

# Модель потока наносреды, очищающей пространство электроэрозии от частиц

В. С. Деева, С. М. Слободян\*, В. С. Тетерин

Томский политехнический университет, г. Томск, 634050, Россия,  
\*e-mail: [sm-sms@mail.ru](mailto:sm-sms@mail.ru)

Поступила в редакцию 19.11.2022

После доработки 20.02.2023

Принята к публикации 27.02.2023

Предложена и изучена модель изменения в динамике физических свойств и структуры однородной среды промежутка «анод–катод» («swcnt–поверхность») из-за влияния стохастической эмиссии в случайный промежуток частиц эрозии при их выносе средой из зоны электрической эрозии при выполнении микро- и нано–отверстий в материале. Учтено влияние на свойства совокупного потока динамики движения инструмента (swcnt–электрода), ориентации пространства эрозии и выноса частиц, а также меняющейся плотности однородной среды потока. Выявлены изменения свойств и параметров совокупного потока среды при выносе ее частиц эрозии от угла ориентации пространства эрозии. Верификация методами практики и теории подобия показала удовлетворительное соответствие результатов моделирования, численного эксперимента и натуральных экспериментов, проведенных другими исследователями.

*Ключевые слова:* частица, динамика, очистка, случайная среда, зона эрозии, нанотрубка

УДК 537.528:621.9.048:534

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.2.21>

## ВВЕДЕНИЕ

Современные микро-, нано- и атомного масштаба технологии предъявляют все более высокие требования к устройствам молекулярной электроники на основе тонкого атомного размера слоя. Многие поверхностные и электронные свойства очень сильно зависят от ориентации материала. Промышленное развитие нуждается в дешевом, высокой точности, неразрушающем и быстром анализе в различных условиях ориентации микро- и наноразмерного инструмента в пространстве «swcnt–электрод–поверхность».

Более трех десятилетий [1–5] активно проводятся широкомасштабные и достаточно глубокие исследования по поиску и созданию различных форм и состава, не только чисто углеродных наноструктур (нанотрубки, фуллерены, графен и т.п.), но и самых разнообразных композиций на их основе [3–4, 6–11]. Простые и сложные одно-, двух- и трехмерные (1D, 2D, 3D) наноразмерные структуры благодаря своим поистине уникальным физическим и химическим свойствам (механическим, электрическим, оптическим и др.) формируют огромный интерес исследователей к совершенствованию элементной базы во многих отраслях науки и промышленности, в том числе, в области микроэлектроники, оптики, микробиологии, медицины, создания уникальных новых материалов, компо-

зитов, радиопрозрачных структур и т.д. [10–15]. Несмотря на известный прогресс в получении разнообразных углеродных наноструктур, достигнутый в научных лабораториях, их производство в промышленных условиях требует развития ряда смежных технологий, в том числе, наноэрозионных, для улучшения процесса создания завершенных изделий. Кроме того, свойства наноразмерных объектов, в частности, в области наноэлектроники, находятся в сильной зависимости от особенностей атомной структуры тонких слоев [10–11, 13–15]. Потому эффективное использование атомного масштаба наноструктур для любых технологий и приложений невозможно без обеспечения контроля свойств на этапе создания их структуры в процессе синтеза [9–11, 14–19].

Значительная часть исследовательских работ в данных областях направлена на установление эмпирических связей между структурой наноразмерного масштаба синтезируемых объектов и параметрами обеспечения процесса их синтеза. Следует отметить, что такой подход не всегда дает полное понимание проявляемых изменений рассматриваемого процесса, а получаемые в исследовании эмпирические зависимости характеризуются часто узкой областью применимости. Именно эти обстоятельства требуют создания моделей и анализа механизмов структурных преобразований в технологии процессов, которые осуществляются с использованием

различных наноструктур, и разработки предсказательной теоретической модели формирования процессов сопровождающих электронную обработку материалов на основе эрозионных нанотехнологий [3, 10–12, 20–25].

Развитие и усложнение наноразмерных технологий повышает интерес к решению проблем электроэрозионного формирования ниш и отверстий малого диаметра [23–27]. Современные нанотехнологии предъявляют все более высокие требования к устройствам атомной и молекулярной электроники на основе ультратонких пленок атомного размера слоя или их естественных и искусственных многослойных сборок – паллетов микро-, нано- и атомного масштаба. При производстве изделий наноразмерной и молекулярной электроники необходимый диаметр отверстий и ниш соизмерим с долями нанометра [2–5]. Создание отверстий–ниш в наноразмерных проводниках и размещение в таких нишах отдельных элементов цепей, несомненно, служит повышению плотности интеграции схем. Качество получаемых при этом ниш и отверстий зависит от степени засорения среды промежутка «электрод–поверхность» продуктами эрозии из активной зоны обработки. Потому изучение проблемы снижения влияния на сигнал электроэрозионного воздействия степени засорения продуктами эрозии среды промежутка [20–25] весьма важно для повышения качества сверления отверстий и формирования ниш.

Это обуславливает решение задачи установления математической закономерности изменения свойств потока среды, очищающей зону промежутка электроэрозионного воздействия на материал от частиц эрозии в зависимости от особенностей потока среды и инструмента обработки, которое является насущной необходимостью для практики нанотехнологий [3, 14, 20].

Важно отметить, что реально процессы оригинальных и действующих макро-, микро- и наноразмерной технологий, например, с использованием однослойной углеродной нанотрубки – swcnt (single-walled carbon nanotube) для электрической эрозии, не являются, строго говоря, детерминированными процессами. Эти процессы, практически все без исключения по своей физической природе являются случайными. Потому они должны быть представлены как вероятностные процессы с соответствующими закономерностями, например, с равномерно распределенными параметрами. Именно поэтому проявление особенностей процессов макро-, микро-, нано- и атомного масштабов электрической эрозии

объективнее оценивать через статистические параметры и зависимости, в частности, через изменения параметров под влиянием какого-либо выбранного действующего фактора или совокупности выбранных факторов.

Для совершенствования существующих методов и средств повышения производительности электроэрозионного воздействия и действующих в теории и практике показателей эффективности технологий с точки зрения анализа влияния основных условий сохранения и повышения их конкурентоспособности, рассмотрим возможность оценки исследования процесса электрической эрозии как фактора изменения физических свойств и структуры исходно однородной среды диэлектрического промежутка «анод–катод» («swcnt-электрод–поверхность») в реальных условиях стохастической эмиссии в этот случайный динамический промежуток частиц эрозии при выносе их средой промежутка из электроэрозионной зоны воздействия на материал [18–22, 26, 27].

Наличие указанных проблем определяет интерес к изучению и оценке возможностей способов формирования сигналов электроэрозионного воздействия для улучшения качества и точности формообразования и удаления частиц эрозии при прошивке атомного масштаба отверстий.

Цель работы – разработка метода оценки и исследование возможности создания математической модели преобразования свойств среды и процесса электрической эрозии, учитывающей действие актов стохастической эмиссии частиц эрозии на случайный процесс эрозии в промежутке «анод–катод» («swcnt-электрод–поверхность») и динамику выноса частиц эрозии средой промежутка из активной эрозионной зоны воздействия на материал в системе эрозионного действия типа прошивки отверстий и ниш в зависимости от ориентации электрода.

