаратурных средств для исследования очистки и НК деталей с помощью электрически нейтральных и заряженных газодинамических потоков с твердыми и жидкими аэрозольными частицами на водной основе, для определения антистатических свойств материалов и наземных испытаний молниезлеktростатической защиты ВС.

2. Теоретическое обоснование и результаты экспериментальных исследований зависимостей интенсивности очистки и НК от внешних воздействий, геометрических и газодинамических параметров.

3. Методики расчета параметров ионных и аэрозольных электрогазодинамических источников для очистки и НК деталей, а также при использовании их в качестве генераторов искусственного заряда.

4. Способы очистки деталей перед нанесением дефектоскопических материалов, защитных и декоративных покрытий твердыми и жидкими аэрозольными частицами, переносимыми газовой струей, и АГД, способы неразрушающего контроля.

Вклад автора состоит:

в разработке моделей и методик расчета параметров ЭГД потоков, оценки влияния внешнего поля и характеристик ЭГД потока на процессы очистки, сушки изделий и заполнения капиллярных несплошностей;

в разработке пожаробезопасных и экологически чистых спосо-

бов очистки и НК деталей с применением жидких и твердых аэрозольных частиц на водной основе;

в организации и разработке методик проведения экспериментов, анализе и обобщении полученных экспериментальных результатов;

в разработке методик и организации изготовления комплекса испытательных средств для определения антистатических свойств материалов и оценки молниезащитности элементов ВС ГА на основе многофазных многокомпонентных потоков;

в обсуждении и публикации результатов теоретических и экспериментальных исследований по данной проблеме.

Практическая значимость работы. Разработаны научно обоснованные методики расчета характеристик ионных и аэрозольных ЭГД генераторов, использованные при создании малогабаритных высокопроизводительных источников ионов и заряженных аэрозольных частиц на водной основе.

На основании проведенных исследований разработана установка для очистки авиационных деталей от старого лакокрасочного покрытия при ремонте авиационной техники.

Решения системы уравнений электрогазодинамики, анализ результатов проведенных экспериментов и статистических данных по опасным проявлениям статической электризации на предприятиях ГА положены в основу при разработке "Инструкции по снижению влияния статического электрического в технологических процессах обслуживания и ремонта авиационной техники" № 7/И, утвержденная 18.02.1986 г. и внедренная во всех эксплуатационных и ремонтных предприятиях ГА.

Научно обоснованная методика наземных испытаний молниезлектростатической защиты элементов ВС и созданные на основе разработанных автором технических требований испытательные установки используются для сертификации АТ.

Разработанные на базе исследований установки для очистки деталей АТ используются на авиаремонтных заводах № 21, № 410, №248, в/ч 13807 Иваново; при очистке судового электрооборудования (ПО "Арктика", Северодвинск); при очистке лопаток турбин авиадвигателей ("Моторостроитель", Запорожье). Методика АЭГД капиллярного контроля составами на водной основе используется при разработке установок для капиллярной цветной дефектоскопии в институте физической химии АН Украины, проект промышленной

установки для очистки изделий микроэлектроники реализован в НИИ ТОН (г.Киев).

Суммарный экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы, приходящийся на долю автора, в ценах 1992 года составляет 48,8 млн.крб.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на Всесоюзной конференции по прикладной аэродинамике (Киев, 1973 г.), Всесоюзной научно-технической конференции по безопасности полетов в условиях опасных внешних воздействий (Киев, 1981 г.), заседании секции IY "Электрофизика высоких напряжений" Научного Совета АН СССР (Киев, 1985 г.), Всесоюзном научно-техническом семинаре по вычислительным методам теоретической физики (Киев, 1986 г.), IY Всесоюзном рабочем совещании "Свойства жидкостей в малых объемах" (Киев, 1986 г.), у научной конференции "Проблемы охраны труда" (Рубежное, 1986 г.), III Всесоюзном симпозиуме по атмосферному электричеству (Тарту, 1986 г.), Всесоюзной конференции "Актуальные вопросы охраны труда и природопользования при авиатранспортных процессах" (Киев, 1987 г.), Всесоюзном семинаре "Опыт использования АГД потоков в технологических процессах очистки авиационных деталей" (Киев, 1988 г.), I Всесоюзном семинаре-совещании по электрогидродинамике жидких диэлектриков (Ленинград, 1989 г.), Всесоюзном семинаре "Пассивная локация грозовых очагов" (Рига, 1989 г.), V Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (Москва, 1991 г.), Международной конференции по проблемам очистки деталей под защитные и декоративные покрытия (Вестин, ЧССР, 1990 г.), IY Всесоюзном симпозиуме по атмосферному электричеству (Нальчик, 1990 г.) и др.

Публикации по работе. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 66 печатных работах, включающих монографию, учебное пособие, 25 авторских свидетельств на изобретение.

На рассмотрении в Госкомитете по делам изобретений и открытий находятся материалы открытия "Электрогидродинамический капиллярный эффект".

Структура и объем диссертация. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных результатов работы, списка литературы, приложения и содержит 356 страниц машинописного текста, 76 страниц рисунков, 20 страниц приложения. Библиографический список включает 190 наименований литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Показана важность выполненных в работе исследований по проблемам интенсификации производственных процессов на основе многофазных многокомпонентных потоков.

Сформулированы цели проведенных исследований, их научная новизна и практическая ценность.

Теоретическое обоснование способов интенсификации процессов очистки и НК деталей (глава I) связано с решением задач электрогазодинамики, занимающейся изучением движения униполярно заряженных или поляризованных сред в электрическом поле.

Отмечено, что вопросы применения ЭГД течений для интенсификации технологических процессов очистки, мойки, дефектоскопии деталей до настоящего времени не рассматривались.

Для теоретической оценки влияния аэрозоля и скорости воздушного потока на характеристики ЭГД течения в промежутке между генератором заряженных частиц и обрабатываемой поверхностью была решена в одномерной постановке система уравнений, описывающая стационарное движение трехкомпонентной среды - нейтрального газа, ионов и аэрозольных частиц. При условии пренебрежимо малого влияния электрической объемной силы на гидродинамику потока система принимает вид:

$$\frac{1}{r^{\lambda}} \frac{d}{dr} \left[r^{\lambda} n \left(\frac{zE}{F} + V_r \right) \right] = 0; \quad (1)$$

$$\frac{1}{r^{\lambda}} \frac{d}{dr} \left[r^{\lambda} q_i (v_i E + V_r) \right] + \mathcal{J} v_i A n q_i |E| \left(1 - \frac{z}{4\pi \epsilon_0 A |E|} \right)^2 = 0; \quad (2)$$

$$\frac{1}{r^{\lambda}} \frac{d}{dr} \left[r^{\lambda} n z \left(\frac{zE}{F} + V_r \right) \right] - \mathcal{J} v_i A n q_i |E| \left(1 - \frac{z}{4\pi \epsilon_0 A |E|} \right)^2 = 0; \quad (3)$$

$$\frac{1}{r^{\lambda}} \frac{d^2(r^{\lambda} y)}{dr^2} = -(q_i + n z) / \epsilon. \quad (4)$$

Здесь V_r - скорость газа; E, φ - напряженность и потенциал электрического поля; v_i, q_i - подвижность и плотность объемного заряда ионов, z, n - заряд и числовая плотность частиц; $F = 6\mathcal{J} \mu a$ - сила сопротивления Стокса, где μ - динамический коэффициент вязкости; a - радиус частицы; $A = [3\epsilon_0 / (\epsilon_r + \epsilon)] a^2$, где ϵ_0, ϵ - диэлектрические проницаемости частицы и газовой среды.