Соотношения и закономерности изменения плотности среды выноса частиц эрозии из промежутка эрозионной зоны воздействия определяют условия реализации метода косвенного контроля параметров текущего поведения процесса электроэрозии. Заметим, что ниже в работе изменением плотности среды совокупно учитывается факт того, что материал электродов так же подвержен воздействию в динамике протекания «абляционного» характера процесса эрозии.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Во многих опубликованных в печати работах, например в [20–21, 28–30], пространство

промежутка «анод–катод» электрической эрозионной зоны воздействия на материал ограничено двумя поверхностями: поверхностью активного электрода – анод (в нашем случае, стенками углеродной трубки-«cnt») и поверхностью обрабатываемого материала, являющегося катодом. Материал катода служит источником эмиссии частиц эрозии. Форма и размер в потоке частиц электроэрозии – случайны. Их разброс лежит в широком интервале физических представлений: от классической малой частицы – электрона до отдельных субформ абляционного характера разрушения структуры катода как части поверхности материала. В пространстве промежутка зоны активного действия электроэрозии присутствует диэлектрическая среда, которая разделяет эти электроды: «cnt» (анод) – инструмент и катод – материал электроэрозионного воздействия. Электромагнитные силы эрозионной зоны активного воздействия отрывают фрагменты от поверхности материала. При этом пространство промежутка «swcnt–поверхность» динамически изменяется. Эти изменения влияют на структуру и состав среды, заполняющей промежуток «swcnt–поверхность» зоны действия эрозии. Это обусловлено, в первую очередь, абляцией фрагментов материала и их эмиссией в промежуток области «swcnt–поверхность». Именно поэтому составу и структуре среды в промежутке зоны действия эрозии между электродами «swcnt–электрод–поверхность» присущи сильные случайные временные и пространственные изменения в динамике протекания процесса эрозии [20, 30].

Динамика перемешивания составляющих основу среды в зоне эрозии (газовой, жидкостной и частиц) и их вымывание потоком движения обуславливают быструю смену в зоне эрозии этих компонентов. Таким образом, среда в пространстве зоны эрозии – это смесь сред: основной (жидкостной, газовой), которая заполняет промежуток и случайной концентрации частиц эрозии материала – многомасштабных дискретных включений в исходно однородной основной среде.

Эмиссия частиц эрозии в исходно однородную среду промежутка «swcnt–электрод–поверхность» при неполном их удалении из активной зоны ослабляет электроэрозионное воздействие на материал, ухудшает точность формообразования, снижая скорость прошивки отверстий. Именно поэтому улучшение эффективного удаления из промежутка «swcnt–электрод–поверхность» частиц эрозии, как фактора сильного ухудшения условий формирования разряда в активной зоне абляционного

характера эрозии, является насущной необходимостью.

Для поиска путей и средств повышения качества эрозионного воздействия и улучшения показателей эффективности технологии, рассмотрим возможность применения вероятностного подхода и оценки характеристик случайного состава среды, которая заполняет промежуток «swcnt–электрод–поверхность» для удаления частиц эрозии в микро- и наноразмерной системе электроэрозионного действия с электродом из углеродной нанотрубки и улучшения качества и точности образования форм при прошивке отверстий.

Необходимо и очень важно отметить, что при проведении работ по созданию нанотехнологий в различных приложениях весьма часто возникает, неразрешенная пока, из-за многих трудностей на практике проблема контроля в реальном времени динамических процессов в наноразмерной и атомного масштаба зонах электроэрозии. Для получения достоверной информации о ходе многих физических и других типов технологических процессов обычно применяют разного рода датчики [13, 15, 31–34], преобразующие одну физическую величину, которая функционально связана с процессом, в другую, более удобную для использования в практике оценивания и метрологии наблюдаемого процесса. Заметим, что существует весьма великое множество конструкций и физических принципов работы датчиков – преобразователей информации одного вида в другой [1–10], причем самых различных по своей физической природе элементов для диагностики параметров и состояния наблюдаемых процессов, в том числе, с высокой устойчивостью работы в условиях агрессивных сред. Часто обратимые свойства датчиков – преобразователей информации одного вида в другой позволяют использовать их в качестве вторичных преобразователей информации в измерительных системах [2–6] именно для контроля и управления весьма сложными процессами и технологиями. Однако соразмерное атомам пространство случайно изменяющейся динамической зоны электрической эрозии физически не позволяет размещать датчики прямого контроля процесса эрозии [20, 33]. Кроме того, следует подчеркнуть, что эта зона воздействия, сопоставимая с размерами атомов материала обработки, практически не доступна для применения известных дистанционных методов прямого контроля процесса эрозии, из-за наличия в зоне динамической среды очистки от частиц эрозии.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. МЕТОД РЕШЕНИЯ

В постановке задачи исследования и ее решении в излагаемой работе случайность действия фактора эмиссии частиц эрозии в исходно однородную диэлектрическую среду промежутка «swcnt-электрод–поверхность» и влияние других природных факторов действия эрозионной технологии в среде промежутка «swcnt-электрод–поверхность», в частности, пространственная неустойчивость «swcnt-электрода» [33–35], учитываются совокупно. В созданной математической модели, что принципиально важно для оценки износа инструмента, так же совокупно учитывается тот факт, что электроды «анод–катод» («swcnt-электрод–поверхность»), которые подвергаются локальному, хотя и кратковременно, весьма интенсивному электродинамическому и термическому воздействию в принципе могут давать относительно малый вклад в поток частиц эрозии.

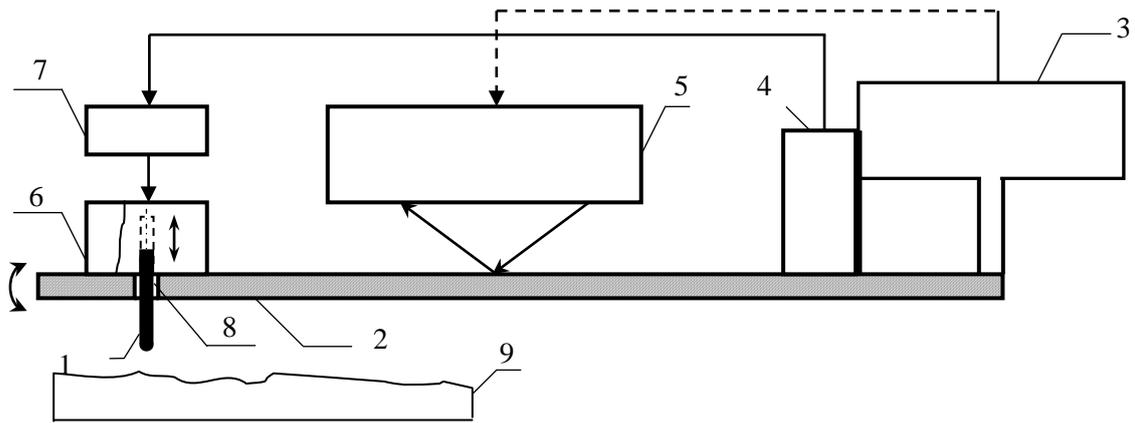
Реализация многих технологических процессов обработки материалов в области микро-, нано- и атомного размера технологий, в большинстве случаев промышленной практики, базируется на применении высокой точности широкого спектра различия средств типа атомных силовых микроскопов, являющихся основой инструментария систем зондовой микроскопии [2–4, 37, 39–44]. Впервые результаты экспериментального исследования применения углеродной нанотрубки для апробации возможности электроискрового воздействия на поверхность материала были приведены в [42]. Подобного типа обобщенная структура фрагмента такой системы для рассматриваемой нанотехнологии иллюстративно представлена на рис. 1. Различия устройств не являются предметом исследования, поэтому обширный материал описания систем и устройств обеспечения нанотехнологий в данной работе не приводим, чтобы не затенять сущность основного материала статьи.

Чтобы обеспечить наглядность оценки возможностей исследуемого метода, мы рассматриваем электроэрозионное динамическое воздействие на материал в контексте применения основных статистически средних параметров и характеристик исходно однородной среды, частиц эрозии материала, случайного изменения параметров промежутка «swcnt-электрод–поверхность» и других параметров зоны обработки материала инструментом эрозионной технологии. Эмиссия частиц эрозии (с проводящими электрический ток свойствами)

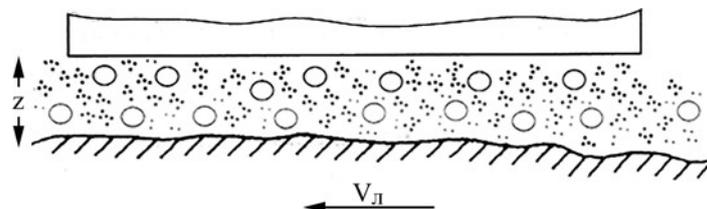
в очень малое пространство промежутка «swcnt-электрод–поверхность» с исходно однородной диэлектрической средой, окружающей зону активного эрозионного действия на материал, достаточно резко и случайно во времени и пространстве может менять заданные диэлектрические свойства среды в пространстве промежутка «swcnt-электрод–поверхность» (рис. 1). Подобные случайные неконтролируемые и весьма существенные изменения свойств промежутка «swcnt-электрод–поверхность» как зоны активной эрозии материала являются сильным препятствием для создания условий оптимального режима формирования электрического разряда в пространстве промежутка «swcnt-электрод–поверхность». Электрический разряд в пространстве промежутка «swcnt-электрод–поверхность» является физически основным фундаментальным элементом действия эрозионной деструкции материала. Используемые в данной работе, методы исследования и решения задачи улучшения эвакуации продуктов эрозии из зоны деструкции, основаны на фундаментальных положениях статистической физики, теории случайных процессов, электроэрозионного способа воздействия и основ теории подобия, с учетом случайности действия многих факторов, в том числе, эмиссии частиц эрозии и, как следствие, случайного процесса их эвакуации из зоны обработки материала.

Следует заметить, что применить известные, хорошо апробированные и освоенные оптические или акустические прямые методы наблюдения и контроля [31, 32] или инструментарий прямого контроля [34] эрозионного воздействия непосредственно в активной зоне нано- и атомного масштаба физического действия разряда, особенно для микро- и нанотехники, на уровне существующих в настоящее время технологий, весьма и весьма затруднительно [29, 30, 34, 42–44].

Основное внимание в проводимом ниже исследовании уделено динамике и аспектам изменения под действием случайной эмиссии частиц эрозии статистически средних характеристик исходно однородной среды в пространстве промежутка зоны взаимодействия «swcnt-электрод–поверхность материала». Выявленные эффекты и полученные экспериментально закономерности связаны с вариацией динамического баланса среды в пространстве промежутка активной зоны действия эрозии, управление параметрами которой будет способствовать улучшению эффективности выноса термически активных, проводящих электрический ток, компонентов частиц эрозии материала обработки из электроэрозионной зоны



**Рис. 1.** Упрощенная схема фрагмента устройства: 1 – рабочий элемент – углеродная нанотрубка; 2 – консоль; 3 – держатель – опорная часть; 4 – датчик частоты собственных колебаний консоли 2; 5 – оптический датчик движения консоли 2; 6 – привод рабочего элемента 1; 7 – блок формирования сигнала рассогласования положения нанотрубки 1; 8 – проходной канала нанотрубки 1 в окрестности свободного конца консоли 2; 9 – поверхность обработки.



**Рис. 2.** Иллюстрация фрагмента потока сечения промежутка эрозии «swcnt-электрод–поверхность» при обработке материала:  $z$  – случайная мера пространства электрического разряда, движения совокупного потока эмиссии частиц эрозии и промежутка «swcnt-электрод–поверхность» зоны действия эрозии;  $v_n$  – скорость движения среды, которая выносит термически активные, проводящие электрический ток, компоненты частиц эрозии, в среднем равная  $v_n = v_{ef}$  – линейной скорости движения частиц в пространстве промежутка (в продольном направлении рисунка).

действия разряда. Это важно для очистки от частиц эрозии – дискретных включений среды пространства активной эрозионной зоны действия, ведущей к установлению наиболее близкого к идеальному состоянию среды промежутка «swcnt-электрод–поверхность».

Отметим, что решение проблемы управления параметрами среды и пространства зоны действия эрозии, в общем случае, носит характер комплексного исследования. Комплексирование исследований при решении такого рода задач на практике проводится очень редко из-за большой сложности в организации плана такого эксперимента. Имеющиеся в настоящее время в научных публикациях, знания и данные о динамике поведения и вариациях изменения состава частиц эрозии и исходно однородной среды, окружающей зону эрозионного действия «swcnt-электрод–поверхность», а также о форме и размерной статистике дискретных включений, динамически активных компонентов основных концентраций частиц материала в зоне эрозии, и других параметрах, требующих большей полноты информации, весьма ограничены. Потому следует согласиться с утверждением автора работы [30], что «они носят отрывочный характер», особенно в части микро-, нано- и атомных размерных технологий [35].

Используем [28, 29] для обобщенного подхода к исследованию физических процессов в системах эрозионной деструкции плотно упакованной дискретной структуры конденсированных сред и материала тел. За основу модели эрозионного разрушения материала тел в промежутке «swcnt-электрод–поверхность» активной зоны действия эрозии примем динамическую модель [13, 34]. Несмотря на обилие работ [1–8, 20–30] по эрозионной деструкции материала тел в пространстве «swcnt-электрод–поверхность» активной зоны действия эрозии разрушения, мало публикаций с анализом динамики и кинетики этого, недоступного для прямого наблюдения в реальном времени, вероятностного эрозионного пространства. Математическая модель этого процесса необходима не только для получения оценки живучести инструмента «swcnt-электрод–поверхность» эрозионной системы. Модель, несомненно, необходима и в плане исследования особенности эрозионного действия с широким спектром номенклатуры сред и материалов, которые применяют в технологиях деструкции плотно упакованной дискретной структуры конденсированных сред, что весьма актуально для машиностроения и общей теории физики и управления действием эрозии.

Ниже принимаем следующие исходные положения (рис. 1 и 2). Пространство промежутка электроэрозионной деструкции плотно упакованной структуры материала конденсированных тел и область их взаимодействия в стационарном установившемся режиме – в среднем статистически постоянны. Крайне редкими актами разрушения боковых поверхностей инструмента «swcnt-электрод–поверхность» и неустойчивостью инструмента при его движении внутри активной зоны действия электроэрозионного разрушения материала из-за слабого влияния на практике в соответствующих ситуациях можно пренебречь. В основу предлагаемого подхода так же положим, что все, без исключения, используемые ниже, параметры являются статистически средними в классе принятых распределений случайных значений рассматриваемых величин.

В условиях сделанных выше исходных предположений удельный объем частиц деструкции слоя эрозии плотно упакованной структуры материала в зоне действия разряда через поперечное сечение промежутка «swcnt-электрод–поверхность» в единицу времени равен произведению  $v_{ef}$  – средней линейной скорости движения частиц в пространстве промежутка (в продольном направлении) на  $s_{ef}$  – площадь поперечного сечения пространства промежутка:  $V_{ef} = s_{ef} v_{ef} t$ . (Промежуток «swcnt-электрод–поверхность» является 3D-пространством движения совокупного потока эмиссии дискретных частиц эрозии разного масштаба, виртуально равномерно распределенных в пространстве потока исходно однородной среды, которая выносит термически активные, проводящие электрический ток, компоненты частиц эрозии материала обработки из эрозионной зоны действия электрического разряда.). Обозначим  $(x, y, z, t)$  – переменные в системе координат пространства движения совокупного с частицами потока и  $\Delta t$  – интервал времени оценки скорости. Тогда статистически средняя скорость движения потока и частиц эрозии в пространстве активной зоны действия разряда в условиях случайной динамики взаимодействия в системе координат переменных  $(x, y, z)$  определится проекциями статистически среднего вектора его скорости  $v_{ef}(x, y, z, t)$ . Характер изменения координат проекций статистически среднего вектора скорости  $v_{ef}(x, y, z, t)$  движения совокупного потока среды, выносящей частицы эрозии, имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} v_x(t) &= [x_i(t + \Delta t) - x_i(t)] / \Delta t; \\ v_y(t) &= [y_i(t + \Delta t) - y_i(t)] / \Delta t; \\ v_z(t) &= [z_i(t + \Delta t) - z_i(t)] / \Delta t. \end{aligned} \right.$$