Для ЭГД течения между плоскими электродами $\alpha = 0$, $\Gamma = X$; для электродов в виде коаксиальных цилиндров $\alpha = 1$.

Предполагалось, что ЭГД поток образован униполярным коронным разрядом между плоскими сетчатыми электродами, гидродинамическим переносом ионов и аэрозольных частиц со скоростью U_0 , причем электрическая подвижность последних пренебрежимо мала.

В этом случае система (I)...(4) в безразмерном виде может быть представлена следующими выражениями:

$$(\bar{E} + R_3) \frac{d\bar{E}}{d\bar{X}} = Q + \Omega(1 - \bar{\Psi})\bar{E}^2; \quad (5)$$

$$(1 - \bar{\Psi}) \frac{d\bar{E}}{d\bar{X}} - \bar{E} \frac{d\bar{\Psi}}{d\bar{X}} = \frac{\bar{J}_0}{R_3} \bar{E} \bar{\Psi}^2 - \Omega \bar{E}(1 - \bar{\Psi}). \quad (6)$$

где $X = X/L$; $\bar{E} = E/E_K$; E_K - начальная напряженность электрического поля; L - расстояние между электродами; $R_3 = U_0/\bar{v}_t E_K^2$ - электрическое число Фейнольдса; $Q = j_0 L / \bar{v}_t E_K^2$ - параметр, характеризующий степень заряженности потока; $\Omega = \eta AL$ - параметр запыленности потока частицами; j_0 - плотность результирующего тока; $\bar{\Psi} = 1 - Z/4\pi\epsilon_0 A |E|$.

Начальные условия задачи:

$$\bar{\Psi} = \bar{\Psi}_0; \quad \bar{E} = 1 \text{ при } \bar{X} = 0.$$

Результаты решения системы свидетельствуют, что по мере удаления от генератора частиц и увеличения степени заряженности потока напряженность поля возрастает (рис.1; кривые 1 - $Q = 40$, 2 - $Q = 2$, 3 - $Q = 1$) и достигает максимального значения вблизи обрабатываемой поверхности.

Как показали расчеты, степень заряженности Q вблизи исследуемой поверхности возрастает с увеличением скорости ЭГД потока (рис.2, кривые 1 - $R_3 = 1,4$; 2 - $R_3 = 1$; 3 - $R_3 = 0,6$; 4 - $R_3 = 0$), причем относительный заряд частиц $\bar{Z} = 1 - \bar{\Psi}$ растет с ростом перенапряжения η (кривые 5 - $R_3 = 0,6$; 6 - $R_3 = 1$; 7 - $R_3 = 1,4$).

Таким образом, для усиления эффекта внешнего воздействия, обусловленного напряженностью электрического поля, необходимо увеличивать степень заряженности, перенапряжение коронного разряда и скорость аэрозольного электрогазодинамического потока.

Как показали расчеты, для изменения поверхностных свойств рабочих составов на основе воды требуется достаточно высокие на-

пряженности электрического поля. Задача создания сильных электрических полей может быть решена на основе использования принципиально новых устройств и процессов.

С этой целью были разработаны сверхзвуковые зарядные устройства ионв и заряженных аэрозольных частиц.

На основании проведенных расчетов характеристик ЭГД потока и исследованных автором критериальных соотношений для коронного разряда с острия получена обобщенная редуцированная характеристика коронного разряда в зарядном устройстве ионного электрогазодинамического источника в виде:

$$\bar{I} = \frac{I d_K}{2 \varepsilon \beta^* U_K^2 (m + R_3^*)} = f(m-1),$$

где d_K - диаметр критического сечения сверхзвукового сопла;

$\beta^* = \beta_H \rho_H / \rho^*$ ρ^* - средняя плотность воздуха, равная полусумме плотностей воздуха в месте установки вершины острия и на срезе зарядного устройства, определяемых по формулам адиабатического течения газа; β_H , ρ_H - соответственно подвижность и плотность газа при нормальных условиях; U_K - напряжение начала коронирования острия; R_3^* - электрическое число Рейнольдса.

$$R_3^* = \frac{V_{cp} d_K}{2 \beta^* U_K};$$

$$V_{cp} = M_{cp} \sqrt{k R T_0} / \sqrt{1 + \frac{k-1}{2} M_{cp}^2},$$

где M_{cp} - среднее значение числа Маха, равное полусумме чисел Маха в месте установки острия M_K и на срезе сопла M ; T_0 - абсолютная температура газа на входе в сопло, R - универсальная газовая постоянная; k - показатель адиабаты.

Высокой степенью заряженности аэрозольного потока и простотой конструкции отличается сверхзвуковое аэрозольное зарядное устройство с индукционной электризацией частиц на водной основе.

С помощью π - теоремы получены в безразмерном виде основные параметры, характеризующие аэрозольное электрогазодинамическое зарядное устройство:

$$\bar{I} = \frac{I}{\lambda_{ж} (R^*)^2} \left(\frac{\varepsilon_{ж}}{\rho_0} \right)^{1/2}; \quad U = \frac{U}{R^*} \left(\frac{\varepsilon_{ж}}{\rho_0} \right)^{1/2}; \quad \bar{\rho}_0 = \frac{\rho_0}{\rho}; \quad \pi = \frac{\rho_0}{\rho_{0,расч}};$$

$$\bar{Q} = \frac{Q \lambda_{ж}}{\varepsilon_{ж} \rho_0 R^*}; \quad \bar{Q} = \frac{I}{Q} \left(\frac{\varepsilon_{ж} \rho_0}{R^* \lambda_{ж}^2} \right)^{1/2}, \quad \bar{L} = \frac{L}{R^*}.$$

Здесь $\lambda_{ж}$, $\epsilon_{ж}$ - соответственно проводимость и диэлектрическая проницаемость жидкости; P_0 , P - абсолютные давления соответственно на входе в сопло и в окружающей среде; P_* - давление на входе в сопло, соответствующее расчетному режиму работы сверхзвукового сопла;

$$R^* = \frac{R_K + R_B - 2Z_p}{2}, \quad \text{где } R_K, R_B - \text{соответственно}$$

радиусы критического и выходного сечений сопла; Z_p - радиус распылителя; \bar{Q} - безразмерный параметр, характеризующий отношение расходов рабочей жидкости и газа; \bar{L} - безразмерный параметр, характеризующий геометрию зарядного устройства; \bar{q} - безразмерный параметр, характеризующий электризуемость жидкости; n , L - степень нерасчетности и длина сверхзвуковой части сопла.

Получены обобщенные безразмерные выражения для расчета электрических характеристик АЭГД генераторов в зависимости от геометрии и газодинамических характеристик зарядных устройств.

В главе 2 проанализированы традиционные методы очистки погружением деталей в моющие растворы. Рассмотрен механизм мощного действия. В соответствии с современными представлениями мощи эффект является результатом проявления комплекса физико-химических свойств мощного состава, т.е. растворяющей, смачивающей, эмульгирующей, диспергирующей, стабилизирующей и пленкообразующей способности.

На основе анализа эффективности электрохимических, электрофизических и механических (пнеumo-гидроабразивного) способов очистки отмечается, что указанные способы имеют недостатки, присущие очистке растворителями. Кроме того, электрохимический, ультразвуковой и гидроабразивный способы очистки обладают высокой энергоемкостью, повышенной электроопасностью и загазованностью, а в случае применения ультразвуковой очистки возникает опасность воздействия на работающих ультразвуковых колебаний. К недостаткам пнеumo-гидроабразивных способов очистки относятся большие расходы очищаемых веществ, повышенные уровни шума и др.