Процесс электроэрозионной деструкции материала обработки это достаточно длительная по времени процедура. Время исполнения заданной траектории эрозионного разрушения по линии движения инструмента «swcnt-электрод–поверхность» пропорционально отношению  $V_{\Sigma fe}$  – объема материала, подлежащего эрозионному разрушению на траектории движения электрода, и обратно пропорционально произведению  $\langle n_{fe} \rangle$  – (интенсивности) среднему числу потока частиц эрозии в единицу времени, функционально связанному со средним размером отдельных частиц эрозии – разрушения структуры материала, определяемого геометрией и размерами частиц эрозии, на  $\langle V_{ife} \rangle$  – статистически средний объем  $i$  – частиц эрозии из объема разрушения структуры материала в пространстве траектории взаимодействия «swcnt-электрод–поверхность»:

$$t_w = V_{\Sigma fe} / \langle n_{fe} \rangle \langle V_{ife} \rangle.$$

Из-за случайности результата физического воздействия последовательности электрических разрядов на структуру материала предельно ясно, что  $\langle n_{fe} \rangle$  – среднее число (интенсивность) отдельных частиц эрозии – элементов разрушения структуры материала, которые эмитируют в исходно однородный поток среды  $V_f$  для выноса частиц эрозии, функционально обусловлено особенностями геометрии частиц. Иначе говоря, среднее число частиц эрозии, их размер и форма являются коррелированными, функционально связанными, величинами. Форма и размер, а так же интенсивность – среднее число частиц эрозии в единицу времени имеют много вариантов своего образования и как параметры совокупного потока среды они – многомасштабны. В общем, величина  $\langle V_{ife} \rangle$  – статистически среднего объема частиц эрозии, вполне естественно, зависящего от условий режима эрозионного воздействия и свойств материала обработки, может быть определена при использовании основы интегрального исчисления [12, 28, 29, 34]:

$$\langle V_{ife} \rangle = \iiint_{(xyz)} V_{ife} dx dy dz = \int_{(v)} V_{ife} dV.$$

Исходя из этого  $\langle n_{fe} \rangle$  – статистически среднее число частиц эрозии в исходно однородном потоке объема  $V_f$  – среды выноса частиц эрозии найдется как некоторое статистически среднее число фрагментов разрушения в объеме совокупного потока. Закономерность изменения  $\langle n_{fe} \rangle$  – статистически среднего числа частиц эрозии в потоке в единицу времени определит отношение:  $\langle n_{fe} \rangle = V_f / \langle V_{ife} \rangle$ . В зависимости от значения  $\langle n_{fe} \rangle$  – статистически среднего числа

частиц эрозии в потоке объема  $V_f$  среды будет изменяться параметр  $\langle \rho_f \rangle$  – статистически среднее значение физической плотности среды объема  $V_f$  совокупного потока, который выносит из зоны воздействия электрического разряда эти частицы эрозии.

Если перейти к оценке массы совокупного потока среды выноса частиц эрозии, а именно, к определению закономерности изменения во времени параметра интенсивности выноса массы потоком с учетом  $\langle n_{fe} \rangle$  – статистически среднего числа частиц эрозии в потоке объема  $V_f$  среды проходящего со скоростью  $v_{ef}$ , через  $s_{ef}$  – поперечное сечение активной зоны промежутка эрозии и выноса частиц эрозии в единицах массы, то значение совокупной массы потока, выносимой с частицами эрозии, будет равно произведению объема потока  $V_f$  среды с частицами эрозии на  $\langle \rho_f \rangle$  – статистически среднее значение плотности материала разрушения, распределенного по объему  $V_f$  среды совокупного потока,  $m_f(t) = \langle \rho_f \rangle s_{ef} v_{ef} t$  или в единицу времени:  $m_f(t=1c) = \sum \langle V_f \rangle \langle \rho_f \rangle v_{ef} (1c)$ .

Примем, что:  $\langle \rho_{ff} \rangle = f(\langle \rho_{ef} \rangle)$  – плотность среды совокупного потока выноса частиц эрозии является функцией  $\langle \rho_{ef} \rangle$  – статистически среднего значения плотности материала эрозионной обработки, распределенного по объему  $V_f$  среды потока в пространстве зоны активной эрозии:  $\langle \rho_{ff} \rangle = f(\langle \rho_{ef} \rangle)$ . В частном случае, при малом объеме потока среды выноса и высокой плотности материала обработки в предельном приближении получим:  $\langle \rho_{ff} \rangle \approx \langle \rho_{ef} \rangle$ . На начальном этапе (при  $t \sim 0$ ) процесса электрической эрозии это тождество может не выполняться, например на временном интервале недостижения условий стационарности процесса развитой эрозии.

Обратим внимание на некоторые особенности потока среды в активной зоне эрозии. Одним из основ классической механики является положение, согласно которому считается, что масса – величина аддитивная, то есть, масса любой механической системы из  $k$  элементов является суммой  $m_i$  масс всех  $i$ -элементов ( $i = 0, 1, 2, \dots, k$ ), образующих эту систему:  $m(k) = \sum m_i$ . Иначе говоря, статистически среднее значение массы среды совокупного потока выноса частиц эрозии является суммой  $\langle m_{ff} \rangle$  – статистически среднего значения массы среды исходно однородного потока и  $\langle m_{ef} \rangle$  – статистически среднего значения массы частиц эрозии, которые находятся в объеме этой среды,

выносящей данные частицы эрозии:  
 $\langle m_f(t) \rangle = \langle m_{ff} \rangle + \langle m_{ef} \rangle$ .

Статистически средние значения массы исходного потока среды  $\langle m_{ff} \rangle$  и  $\langle m_{ef} \rangle$  – массы частиц эрозии равномерно распределенной в совокупном потоке находятся усреднением (интегрированием) по всему объему совокупного потока среды  $V_f$  и в диапазоне вариаций  $\langle n_{fe} \rangle$  – числа и размеров  $V_{ef}$  частиц эрозии. Учитывается, что  $\langle \rho_{ef} \rangle$  – средняя плотность частиц эрозии в совокупном потоке среды определяется отношением массы частиц эрозии к их объему:  
 $\langle \rho_{ef} \rangle = \langle m_{ef} \rangle / \langle V_{ef} \rangle$ .

При нестационарной динамике движения потока среды и частиц деструкции неоднородной структуры материала электроэрозионной обработки указанные выше параметры частиц эрозии и совокупного потока среды выноса частиц эрозии из активной зоны не остаются постоянными. Они – функции времени и координат. Нестационарная динамика процесса может приводить к изменениям  $\langle \rho \rangle$  – физической плотности виртуально равномерного распределения массы потока дискретных частиц эрозии по сечению выходного совокупного потока среды с течением времени. Учитывая задачу исследования – создание модели стационарного совокупного потока, примем указанные выше параметры частиц эрозии и совокупного потока среды выноса частиц эрозии из пространства зоны эрозии в виде статистически средних центрированных значений ( $\langle \dots \rangle, \langle \dots \rangle, \langle \dots \rangle$ ) параметров установившегося процесса деструкции материала. Постоянство статистически средних характеристик потока частиц эрозии по сечению совокупного потока среды с течением времени в поперечных сечениях пространства активной зоны обработки соответствует условию стационарности совокупного случайного потока среды с частицами эрозии. Иначе говоря, стационарность установившегося состояния процесса электрической эрозии материала приводит к соблюдению условия постоянства уравнения неразрывности совокупного потока среды с частицами эрозии:

$$\begin{aligned} \langle m_f(t) \rangle &= \langle m_{ff}(t) \rangle = \text{const} \text{ или} \\ \langle m_f(t) \rangle &= \langle m_{ff}(t) \rangle + \\ &+ \langle m_{ef}(t) \rangle = \langle m_{eff}(t) \rangle = \text{const}. \end{aligned}$$

Представленные уравнения взаимосвязи справедливы в стационарном движении совокупного потока среды с частицами эрозии, не имеющем притока или отбора частиц в пространстве движения на пути выноса частиц эрозии из активной зоны обработки материала. Таким

образом, получается, что при деструкции однородной структуры материала на частицы эрозии однородной дисперсности (эмиссия частиц эрозии в поток, выносящей их среды, есть изоморфный поток) уравнение неразрывности упрощается:

$$\langle m_{eff}(t) \rangle = \langle \rho_{eff}(t) \rangle \langle V_{eff}(t) \rangle \langle v_{eff}(t) \rangle = \text{const.}$$

Потому оно может быть сведено к условию постоянства объемной плотности и массы потока совокупного однородного с частицами эрозии материала в любом сечении пространства активной зоны. Частицы поверхностного слоя материала обработки, увлекаемые давлением движения среды, последовательно выносятся потоком среды из случайного пространства активной зоны эрозии, одновременно служащей каналом транспортного переноса частиц эрозии.

Оценку динамики движения совместного с частицами эрозии материала потока среды (при его движении в пространстве зоны эрозии) произведем составлением уравнения баланса совокупного потока среды с виртуально равномерно распределенной в пространстве потока массой частиц эрозии. При равномерной плотности распределения в среде потока и динамике эмиссии частиц в пространстве зоны эрозии уравнение баланса совокупного с частицами эрозии потока среды в оценках расхода массы  $m = \sum m_i$ , ( $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ) примет вид:

$$m = m_{0f} + m_{uf} z,$$

где  $m_{0f}$  – объемная масса потока частиц среды, выносящего частицы эрозии из пространства активной зоны эрозии (в начальном сечении притока частиц эрозии материала в среду потока);  $m_{uf}$  – удельный приток частиц эрозии в интервале  $i$ -го сечения потока (в единицах массы частиц потока в единицу времени на единицу размера пространства);  $z$  – продольная координата – расстояние от начала притока в поток среды частиц эрозии до текущего сечения их выноса из пространства зоны эрозии. Уравнение баланса стационарного установившегося потока среды с частицами эрозии материала запишется аналогично виду, приведенному выше:  $m = m_{0f} + m_{uf} z$ .

Здесь  $m_{uf}$  – удельный объемный приток (отток) частиц в единицу времени на единицу размера пространства активной зоны эрозии (интенсивность выходного потока частиц эрозии материала), если точнее, то массы объема материала из активной зоны эрозии.

Когда на пути движения инструмента при адгезии к поверхности материала частицы эрозии могут находиться частицы от предыдущего цикла

деструкции (назовём этот поток частиц транзитным), тогда уравнение непрерывности примет вид:

$$m = m_{0f} + m_t z_t + m_{ufs} z = m_{0f} + m_{ufs} [(z_t + z) / 2],$$

где  $z_t$  – координата положения транзитной частицы в направлении движения потока.

Для полноценного учета особенностей динамики эрозии материала в математической модели, кроме уравнения неразрывности потока, полезно уравнение баланса энергии потока частиц эрозии. Процесс физической деструкции структуры материала обработки на элементарные частицы эрозии в некоторой степени равносителен выполнению работы отрыва частицы материала, перемещению ее в пространство зоны эрозии и затем движением совокупного потока среды выдворению за ее пределы.

По классическому определению потенциальная работа это работа по перемещению частицы из одной в другую область координат, то есть, из слоя поверхности через пространство активной зоны эрозии за его пределы. Иначе говоря, изменение энергии частицы эрозии, осуществленное путем передачи частице движения, это и есть работа, совершенная над частицами эрозии материала. Передача энергии происходит в форме силового динамического воздействия на данную частицу.

Если совокупный поток среды с частицами эрозии материала через пространство активной зоны эрозии считать движением с равными векторами скорости всех  $k$  частей потока, то элементарная работа  $\delta A$  движения  $dz$  составит:

$$\delta A = F \times z d \text{ или } \delta A = \sum F_i \times dz = F_k dz, \\ \text{где } (i = 1, 2, 3, \dots, k) .$$

В стационарном движении сила, действующая на отдельную частицу и совокупный поток частиц  $F_i = F_k = \text{const}$ , тогда:  $A = F \times z$ . Сила, действующая на поток, потенциальная, так как выполняемая ею работа по перемещению частиц эрозии зависит только от начального и конечного положений частицы в пространстве зоны эрозии. Мерой движения потока частиц эрозии служит кинетическая энергия, измеряемая работой, которую может совершить поток частиц при его торможении до полной остановки. Эта мера определяется известной формулой:  $w_k = m \times v^2 / 2$ . Если считать совокупный поток среды с виртуально равномерно распределенной массой частиц эрозии, то для его энергии можно записать:  $w_{ke} = 0,5 \int_{(V)} \rho \times v^2 \times dV = 0,5 \int_{(m)} v^2 \times dm$ , где  $dm$  – масса виртуально отдельной  $i$  частицы;  $dV$ ,  $\rho$  и  $v$  – объем, плотность и модуль вектора

скорости совокупного потока среды и частиц эрозии;  $m$  и  $V$  – масса и объем потока среды с частицами. Таким образом, энергия совокупного потока с равномерно распределенной массой движущихся частиц эрозии в пространстве активной зоны равна:  $w_{kf} = w_{ke} = m \times v^2 / 2$ .

Потенциальная энергия частиц потока  $dw_{ke}$ , подобно некоторой силовой функции  $U$ , характеризует потенциальное поле потока частиц и связана с ней равенством  $dw_{ke} = -dU$  или  $w_{ke} = -U + C$ , где  $C$  – постоянная интегрирования. Учтем действие основных факторов при стационарном движении совокупного потока среды с равномерно распределенной массой частиц эрозии в пространстве потока. Тогда для элементарной работы получим следующее уравнение:

$$\delta w = \delta A_1 + d(v^2 / 2) + g \times dz + \delta A_2,$$

где  $\delta A_1$  – удельная эффективная работа, передаваемая телам внешней системы (в сечении потока  $\delta A_1 \cong 0$ ). Второе слагаемое  $d(v^2/2)$  связано с изменением кинетической энергии; третье слагаемое  $g \times dz$  – с потенциальной энергией ( $g = 9,807 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения частиц в потоке под влиянием сил земного тяготения). Четвертое слагаемое  $\delta A_2$  это необратимые превращения работы:

$$\delta A_2 = \left[ R_v (0,5v^2) / l_{ef} \right] dz,$$

где  $l_{ef} = 2\sqrt{(xy/\pi)}$  – эффективный размер сечения совокупного потока среды с частицами эрозии находится из тождества прямоугольного и круглого сечений потока  $\pi D^2/4 = xy$ ;  $R_v$  – сопротивление среды потока движению частиц в пространстве активной зоны эрозии;  $x$  и  $y$  – размеры потока в плоскости образования потока частиц эрозии (для круглой формы  $l_{ef} = D$  – его диаметру);  $z$  – координата текущего сечения потока среды с частицами эрозии, отсчитываемая от начала его формирования при эмиссии (от плоскости отрыва частиц эрозии от материала обработки).

Из выражения для  $\delta w$  видим, что работа и кинетическая энергия совокупного потока с частицами эрозии расходуются: на преодоление трения в среде движения – сопротивление среды активной зоны эрозии, на движение – изменение своего положения в потоке и на изменение скорости потока среды с частицами. Таким образом, уравнение баланса энергии элементарной частицы эрозии, которая образовалась при деструкции материала, можно представить в виде:

$$\begin{aligned} -\delta w &= k_f d(v^2 / 2) + g \times dz + \left[ R_v (0,5v^2) / l_{ef} \right] \times dz = \\ &= k_f d(v^2 / 2) + \left[ g + R_v (v^2) / 2l_{ef} \right] \times dz. \end{aligned}$$

В левой части уравнения стоит выражение удельной потенциальной работы потока среды с частицами при движении в пространстве зоны эрозии. Обратим внимание, что знак минус отражает не приращение, а наоборот, указывает на процесс диссипации энергии в пространстве активной зоны эрозии. Это уравнение наглядно характеризует динамику движения потока среды с равномерно распределенной массой частиц деструкции в зоне эрозии материала обработки [17–19].