В связи с имеющимися недостатками перечисленных выше традиционных методов очистки деталей в диссертационной работе ставится задача разработки методов очистки, отвечающих требованиям высокой мощи способности по отношению к удаляемому загрязнению.

отсутствия разрушающего действия на очищаемую поверхность и токсичного действия на работающих, пожарной и взрывной безопасности и отсутствия неблагоприятного воздействия на окружающую среду.

Эксперименты показали, что эффективность мойки можно повысить путем изменения физических свойств моющих жидкостей и значения действующей силы с помощью электрического поля.

На основании закона Кулона с учетом теоремы Гаусса для контактной области, соответствующей моменту возникновения поперечного растекания жидкости в капле после соударения с очищаемой поверхностью, получено выражение для силы взаимодействия частицы радиусом a с поверхностью:

$$F = 0,5 \pi \epsilon_0 \epsilon \left(a E V_0 / C \right)^2,$$

откуда следует, что сила, обусловленная действием электрического поля в заряженном аэрозольном потоке, пропорциональна квадрату напряженности поля и скорости потока частиц; C - скорость распространения звука в жидкости.

Для мойки поверхностей с помощью аэрозольного газодинамического и аэрозольного электрогазодинамического потоков был разработан генератор заряженных аэрозольных частиц (АЭГД генератор). Методика расчета характеристик зарядного устройства АЭГД генератора приведена в главе I. В случае необходимости АЭГД генератор можно использовать в качестве источника ионов, образующихся в поле коронного разряда между острыми кромками распылителя и соплом при отсутствии или пренебрежимо малых расходах моющей жидкости. Для получения больших удельных зарядов частиц необходимо, чтобы время релаксации было меньше времени движения струйки от корневого сечения до момента распада. Указанное условие выполняется при использовании в качестве рабочей жидкости дистиллированной воды с небольшой добавкой (до 1 % по объему) ПАВ.

Эффективность мойки заряженным потоком водного аэрозоля определялась по весовому количеству маслянистого загрязнения, а также по времени очистки фиксированной площади загрязнения поверхности.

Было оценено влияние на эффективность АЭГД мойки физико-химических, электрических, газодинамических, геометрических, тепловых и дисперсных характеристик АЭГД потока.

Максимальный эффект мойки достигался при расстоянии от поверхности до среза сопла $l = 0,03...0,09$ (рис.3, кривая 1) и угла наклона исследуемой поверхности к продольной оси струи $\alpha = 50...70^\circ$ (кривая 2), причем эффективность мойки заряженным аэрозолем (рис.4, кривая 1) выше по сравнению с нейтральным (кривая 2) и существенно повышает эффективность мойки жидкостной форсункой (кривая 3).

Получены и обоснованы предельные режимы по расходу жидкости $Q_{ж} \geq 2$ г/с, давлению газа на входе в сопло $P \geq 0,25$ МПа, полезному току АЭГД зарядного устройства $I \geq 2 \cdot 10^{-5}$ А, по температуре аэрозольного потока $t_a \geq 15^\circ\text{C}$.

В условиях производства повышение эффективности мойки по сравнению, например, с ультразвуковой очисткой было достигнуто при мойке фильтроэлементов (ФЭ). Время пролива после промывки ФЭ АЭГД способом уменьшалось в 2...9 раз электрооборудования ВС и др.

Для удаления твердых и прочных загрязнений был предложен способ очистки с применением моющих составов на основе суспензий глины, мела и других мелкодисперсных абразивных частиц - аэрозольный газодинамический суспензионный (АГДС) способ очистки. При этом повышается кинетическая энергия удара и поперечного растекания суспензии в результате повышения как скорости, так и плотности моющего вещества.

Созданные промышленные установки для АГДС включают операции очистки или мойки изделий рабочей суспензией, промывку чистой промывочной жидкостью, например, дистиллированной водой с ингибитором и сушку изделия подогретым до $90...100^\circ\text{C}$ воздухом.

Опыты на лопатках авиадвигателей из титановых и жаропрочных сплавов показали, что после очистки АГДС способом значения микротвердости, остаточных напряжений и газонасыщенности обработанных участков поверхности практически не изменились.

На основании результатов экспериментов (рис.5,6) установлены предельные значения основных характеристик АГДС способа обработки деталей. Расход жидкости составляет $(0,5...2) \cdot 10^{-2}$ кг/с рис.5, кривая 2; давление газа на входе в сверхзвуковое сопло $0,25...0,4$ МПа (кривая 1); расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности не $> 0,1$ м (рис.6, кривая 1).

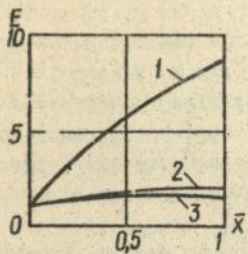


Рис.1

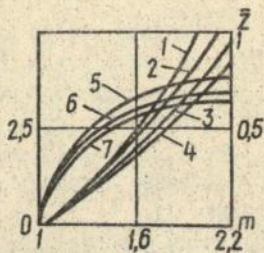


Рис.2

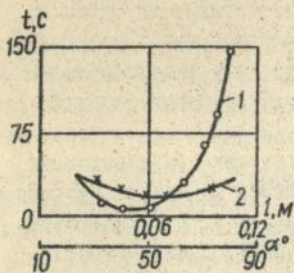


Рис.3

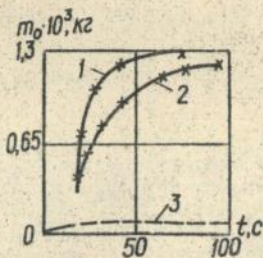


Рис.4

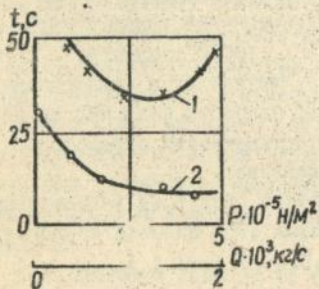


Рис.5

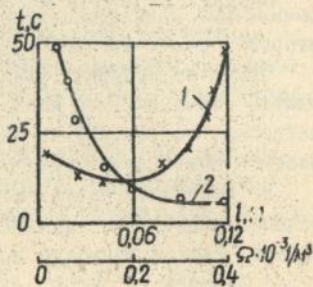


Рис.6

Концентрация твердых частиц в суспензии зависит от твердости и прочности загрязнения и находится в диапазоне 1:2...1:5 (кривая 2). При мойке деталей от маслянистых загрязнений, пыли и других непрочных загрязнений объемные соотношения твердой и жидкой фаз должны составлять 1:10 до 1:80.

В результате исследований адсорбционных свойств рабочих составов, предложенных для пневмосуспензионной очистки деталей, показано, что в присутствии глины, являющейся основным компонентом рабочих составов, адсорбирующая способность водных растворов по отношению, например, к фенолу повышается примерно на 3 порядка, а по отношению к тяжелым металлам, например, к солям свинца — примерно на порядок.

Небольшие расходы рабочей суспензии по сравнению, например, с гидробразивной очисткой, исключение применения органических растворителей, токсичных и пожароопасных жидкостей, установленные в работе высокие сорбционные свойства применяемых для суспензии глины свидетельствуют о высокой экологической чистоте и пожаробезопасности АГДС очистки.