Уравнение удельной энергии приводится к простому дифференциальному виду для потока:

$$\begin{aligned} < \rho_f >^{-1} \times dw + k_f d(v^2 / 2) + \\ &+ \left( g + R_v (v^2) / 2l_{ef} \right) \times dz = 0. \end{aligned}$$

Для ламинарного типа движения совокупного потока среды с частицами эрозии  $k_f = 2$ , для турбулентного типа  $k_f = 1,1$ . Первое слагаемое в уравнении – удельная работа движения потока среды с частицами в активной зоне эрозии; второе – работа на изменение скорости потока среды с частицами, то есть, его кинетической энергии; третье – удельная работа на преодоление сопротивления пространства активной зоны эрозии движению совокупного потока с частицами. Это дифференциальное уравнение является уравнением баланса энергии потока среды с равномерно распределенной в среде потока массой частиц эрозии для установившегося стационарного процесса деструкции материала в активной зоне эрозии.

При горизонтальном движении совокупного потока:  $g = 0$ . Тогда получим уравнение баланса энергии для горизонтального движения совокупного потока среды с частицами следующего вида:

$$< \rho_f >^{-1} \times dw + k_f d(v^2 / 2) + \left[ R_v (v^2) / 2l_{ef} \right] \times dz = 0.$$

При постоянной скорости движения  $v \equiv \text{const}$  оно принимает простой вид:

$$< \rho_f >^{-1} \times dw + \left[ R_v (v^2) / 2l_{ef} \right] \times dz = 0.$$

Уравнения стационарного движения потока среды с равномерно распределенной массой частиц в пространстве активной зоны эрозии сведем в систему:

уравнение динамики движения:

$$\begin{aligned} < \rho_f >^{-1} \times dw + k_f d(v^2/2) + \\ + \left[ g + R_v(v^2)/2l_{ef} \right] \times dz = 0; \end{aligned}$$

уравнение баланса массы потока частиц – уравнение его неразрывности:

$\langle m_{eff}(t) \rangle = \langle \rho_{eff}(t) \rangle \langle V_{eff}(t) \rangle \langle v_{eff}(t) \rangle = \text{const}$  и уравнение состояния, если считать поток среды с равномерно распределенной в среде потока массой частиц эрозии (виртуально однофазная система) как идеальный газ, то можно принять за основу уравнение Клапейрона–Менделеева для произвольной массы потока

$$p = \rho \times \eta_p R_p T.$$

Решая полученную выше систему уравнений, сведем ее к одному уравнению – обыкновенному дифференциальному уравнению с разделяющимися переменными:

$$\begin{aligned} - \langle \rho \rangle \times \eta_p R_p T v^{-2} d(v^2) + k_f d(v^2) + \\ + (2g + R_v(v^2)/l_{ef}) \times dz = 0. \end{aligned}$$

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования аспектов движения потока среды с виртуально равномерно распределенной массой частиц в пространстве активной зоны эрозии возьмем за основу полученное выше уравнение. Изучение поведения установившегося стационарного движения потока среды с равномерно распределенной массой частиц в пространстве активной зоны эрозии проведем в изотермических условиях, то есть, при постоянной температуре среды активной зоны эрозии. Влияние отклонения пространства потока и зоны эрозии, например, от горизонтали, связано с наличием зависимости гравитационной компоненты движения среды с равномерно распределенной в среде потока массой частиц эрозии от  $\alpha$  – угла отклонения пространства активной зоны эрозии от горизонтали:

$$\begin{aligned} - \langle \rho \rangle \times \eta_p R_p T v^{-2} d(v^2) + k_f d(v^2) + \\ + (2g \times \cos \alpha + R_v v^2 / l_{ef}) dz. \end{aligned}$$

При горизонтальной ориентации пространства активной зоны эрозии  $\alpha = 0$  и  $\cos \alpha = 1$ . Поэтому, когда  $\cos(\alpha = 0) = 1$ , имеет место проявление наибольшего влияния горизонтальной компоненты уравнения:  $2g \times \cos \alpha \times dz$ . При вертикальной ориентации пространства эрозии:  $\alpha = 90^\circ$  и  $\cos \alpha = 0$ . Сила тяготения (гравитация) направляет поток частиц среды вдоль вертикали пространства активной зоны эрозии. В случае вертикального движения совокупного потока среды и частиц эрозии множи-

тель  $\cos \alpha = 0$  и горизонтальная компонента в уравнении теряют свое влияние:  $2g \times 0 \times dz = 0$ .

Для горизонтальной ориентации пространства активной зоны эрозии уравнение стационарного движения потока среды с виртуально равномерно распределенной массой частиц в пространстве активной зоны эрозии, с учетом действия силы, определяемой уравнением Клапейрона  $p = \langle \rho \rangle \times \eta_p R_p T$  – давления среды потока движения, приводится к частному виду

$$\begin{aligned} - \langle \rho \rangle \times \eta_p R_p T v^{-2} d(v^2) + k_f d(v^2) + \\ + \left[ 2g + R_v(v^2)/l_{ef} \right] \times dz = 0. \end{aligned}$$

Приводя к единообразию подобные члены в этом выражении установившегося стационарного движения среды с равномерно распределенной массой частиц в пространстве зоны эрозии, получим уравнение:

$$\begin{aligned} \left[ -\eta_p R_p T v^{-2} d(v^2) \right] / v^2 (2g + R_v v^2 / l_{ef}) + \\ + \left[ k_f d(v^2) \right] / (2g + R_v v^2 / l_{ef}) + dz = 0. \end{aligned} \quad (A)$$

Считая, что в момент деструкции материала ( $z=0$ ) частица эрозии приобретает скорость  $v_0$ , а в области второй внешней границы пространства активной зоны эрозии ( $z = 1$ ) (граница выноса потока) –  $v_1$ , проведем интегрирование уравнения в этом ( $v_0 \dots v_1$ ) диапазоне изменения скорости потока среды с равномерно распределенной массой частиц в пространстве активной зоны эрозии.

Результат интегрирования уравнения (A) принимает следующее выражение:

$$\begin{aligned} \ln \left\{ \left[ \left( 2g \times \cos \alpha / (v_1)^2 l_z \right) + (R_v / l_{ef}) \right] / \right. \\ \left. \left[ \left( 2g \times \cos \alpha / ((v_0)^2 l_z) \right) + (R_v / l_{ef}) \right] \right\} = \\ = - (2g \times (\cos \alpha) / \eta_p R_p T) \left\{ 1 + (k_f l_{ef} / R_v l_z) \right\} \\ \ln \left[ \left( 2l_{ef} g \times \cos \alpha + (v_1)^2 R_v l_z \right) / \left( 2l_{ef} g \times \cos \alpha + (v_0)^2 R_v l_z \right) \right]. \end{aligned}$$