Как показали предварительные исследования, применение АГДС способа нецелесообразно для такой трудоемкой операции, как очистка изделий от лакокрасочных покрытий (ЛКП). Наиболее эффективным пожаробезопасным и экологически чистым является процесс очистки изделий от ЛКП с помощью высокоскоростного потока ледяных гранул, полученных при замораживании водяных капель, например, в среде жидкого азота ($T = 80^{\circ}\text{K}$).

При скоростях соударения частиц с поверхностью ≥ 100 м/с локальный нагрев зоны контакта составляет $500...600^{\circ}\text{C}$. Плавление льда в зоне контакта приводит к появлению кумулятивных струек жидкости из-под гранулы, причем скорость этих струек в силу закона о постоянстве массового расхода жидкости может в 5...6 раз превышать скорость соударения, что способствует разрушению ЛКП.

Изменение характеристик потока вдоль оси струи было оценено в результате решения системы уравнений движения двухфазной среды, состоящей из воздуха и твердых частиц (ледяных гранул):

$$V_a \frac{dV_a}{dX} = \varphi_1 (V_g - V_a);$$

$$V_a \frac{dT_a}{dx} = \psi_2 (T_8 - T_a).$$

Здесь V_a , T_a - скорость и температура частицы; V_8 , T_8 - соответственно скорость и температура воздуха.

Экспериментальная оценка влияния газодинамических, геометрических параметров и дисперсных характеристик аэрозоля производилась на установке, включающей генератор жидкого аэрозоля, устройство для размельчения, транспортировки и сепарации ледяных гранул, накопителя монодисперсных ледяных частиц, эжекторное газовое устройство, магистраль для подачи ледяных гранул к обрабатываемой поверхности, устройство для измерения скорости ледяных гранул.

Эффективность процесса очистки ледяными гранулами оценивалась по массе частиц, а также по времени очистки единичной контрольной поверхности.

Результаты экспериментов (рис. 7...10) позволили определить предельные значения параметров процесса очистки деталей от ЛКП ледяными гранулами: $\alpha = 45^\circ \dots 70^\circ$ (рис. 7, кривая 1); $l = 0,05 \dots 0,1$ м (кривая 2); $P = 0,5 \dots 0,55$ МПа (рис. 8); $\Omega = (1 \dots 2) \cdot 10^6$ $1/\text{м}^3$ (рис. 9) при $D = 0,3 \dots 1,25$ мм; $G = 0,025 \dots 0,05$ кг/с (рис. 10).

Научно-технический прогресс в народном хозяйстве невозможен без широкого применения микроэлектроники, основу которой составляют микросхемы. Свойства формируемых элементов и электрофизические свойства границ раздела контактирующих фаз существенно зависят от качества очистки поверхности элементов и структур микроэлектроники от загрязнений различной природы (глава 8).

В работе проведен анализ существующих методов очистки от загрязнений как антропоного, так и производственного характера. Указаны их недостатки и делается вывод о необходимости разработки более экологически чистых и безопасных методов очистки. Отработка процесса на основе АГД потоков жидких или двухфазных мелкодисперсных частиц моющего вещества производилась на экспериментальном стенде, обеспечивающем операции очистки, промывки дистиллированной водой и активной сушки поверхности потоков подогретого воздуха.

Эффективность очистки оценивалась по скорости очистки пластины из светочувствительного диэлектрика размером $0,044 \times 0,11$ м и адгезии поверхности по отношению к покрытию, выраженной в граммах вещества на 2 мм длины пластины. Максимальная эффективность

достигалась при следующих параметрах процесса: $P = 0,25 \dots 0,27$ МПа; $G = (1 \dots 2) \cdot 10^{-3}$ кг/с; $L = 0,04 \dots 0,06$ м; $\alpha = 90^\circ$, объемное соотношение твердой и жидкой фаз 1:5.

Для получения требуемой адгезии должна быть обеспечена необходимая шероховатость обрабатываемой поверхности (рис. II). Эксперименты показали, что применение 1...2 % ПАВ (кривая 1) в рабочем составе уменьшает максимальную шероховатость поверхности примерно в 1,4 раза (кривая 2), однако в 1,25 раза уменьшает максимальную адгезию (кривая 3) по сравнению с составом без ПАВ (кривая 4). Скорости протяжки пластины для достижения максимальной адгезии составляют 2...3 мм/с.

В результате быстрого развития современной микроэлектроники и точного приборостроения предъявляются повышенные требования к точности изготовления, качеству и надежности выпускаемой продукции. Необходимым условием выполнения этих требований является создание особо чистых, стерильных условий в производственном помещении. Уровень чистоты производственных помещений определяется количеством аэрозольных частиц в единице объема.

Общее изменение количества аэрозолей в производственном помещении можно представить в виде:

$$Vdc = [M - (C - C_0)Q_0 - c\eta Q_\Phi] dt, \quad (7)$$

где M - количество выделяющегося в помещении аэрозоля, мг/ч; C_0 , Q_0 - соответственно концентрация частиц и расход приточного воздуха; C_Φ , Q_Φ - концентрация аэрозоля после фильтрации, мг/м³ и расход фильтруемого воздуха, м³/ч; η - коэффициент фильтрации.

После интегрирования (7) получаем выражение для концентрации C аэрозолей в производственном помещении:

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{Q_0 + \eta Q_\Phi}{V} t\right) + \frac{C_0 Q_0 + M}{Q_0 + \eta Q_\Phi} \left[1 - \exp\left(-\frac{Q_0 + \eta Q_\Phi}{V} t\right)\right].$$

В стационарном состоянии ($t \rightarrow \infty$) $C_{t \rightarrow \infty} = (C_0 Q_0 + M) / (Q_0 + \eta Q_\Phi)$.

На основании выполненных расчетов сравнительного анализа существующих и предложенных способов очистки изделий микроэлектроники, а также воздействующих на человека опасных и вредных производственных факторов обоснованы требования и условия для разработки концепции чистых производственных помещений.

При работе с микроэлектронными изделиями, при очистке дета-

лей и многих других процессах обслуживания и ремонта АТ одной из важнейших проблем является защита от статического электричества.

В главе 4 на основании проведенных теоретических, лабораторных, аэродрожных и летных испытаний разработаны способы и средства, предотвращающие или исключаящие опасные проявления электризации с помощью многофазных многокомпонентных потоков.

При электростатической защите человека в основу положена математическая модель электризации человека, определяемой после бесконечного числа шагов, выражением:

$$Q_{\infty} = \Delta Q [1 - \exp(-\Delta t/RC)]^{-1}$$

где ΔQ - начальный заряд человека, Δt - время между двумя последующими шагами, R - переходное сопротивление "человек-земля", C - емкость человека относительно земли.

Разработаны и обоснованы методики наземных испытаний молниеэлектростатической защиты ВС ГА с использованием различных способов имитации коронных, стримерных и искровых разрядов в наземных условиях с применением многофазных многокомпонентных потоков.

Рост парка машин, совершенствование их конструкции, необходимость увеличения сроков их службы вызывает увеличение объема дефектоскопического контроля деталей этих машин.

В отличие от вновь изготавливаемых, детали, бывшие в эксплуатации, имеют лакокрасочные, силикатные, эмалевые и др. покрытия, окисные пленки, различные отложения на поверхности деталей (нагар, коррозия, накип, загрязнения), механические повреждения (забоины, риски, трещины), эрозийные повреждения.

В связи с этим перед проведением НК должны быть проведены достаточно трудоемкие подготовительные работы, научные основы и пути интенсификация которых рассмотрены выше.

В главе 5 работы проведен анализ применяемых методов НК.