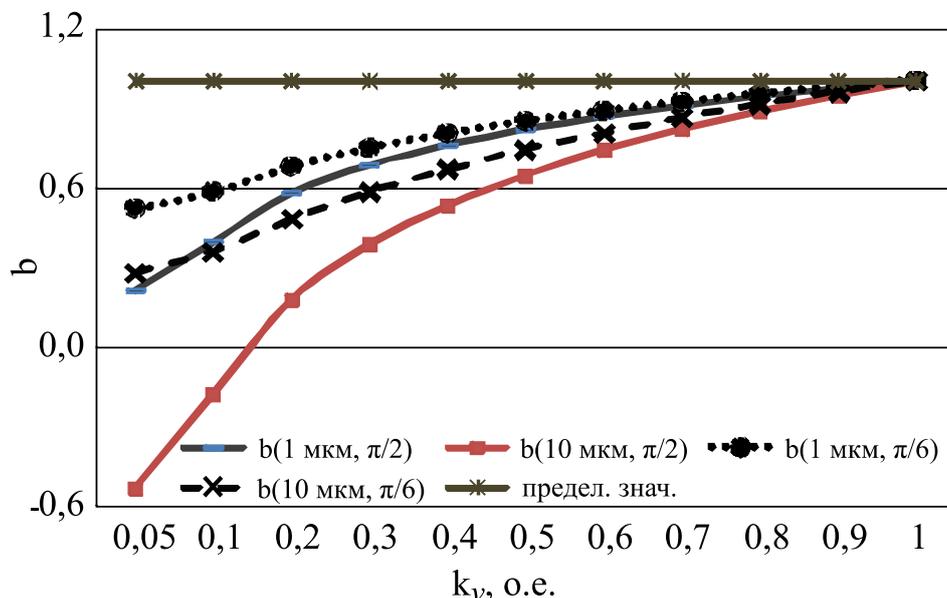
Обозначим теперь:  $a = 2g \times (\cos \alpha) / \eta_p R_p T$  – коэффициент, значение которого зависит от  $\alpha$  – угла ориентации пространства активной зоны эрозии, определяющего ориентацию вектора движения совокупного потока среды с равномерно распределенной массой частиц в пространстве активной зоны эрозии и

$$b = \left\{ 1 + (k_f l_{ef} / R_v l_z) \ln \left[ \left( 2l_{ef} g \times \cos \alpha + (v_1)^2 R_v l_z \right) / \left( 2l_{ef} g \times \cos \alpha + (v_0)^2 R_v l_z \right) \right] \right\}$$

– коэффициент, значение которого зависит от динамики изменения скорости движения потока среды с равномерно распределенной массой частиц в пространстве  $l_z$  активной зоны эрозии, от физических свойств среды совокупного потока и ориентации вектора направления его

**Таблица.** Изменение коэффициента  $a$ , от  $\alpha$  – угла ориентации пространства зоны эрозии, определяющего ориентацию вектора движения совокупного потока среды

Угол $\alpha$ , град	0	10	20	$\pi/6 = 30$	40	45	50	55	60	70	80	$\pi/2 = 90$
$a$ , отн.ед	1	0,984	0,94	0,866	0,766	0,7	0,64	0,57	0,5	0,34	0,17	0



**Рис. 3.** Поведение параметра  $b$  уравнения движения частиц эрозии в совокупном потоке среды для углов ( $\pi/2 = 90^\circ$ ;  $\pi/6 = 30^\circ$ ) ориентации вектора направления движения и двух значений (1 мкм; 10 мкм) длины интервала  $l_z$  выноса частиц эрозии (при  $l_{ef}/R_v l_z \ll 10$ ) в зависимости от величины соотношения ( $k_v = v_0/v_1$ ), отражающего изменение скорости выноса частиц эрозии материала.

движения. Примерный характер изменения коэффициента  $a$ , от  $\alpha$  – угла ориентации пространства зоны эрозии, определяющего ориентацию вектора движения совокупного потока среды, для некоторых выборочных значений приведен в таблице.

При горизонтальном движении совокупного потока среды выноса частиц эрозии  $\alpha = 0$  и величина косинуса принимает максимальное, равное единице, значение:  $\cos \alpha = 1$ . Другими словами, в этом случае преобладает влияние сил гравитации на движение среды совокупного с частицами эрозии потока и значение коэффициента  $b$  определит следующее соотношение:

$$b = \left\{ 1 + \left( k_f l_{ef} / R_v l_z \right) \ln \left[ (v_1)^2 / (v_0)^2 \right] \right\} \text{ или}$$

$$b = \left\{ 1 + 2 \left( k_f l_{ef} / R_v l_z \right) \ln \left[ (v_1) / (v_0) \right] \right\}.$$

Для близких значений начальной и конечной скоростей движения частиц эрозии в потоке среды ( $k_v = v_0/v_1 \rightarrow 1$ ) в интервале  $l_z$  выноса частиц эрозии, когда  $v_1 \cong v_0$ , то есть, при постоянной скорости движения частиц эрозии с момента ее отрыва от материала до ее выхода из пространства активной зоны эрозии, коэффициент  $b$  равен единице:  $b = 1$ . Причем, в этом случае, он будет равен единице независимо от  $l_z$  размера пространства зоны электрической эрозии, типа и температуры среды, благодаря фундамен-

тальности понятия, что логарифм единицы равен нулю:  $\ln 1 = 0$ .

На рис. 3 приведены закономерности изменения параметра  $b$  уравнения движения частиц эрозии в совокупном потоке среды с равномерно распределенной массой частиц в пространстве  $l_z$  зоны эрозии для углов ( $\pi/2 = 90^\circ$ ;  $\pi/6 = 30^\circ$ ) ориентации вектора направления движения потока и двух значений (1 мкм; 10 мкм) длины интервала  $l_z$  выноса частиц эрозии (при соблюдении условия  $l_{ef}/R_v l_z \ll 10$ ), которые получены в результате моделирования поведения уравнения движения совокупного потока среды с равномерно распределенной массой частиц в зоне эрозии.

Зависимости, приведенные на рис. 3, полученные на основе изложенной выше модели микро- и нано- масштаба электрической эрозии, находятся в хорошем статистическом соответствии при верификации с результатами данных, получаемых по теории подобия [34, 36] с экспериментальной практикой [12, 20, 30] макромасштабной эрозии: (нижняя кривая, 10 мкм,  $\pi/2$ ) – наиболее крупные частицы эрозии, имеющие в момент отрыва наименьшую скорость с малой кинетической энергией, практически оседают на дно ниш. При этом коэффициент  $b$  уравнения движения частиц эрозии в совокупном потоке среды имеет отрицательное значение, из-за того, что для выноса оседающих частиц эрозии

требуется высокое давление совокупного потока среды.

Полная затрата энергии электрического разряда на выполнение работы отрыва частицы из слоя поверхности материала обработки является одной из причин оседания на дно ниш части крупных и мелких частиц эрозии. Именно оседающие частицы эрозии имеют в момент отрыва наименьшую скорость и малую кинетическую энергию. Это обстоятельство деструкции структуры вызвано тем, что энергия разряда и, обусловленного им, динамического ударного разрушения фрагмента поверхности была превращена в работу отрыва частицы из слоя материала.

Даже изменение до угла  $\pi/6 = 30^\circ$  наклона инструмента и вектора движения совокупного потока среды при малых скоростях отрыва частиц от слоя материала явно указывает на недостаточную (0,3–0,4) эффективность очистки зоны эрозии от оседающих на дно ниш частиц эрозии. В то же время, как подобное изменение до угла  $\pi/6 = 30^\circ$  наклона инструмента и вектора движения потока среды для меньших в 10 раз (размером 1 мкм) частиц эрозии при малых скоростях отрыва частиц от слоя поверхности повышает существенно (до 0,5–0,6) эффективность очистки зоны эрозии от оседающих на дно ниш частиц эрозии. Дальнейшее изменение угла наклона электрода и вектора движения совокупного потока среды до угла  $\alpha = 0^\circ$ , которое соответствует горизонтальной ориентации пространства зоны эрозии, повышает до наибольшего предельного значения (на рис. 3 – верхняя горизонтальная прямая) эффективность выноса частиц эрозии кинетическим движением совокупного потока среды с виртуально равномерно распределенной массой частиц в пространстве зоны эрозии. Укажем на одну важную деталь. При возникновении в пространстве движения частиц эрозии газового пузыря, влияние его динамики давления и других явлений учитывается в модели соответствующей функцией изменения параметра давления, увеличивающим скорость движения среды на время действия данного явления.