Отмечены преимущества капиллярной дефектоскопии: высокие чувствительность и разрешающая способность, возможность контроля деталей из любых материалов и любой формы, наглядность результатов контроля, универсальность и простота основных технологических операций, невысокая стоимость и доступность дефектоскопических материалов.

В то же время капиллярные методы обладают рядом существенных недостатков: невозможность обнаружения дефектов на загряз-

ненных поверхностях и в результате высокая трудоемкость операций контроля, токсичность и пожаровзрывоопасность дефектоскопических материалов, ультрафиолетовое излучение при работе в ультрафиолетовом свете.

Таким образом, актуальной задачей в капиллярной дефектоскопии является повышение экологической чистоты и пожаровзрывобезопасности процесса. Одной из основных проблем, решению которой посвящена глава 5, является повышение проникающей способности дефектоскопических материалов, например, с помощью принудительных внешних воздействий на основе многофазных многокомпонентных потоков.

Предложенные в настоящее время пожаровзрывобезопасные, нетоксичные материалы и методы интенсификации с помощью ультразвука и переменного магнитного поля для цветного капиллярного контроля не могут обеспечить такую же высокую чувствительность, как пенетранты на органической основе - выявление дефектов с раскрытием < 1 мкм (для составов на водной основе - 2...3 мкм).

Результаты исследований показали, что под действием электрического поля происходит уменьшение поверхностного натяжения жидкостей, влияющее на процессы смачивания и растекания.

Движение жидкости в капиллярах описывается уравнением Навье-Стокса для несжимаемой ньютоновской жидкости:

$$-\mu \nabla \times \nabla \times \vec{V} - \nabla p + \rho \vec{f} = \rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla (\vec{V})^2 \right],$$

где μ - коэффициент динамической вязкости; ∇p - градиент давления; ρ - плотность жидкости; \vec{f} - массовая сила.

Пренебрегая членом $\rho \vec{f}$, поскольку $|\rho \vec{f}| \ll |\nabla p|$, начальной стадии заполнения, которая продолжается тем меньше, чем меньше поперечный размер капилляра τ , движение жидкости в капилляре можно представить уравнением:

$$-\mu \nabla \times \nabla \times \vec{V} = P_K / l.$$

Здесь P_K / l - градиент давления ($P_K = 2 \cos Q / \tau$, l - глубина заполнения, Q - краевой угол смачивания).

Для сквозных и тупиковых капилляров движение жидкости в капиллярах с учетом давления электрических сил на границе фаз жидкость - твердая поверхность можно представить соответствующими уравнениями:

$$\ell' = z^2 (2\sigma \cos \theta / z + P_e) / (8\mu \ell); \quad (8)$$

$$\ell' = z^2 (2\sigma \cos \theta / z + P_e - P_a \frac{\ell}{\ell_0 - \ell}) / (8\mu \ell), \quad (9)$$

где ℓ - координата движущегося мениска жидкости в данный момент времени; t - время движения мениска от начала капилляра; $P_e = 0,5 \xi \xi_0 E^2$ (E - напряженность поля на поверхности капилляра); P_a - атмосферное давление; ℓ_0 - длина тупикового капилляра.

При начальном условии $t = t_0$ у поверхности время заполнения сквозного t_c и тупикового t_m капилляров может быть представлено соответствующими зависимостями:

$$t_c = 4\mu \ell^2 [z^2 (P_K + P_e)]^{-1}$$

$$t_m = 8\mu \ell_0^2 \psi [y_0^2 (1 - \psi) (y_0 + \psi \ell_0 \frac{\psi - y_0}{\psi})] [z^2 (P_K + P_e)]^{-1},$$

где $\psi = (P_K + P_e) / (P_K + P_e + P_a)^{-1}$; $y_0 = \ell / \ell_0$.

Как известно, в местах разрыва сплошности при радиусе ее округления $\ll 10^{-4}$ м напряженность поля у кромки увеличивается примерно на два порядка по сравнению с гладкой поверхностью, что может привести к повышению давления P_0' , способствующему продвижению жидкости в капилляр.

Указанное предположение подтверждается расчетами скорости заполнения с помощью выражений (8) и (9), результаты которых представлены на рис. 12 (кривая 1 - сквозной, кривая 2 - тупиковый капилляры).

Влияние напряженности электрического поля на время заполнения сквозных и тупиковых капилляров с разным раскрытием показано соответственно на рис. 13, 14 1 - $5 \cdot 10^5$ В/м; 2 - $5 \cdot 10^6$ В/м; 3 - 10^7 В/м; 4 - $5 \cdot 10^7$ В/м; 5 - 10^8 В/м, откуда следует, что эффект влияния напряженности электрического поля наиболее выражен для капилляров с раскрытием $z \ll 2 \cdot 10^{-6}$ м. Так, для капилляра с $z \ll 10^{-6}$ м время заполнения капилляра сокращается примерно в 8...10 раз.

Экспериментальная оценка влияния электрического поля на скорость заполнения и процессы смачивания производилась на модельном капилляре, образованном соединением плоских металличе-

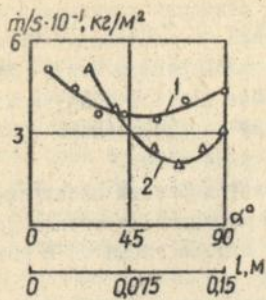


Рис. 7

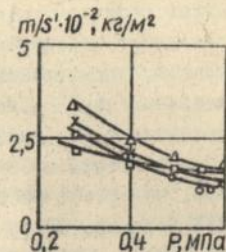


Рис. 8

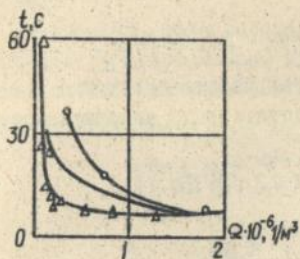


Рис. 9

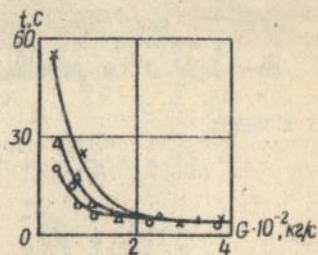


Рис. 10

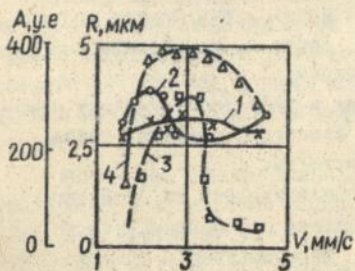


Рис. 11

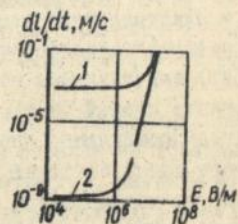


Рис. 12

ких пластин. По степени сжатия пластин и размерам калиброванных вставок между пластинами определяли размеры несплошности. Туниковые капилляры получали, закрывая герметиком зазоры между пластинами по периметру. Электрическое поле создавал сь между игольчатым электродом, подключенным к источнику электрического питания и заземленными через измеритель тока пластинами.

Для сравнительной оценки значений напряженности электрического поля вблизи острия и на исследуемой поверхности решено уравнение Лапласа, которое в рассматриваемом случае сводится к решению уравнений Бесселя, Эйлера и Лежандра.

Решение задачи в сферической системе координат τ, β, θ о распределении потенциала между игольчатым электродом и исследуемой поверхностью при рабочем напряжении U_0 имеет вид:

$$\varphi = U_0 + Cz^n (1 + 2n \ln \sin \frac{\beta}{2});$$

Здесь C - постоянная интегрирования. $n = (2 \ln \frac{2}{\beta_0})^{-1}$,

где β_0 - угол полураствора конуса игольчатого электрода.

Так как $E = -\nabla\varphi$, получаем составляющие напряженности поля в виде:

$$E_n = -\frac{\partial\varphi}{\partial\tau} = -Cnz^{n-1} (1 + 2n \ln \sin \frac{\beta}{2});$$

$$E_\beta = -\frac{1}{\tau} \frac{\partial\varphi}{\partial\beta} = -Cnz^{n-1} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}.$$

Учитывая необходимость перевода технологических процессов НК на нетоксичные и пожаровзрывобезопасные составы для экспериментов были выбраны составы на водной основе, включающие дистиллированную воду, красители, ПАВ и др. добавки, изменяющие поверхностные и электрические свойства составов.

Смачивающая способность очищающих и дефектоскопических материалов (ДМ) определялась по скорости изменения диаметра пятна, образованного каплей на твердой поверхности.

Оценка проникающей способности производилась по размерам окрашенного пятна остатков водного состава с фиксированным объемом в полости модели после нанесения, выдерживания в течение определенного времени, удаления остатков и сушки в потоке подогретого воздуха. При этом учитывалась возможность частичного испарения жидкости при воздействии на нее электрического поля.

Влияние поля E на время заполнения t_n / t_0 (t_n - время проникновения в присутствии поля, t_0 - то же без поля иллюстрируется графиками на рис.15, откуда следует, что большее влияние поля наблюдается для капилляров с меньшим раскрытием, причем влияние поля становится заметным при $E > 10^8$ В/м, когда появляется ток в цепи коронного разряда.

Справедливость выбранной методики исследований подтверждается качественным совпадением результатов экспериментов (кривая 1, 2, 3 соответственно для полуоткрытия капилляров $z \cdot 10^6 = 0,75$ м; 5 м; 10 м (с расчетными данными) кривая 4 для $z \cdot 10^6 = 0,75$ м).

Увеличение тока коронного разряда (при токе $\approx 5 \cdot 10^{-5}$ А напряженность поля у острия составляла $E = 4 \cdot 10^8$ В/м, приводило к практически линейному возрастанию площади растекания капли (рис.16).

Полученные экспериментальные зависимости аппроксимировались выражениями в безразмерном виде, описывающими процесс заполнения соответственно сквозных и тупиковых капилляров в присутствии электрического поля:

$$\bar{t}_c = 1,7 k \bar{z}^{-0,58} \bar{E}^{-1};$$

$$t_m = 3,9 k \bar{z}^{-0,46} \bar{E}^{-1,3}$$

Здесь $\bar{t}_c = t_c \bar{v} / \mu \ell$; $\bar{t}_m = t_m \bar{v} / \mu \ell$; $\bar{z} = z / \ell$;
 $\bar{E} = E / E_K$ (E_K - начальная напряженность коронного разряда; $K = 10^4$)

Анализ экспериментальных данных показал, что при обеспечении заданной чувствительности внешнее воздействие в виде неоднородного электрического поля позволяет сократить в 5...8 раз время цветного НК деталей, причем используются экологически чистые, пожаро- и взрывобезопасные дефектоскопические составы на водной основе.

Процесс загрождения несплошностей можно интенсифицировать, обрабатывая поверхность высокоскоростным потоком нейтральных или заряженных частиц дефектоскопических материалов. Напряженность поля в этом случае определяется зарядом и количеством частиц в потоке.

С учетом давления газовой струи, определяемого газодинамическим напором $\Delta P = \rho_g c_g V_g$ (ρ_g - плотность газа, c_g - скорость звука в газовой среде, V_g - скорость газового потока и давлением ΔP_2 , обусловленного влиянием электрического поля

объемного заряда аэрозольных частиц выражения для времени заполнения соответственно сквозного t_c и тупикового t_m капилляров могут быть представлены в виде:

$$t_c = 3\mu \ell^2 / [z^2 (P_K + \Delta P')],$$

$$t_m = 6\mu \ell_0^2 \Psi [(\psi_0^2/2 - (1-\Psi)(\psi_0 + \psi \ell_0 \frac{\psi - \psi_0}{\psi}))][z^2 (P_K + \Delta P')]^{-1}$$

где $\Delta P' = \Delta p + \Delta p_e$; $\Psi = (P_K + \Delta P')/(P_K + P_0 + \Delta P')$; $\psi_0 = \ell/\ell_0$

На основании анализа теоретических исследований и результатов экспериментов на каждой из стадий НК была разработана универсальная установка для подготовки поверхности и проведения НК нейтральным и заряженным аэрозольным потоком (рис.17).

Стенд содержит защищенный авторским свидетельством источник нейтральных и заряженных аэрозольных частиц очищающих и дефектоскопических материалов, образующихся при дроблении в сверхзвуковом газовом сопле II жидкости, истекающей из распылителя IO. Для получения заряженных частиц между распылителем и соплом создается разность потенциалов с помощью источника питания 9. В момент дробления под действием электрического поля происходит индукционная электризация аэрозоля.

Контроль напряжения между распылителем и соплом осуществляется при помощи киловольтметра 8. Ток в цепи заземления обрабатываемой детали 6 измеряется микроамперметром 7. Сжатый воздух в сопло поступает от компрессора I через нагреватель 3 под давлением, контролируемым манометром 4.

Последовательная подача проникающего, моющего и проявляющего составов производится соответственно из резервуаров I3, I4, I5. Жидкость через расходомеры I2 поступает в распылитель под действием эжекции или под давлением сжатого воздуха, поступающего через обратный клапан 2 в резервуары от компрессора. Для контроля температуры аэрозольной струи служит помещенная в струю термомпара измерительного прибора 5.

Параметры, определяющие заполнение, были приведены к безразмерному виду $\bar{P} = P_0/P_B$ (P_0, P_B - давление соответственно на входе в сопло и на выходе из него, МПа; $\bar{L} = L/R_B$ (L - расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности; R_B - радиус выходного сечения сопла; $\bar{\ell} = \ell/\ell_0$; $\bar{V} = V/V_0$ - параметры, характеризующие степень заполнения капилляров (ℓ - глу-

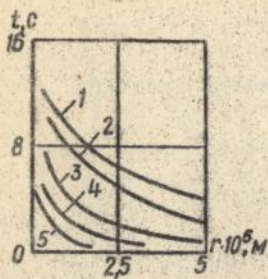


Рис.13

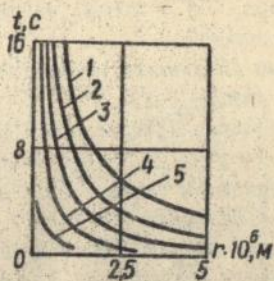


Рис.14

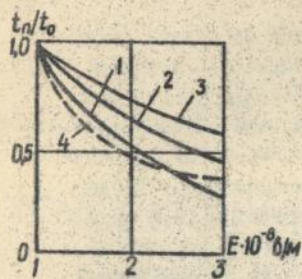


Рис.15

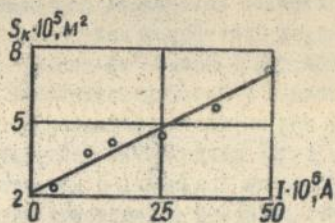


Рис.16

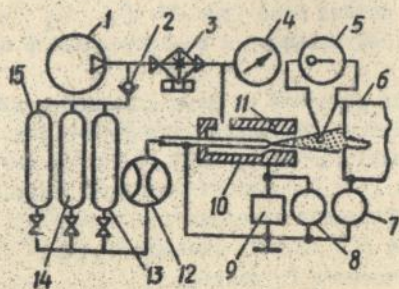


Рис.17

бина капилляра; V - объем, занимаемый жидкостью в полости;
 V_0 - объем полости.

Основные результаты исследований проникающей способности показаны на рис.19...23.

При обработке нейтральным АГД потоком (рис.18) проникающая способность \approx в 2...2,5 раза выше (кривая 1) по сравнению с кистевым нанесением (кривая 2). Значение ее достаточно хорошо согласуется с расчетом (кривая 1). Обработка заряженным аэрозольным потоком при фиксированной длине свободной части струи (рис.19) способствует повышению в 7...8 раз (кривые 1 - $L = 0,1$ м; 2 - $L = 0,4$ м) проникающей способности по сравнению со смачиванием при помощи кисти (кривая 5), кривые 3,4 - нейтральный аэрозоль при $L = 0,1$ м и $L = 0,4$ м.

Для исследования эффективности процесса в модельный капилляр предварительно помещалась подкрашенная жидкость, которая затем удалялась подогретой нейтральной или ионизированной воздушной струей. Из графиков на рис.20 следует, что объем удаляемого красителя с 1 %-ной добавкой ПАВ за фиксированный промежуток времени при обработке заряженным потоком примерно в 12 раз (кривая 1), а при воздействии нейтрального потока в 10,5 раза (кривая 2) выше по сравнению с конвективной сушкой (кривая 3).

Удаление жидкости из пористых материалов за фиксированный промежуток времени воздействия при обработке АГД потоком происходит существенно быстрее (рис.21, кривая 2) по сравнению с конвективной сушкой (кривая 1), причем эффект усиливается при использовании ионизированного потока газа (рис.22, G_1 , G_2 - массы жидкости соответственно нейтрального и ионизированного потоков газа).

Степень выявляемости дефектов на деталях авиадвигателей оценивалась по распределению оптической плотности в зоне дефекта, определяемой с помощью микрофотометра МФ-8. Характер распределения оптической плотности (рис.23) свидетельствует о лучшей выявляемости дефекта при нанесении пенетранта в виде АЗГД струи (кривая 1) по сравнению с АГД потоком (кривая 2) и тем более по сравнению с кистевым нанесением (кривая 3).

Таким образом, применение АЗГД потока повышает эффективность контроля в результате повышения примерно в 10 раз степени и скорости заполнения несплошности по сравнению с простым смачиванием. Скорость очистки по сравнению с жидкостной очисткой по-

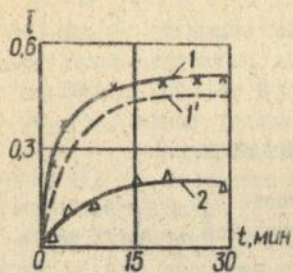


Рис.18

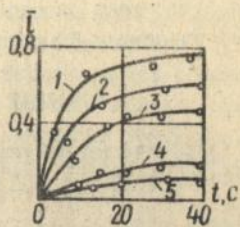


Рис.19

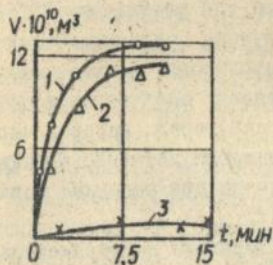


Рис.20

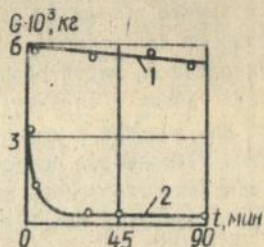


Рис.21

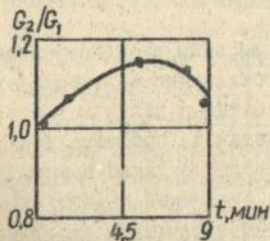


Рис.22

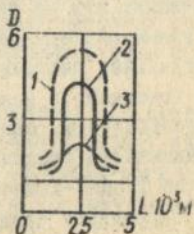


Рис.23

вышается в 8...10 раз, укоряется оушка изделий, исключается пожарная и взрывная опасность, повышается экологическая чистота процессов очистки и НК деталей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Теоретически получены зависимости для оценки значений напряженности поля при ЭГД течения в плоском межэлектродном промежутке.

Показано, что при движении заряженной компоненты повышается примерно на порядок напряженности поля вблизи исследуемой поверхности, что приводит к усилению эффекта внешнего воздействия, вызванного электрическим полем.

2. Разработаны зарядные устройства для реализации ЭГД потока с большими объемными зарядами и получены полуэмпирические зависимости для расчета значений геометрических, газодинамических и электрических характеристик, определяющих максимальную эффективность ионных и аэрозольных ЭГД и генераторов, которые используются для очистки и неразрушающего контроля деталей, а также в качестве генераторов искусственного заряда при наземных испытаниях молниеэлектростатической защиты АТ.

3. Обоснованы теоретически и подтверждены экспериментально преимущества новых способов очистки с помощью многофазных многокомпонентных потоков - на один-два порядка более высокая эффективность по сравнению с жидкостной очисткой, что объясняется комплексным механическим и физико-химическим воздействием указанных потоков на очищаемую поверхность с учетом механизма воздействия электрических сил на процесс очистки;

- малые расходы моющих составов, высокие пожаробезопасность и экологическая чистота в результате исключения из процессов очистки токсичных и пожароопасных жидкостей и использования высоких адсорбционных свойств рабочих составов, простота реализации и надежность работы, пренебрежимо малое влияние процесса очистки на физико-химическое состояние очищенной поверхности.

4. Определены пределы изменения геометрических газодинамических, электрических параметров, а также дисперсных характеристик многофазных многокомпонентных потоков, обеспечивающих максимальную эффективность предложенных способов очистки АТ.

5. Обоснованы требования и условия для создания концепции чистых производственных помещений в микроэлектронике, учитывающей количество аэрозоля, а также уровень опасных и вредных производственных факторов в производственном помещении.

6. Установлены режимы работы, обеспечивающие максимальные адгезионные свойства поверхности при очистке изделий микроэлектроники АГД суспензионным способом - давление воздуха 0,25...0,27 МПа, расход суспензии $(1...2) \cdot 10^{-3}$ кг/с, объемное соотношение твердой и жидкой фаз 1:5, скорость протяжки изделия 2...3 мм/с, а также выявить преимущества предложенного способа перед традиционными - высокие мощность и адгезионная способности при малых расходах рабочих составов, безопасные условия труда и высокая экологическая чистота процесса в результате снижения уровня электромагнитных, ионизирующих и др. излучений, а также замены токсичных пожароопасных веществ мощими составами на водной основе.

7. На основании проведенных теоретических, экспериментальных лабораторных и аэродромных исследований, летных испытаний, предложенных способов искусственной электризации и имитации коронного стримерного и искрового разрядов с элементов АТ с применением многофазных многокомпонентных потоков разработаны методики определения антистатических свойств материалов, оценки уровня электризации АТ в полете и наземных испытаний молниезлектро-статической защиты ВС, позволяющие прогнозировать электростатическую безопасность при обслуживании и ремонте АТ, повысить экономичность, уровень безопасности и экологической чистоты сертификационных испытаний ВС.

8. Получены приближенные теоретические и согласующиеся с ними эмпирические зависимости, свидетельствующие о повышении в 5 ... 10 раз проникающей способности дефектоскопических материалов на водной основе в присутствии электрического поля и заряженных аэрозольных частиц.

9. Определены предельные значения параметров ЭГД системы для выполнения каждого этапа цветного контроля натуральных авиационных деталей, обеспечивающие максимальную эффективность нанесения проникающего и проявляющего составов и промежуточной очистки контролируемых деталей.

10. Разработана методика капиллярного контроля с применением многофазных многокомпонентных потоков, обеспечивающая

чувствительность цветного контроля авиационных деталей из различных диэлектрических и металлических материалов и сплавов водными дефектоскопическими материалами на уровне составов с органическими растворителями при более высокой экономичности, пожаробезопасности и экологической чистоте предложенных способов капиллярной дефектоскопии.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Франчук Г.М. Безопасность жизнедеятельности человека в технологических процессах очистки и НК деталей. - Киев: КИИГА, 1992.- 224 с.

2. Франчук Г.М., Ревук А.Г. Статическое электричество при технической эксплуатации авиационного радиоэлектронного оборудования. - Киев: КИИГА, 1992 г.- 60 с.

3. Франчук Г.М., Савченко В.И. Опыт использования аэрозольных потоков в технологических процессах очистки авиационных деталей. - Киев: "Знание", 1988. - 24 с.

4. Ушаков В.В., Франчук Г.М. Зарядка аэрозольных частиц в одномерном электрогазодинамическом потоке // Магнитная гидродинамика, № 2, 1978, с.70-75.

5. Ушаков В.В., Савченко В.И., Франчук Г.М. Методика расчета аэрозольных ЭГД источников заряженных частиц // В сб.: Прикладная аэродинамика, Киев: КИИГА, 1979, с.

6. Гузий Н.Н., Подмызов А.В., Пономарев Б.В., Франчук Г.М. Исследование характеристик коронного разряда с моделями пассивных нейтрализаторов в газовом потоке // Ученые записки ЦАГИ, т.ХП, № 1, 1991, с.161 - 165.

7. Басиев Т.С., Верещагин И.П., Макальский Л.М., Мирзабегли Г.Э., Савченко В.И., Ушаков В.В., Франчук Г.М. Генераторы заряженного аэрозоля // Изв.АН СССР "Энергетика и транспорт", № 5, 1982, с.118 - 127.

8. Баран Г.В., Овсянник А.М., Ушаков В.В., Франчук Г.М. Очистка металлических поверхностей ЭГД аэрозольной струей // Электронная обработка материалов, № 1, 1985, с.81-84.

9. Валетчик Л.А., Гувий Н.Н., Ушаков В.В., Франчук Г.М. ЭГД система защиты объектов гражданской авиации от статического электричества на эксплуатационных и ремонтных предприятиях // В сб. Оптимизация систем охраны труда в гражданской авиации. Киев: КНИГА, 1985, с.66 - 75.

10. А.с. 1875483 СССР, м.кл. В24 С 3/06. Устройство для очистки поверхностей /Г.М.Франчук, Д.Р.Амирханов, С.Н.Сартирисян, В.И.Савченко, В.В.Ушаков. - Оpubл. 1988. - Бюл. № 7.

11. Мартиросян С.Н., Овсянкин А.М., Франчук Г.М. Перспективные методы очистки поверхностей ВС с помощью двухфазных аэрозольных потоков // Тезисы докладов У научной конференции "Проблемы охраны труда", Рубежное, 1986. с.87-88.

12. А.с. 126544 СССР, м.кл. F 25 C 1/12, В 01 J 2/00. Устройство для производства ледяных гранул /Г.М.Франчук, С.Н.Мартиросян, В.И.Савченко, В.В.Ушаков. - Оpubл. 1986 - Бюл. № 39.

13. А.с. 1376014 СССР, м.кл. G 01 N 21/91. Способ капиллярной дефектоскопии /Г.М.Франчук, А.М.Овсянкин, В.И.Савченко, В.В.Ушаков. - Оpubл. 1988. - Бюл. № 7.

14. Овсянкин А.М., Савченко В.И., Франчук Г.М. Обоснование и разработка экологически чистых и безопасных способов мойки элементов АТ //В сб.: Системы безопасности труда в технологических процессах ГА. - Киев: КНИГА, 1988. с.73-82.

15. Овсянкин А.М., Савченко В.И., Франчук Г.М. Проникновение жидкости в капилляры в присутствии электрического поля //Техническая диагностика и неразрушающий контроль, № 2, 1989. с.69-74.

16. Мартиросян С.Н., Франчук Г.М., Хижко В.Д. Обоснование параметров аэрозольной струи ледяных гранул в установках для очистки авиационных деталей //В сб.: Новое в технологии ремонта ВС на заводах ГА. - Киев: КНИГА, 1990, с.51-57.

17. А.с. 1600861 СССР, м.кл. В 08В 3/08. Способ очистки поверхности электрооборудования /Г.М.Франчук, В.Д.Яковлев, В.И.Савченко, Д.Р.Амирханов - Оpubл. 1990. - Бюл. № 39.

18. Франчук Г.М., Хижко В.Д. Очистка авиационных деталей ледяными гранулами // В сб.: Приоритетные направления развития технологии ремонта и надежности АТ, Киев: КНИГА, 1991. с.42-48.

19. Овсянкин А.М., Савченко В.И., Ушаков В.В., Франчук Г.М., Хижко В.Д. Методы совершенствования технологического процесса дефектоскопии рабочих поверхностей авиационных деталей //В сб.: Проблемы охраны труда и окружающей среды при интенсификации производства в гражданской авиации. Киев: КНИГА, 1986, с.76-82.

20. Бракин В.С., Савченко В.И., Франчук Г.М., Хижко В.Д.
Применение аэрозольных потоков для очистки поверхностей при ре-
монте АТ. // В сб.: Вопросы совершенствования технологии ремонта
ВС. - Киев: КИИГА, 1988, с.79-87.

21. Овсянкин А.М., Савченко В.И., Франчук Г.М., Хижко В.Д.
Повышение эффективности капиллярной дефектоскопии деталей // В сб.:
Перспективные методы восстановления деталей и узлов авиационной
техники. Киев: КИИГА, 1989, с.59-66.

22. А.с. 995901 СССР, М.кл. В 08В 3/02. Способ очистки ме-
таллической поверхности / Г.М.Франчук и др. - Служб. 1933.- Бл.
№ 6.

23. А.с. 1179355 СССР, М.кл. G 01R 31/00 / Устройство для
определения электростатических свойств материалов / Г.М.Франчук и
др. - Опубл. 1985.- Бл. № 30.

24. А.с. 1487945 СССР, М.кл. В 01В 41/00 / Способ очистки
фильтроэлементов/ Франчук Г.М. и др. - Опубл. 1989.- Бл. № 23.

25. А.с. 1507457 СССР, М.кл. В 05 В 7/04, 15/02 / Распылитель
жидкости/ Г.М.Франчук и др. - Опубл. 1989.- Бл. № 34.

26. А.с. 1740142 СССР, М.кл. В 64С 1/00 / Способ гидрообра-
зливной очистки поверхности деталей/ Г.М.Франчук и др. - Опубл.
1992.- Бл. № 22.

Подписано в печать 01.12.93. Формат 60x84/16. Бумага типографская
Обсетная печать. Усл.кр.-стт.7. Усл.печ.л.1.86. Уч.-изд.л.2,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 22-1 . Цена . Изд. № 248/Ш.

Издательство КИИГА.

257058. Киев-56, проспект Космонавта Комарова, 1.

402995

AB 28.579