В завершение изложения данного исследования отметим следующее. Углеродные нанотрубки и другие наноструктуры, включая пористый графен, служат уникальной многофункциональной основой из-за их атомно-размерной толщины и низкого сопротивления переносу многих сред как базовых элементов для разделительных мембран. Ввиду актуальности влияния на процессы во многих природных явлениях и применения во многих приложениях [37, 39–44] на практике, пористость стенок угле-

родных нанотрубок (листа графена) и образуемые ими капилляры нанометрового и атомного размера изучаются уже более четверти века. В настоящее время многие источники литературы, например [43, 44], объясняют некоторые результаты и оригинальные механизмы экспериментального исследования проникновения молекул газа через нанопоры листа графена, являющегося стенкой углеродной нанотрубки, как в пределах больших, так и малых атомного размера пор. Следует заметить, что всеобъемлющее понимание границ перехода от понятия малости наноразмера поры к понятию большого наноразмера поры в наноструктурных материалах до настоящего времени отсутствует.

Как основу верификации статистического подхода, изложенного выше в статье, мы используем результаты экспериментального исследования и моделирования молекулярной динамики, опубликованные в [42–44] для проверки, калибровки и оценки функционирования изучаемой нами теоретической модели выноса частиц электроэрозии из активной ее зоны. Физически фундаментальные пределы газонепроницаемости листа графена, являющегося стенкой углеродной нанотрубки, экспериментально установлены в работе [43]. Многочисленные эксперименты, которые проведены с бинарными газовыми смесями, показывают, что адсорбция тяжелых газов внутри пор графена играет критическую роль для переноса газа и других частиц сред в наноразмерном масштабе [44].

## ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель преобразования свойств среды совокупного потока выноса частиц электрической эрозии, учитывающая действие актов стохастической эмиссии частиц эрозии на случайный процесс эрозии в промежутке «swcnt-электрод–поверхность» и динамику выноса частиц эрозии средой промежутка, позволяет аналитически исследовать основные закономерности в аспектах понятий динамики виртуально равномерно распределенного стационарного потока частиц эрозии в пространстве зоны электрической эрозии материалов типа конденсированных сред.

Верификация моделирования процесса очистки пространства активной зоны, проведенная методом подобия, численным анализом и расчетами, созданной модели формирования и динамики движения стационарного совокупного потока среды выноса частиц в ограниченном пространстве электрической эрозии с вариацией свойств среды и геометрии движения, хорошо

согласует статистически сравниваемые результаты и данные.

Представлены результаты численного анализа исследования влияния динамики изменения скорости движения потока среды с равномерно распределенной массой частиц в пространстве  $l_z$  зоны эрозии в зависимости от физических свойств среды совокупного потока и ориентации вектора его движения, определяемого углом ориентации пространства зоны эрозии. Анализ влияния динамики изменения скорости движения потока среды дает возможность оценить эффективность выноса частиц эрозии кинетическим движением совокупного потока среды с виртуально равномерно распределенной массой частиц в пространстве зоны эрозии в зависимости от угла ориентации пространства малого масштаба зоны электрической эрозии.

Результаты численного расчета и анализа, подтвержденные данными математического моделирования, определяют расширение интереса к анализу и оценке возможностей способов формирования электрического сигнала эрозионного воздействия для улучшения качества и точности образования форм при прошивке малых атомного масштаба отверстий. Основываясь на фундаментальности положений теории подобия можно предположить, что разработанную методику возможно использовать и в макромасштабных процессах электрической эрозии. Результаты данной работы могут быть эффективно использованы не только в области нанотехнологий [37, 39–44], но и в других макро- и микро-технологиях с иницированием электрического разряда в конденсированных средах тонкослойным проводником [25–30, 37–40].

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ

Работа создана совместным и равным творческим трудом.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Woodruff, D.P., *Surface Alloys and Alloy Surfaces*, The Chemical Physics of Solid Surfaces, vol. 10, Amsterdam: Elsevier Science, 2002.
- Hosmani, S.S., Kuppusami, P. and Goyal, R.K., *An Introduction to Surface Alloying of Metals*, New Delhi: Springer, 2014.
- Kwok, C.T., *Laser Surface Modification of Alloys for Corrosion and Erosion Resistance*, Oxford: Woodhead Publishing Ltd., 2012.
- Yilbas, B.S. and Shuja, S.Z., *Laser Surface Processing and Model Studies*, Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- Siddiqui, A.A. and Dubey, A.K., Recent trends in laser cladding and surface alloying, *Opt Laser. Technol.*, 2021, vol. 134, 106619.
- Zhuang, D.-D., Du, B., Zhang, S.-H., Tao, W.-W., et al., Effect and action mechanism of ultrasonic assistance on microstructure and mechanical performance of laser cladding 316L stainless steel coating, *Surf. Coating. Technol.*, 2022, vol. 433, 128122.
- Pellizzari, M., Zhao, Z., Bosetti, P. and Perini, M., Optimizing direct laser metal deposition of H13 cladding on CuBe alloy substrate, *Surf. Coating. Technol.*, 2022, vol. 432, 128084.
- Koa, J., Kim, J.W., Min, H.W., Kim, Y., et al., Review of manufacturing technologies for coated accident tolerant fuel cladding, *J. Nucl. Mater.*, 2022, vol. 561, 153562.
- Yeom, H. and Sridharan, K., Cold spray technology in nuclear energy applications: a review of recent advances, *Ann. Nucl. Energy*, 2021, vol. 150, 107835.
- Han, B., Chen, Y., Tan, C., Jiang, M., et al., Microstructure and wear behavior of laser clad interstitial CoCrFeNi high entropy alloy coating reinforced by carbon nanotubes, *Surf. Coating. Technol.*, 2022, vol. 434, 128241.
- Liu, F., Li, A., Shen, Z., Chen, H., et al., Microstructure and corrosion behavior of AlTi-TiC-CNTs/AZ31 magnesium matrix composites prepared using laser cladding and high speed friction stir processing, *Opt. Laser. Technol.*, 2022, vol. 152, 108078.
- Angelo, P.C., Micro and nanofabrication by powder metallurgy, *J. Powder Metall. Min.*, 2015, vol. 4, p. 1.
- Deeva, V. and Slobodyan, S., Effect of pressure changes in sliding contact, *Int. J. Eng. Technol. (UAE)*, 2018, vol. 7, p. 167.
- Graphene: Fabrication, Characterizations, Properties and Applications*. Zhu, H., Xu, Z., Xie, D., Fang, Y., Eds., Beijing: Academic Press, 2018.
- Deeva, V., Slobodyan, S. and Martikyan, M., Physical model of the sliding contact of conductors of the alloy Cu-Zr and Cu-Re under high current density, *Materials Today: Proc.*, 2016, vol. 3, no. 9, part B, p. 3114.
- Silva, J., Lanceros-Mendez, S. and Simoes, R., Effect of cylindrical filler aggregation on the electrical conductivity of composites, *Phys. Lett. A*, 2014, vol. 378, p. 2985.
- Deeva, V.S., Slobodyan, S.M. and Teterin, V.S., Optimization of oil particles separation disperser parameters, *Mater. Sci. Forum*, 2016, vol. 870, p. 677.
- Tinh, T., Chuc, N., Jourdain, V., Paillet, M., et al., Synthesis of individual ultra-long carbon nanotubes and transfer to other substrates, *J. Exper. Nanosci.*, 2011, vol. 6, p. 547.
- Gao, X., Li, T., Sarkar, A., Li, L., et al., Development and validation of an enhanced filtered drag model for

- simulating gas-solid fluidization of geldart: A particles in all flow regimes, *Chem. Eng. Sci.*, 2018, vol. 184, p. 38.
20. Bokov, V.M. and Sisa, O.F., Application of an electric arc to produce metal powders, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, p. 390. [doi.org/10.3103/S1068375520030023](https://doi.org/10.3103/S1068375520030023).
  21. Bokov, V.M., Sisa, O.F. and Mirzak, V.Y., Mechanism of formation of plane surfaces with an electric arc, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, p. 162. [doi.org/10.3103/S1068375519020066](https://doi.org/10.3103/S1068375519020066).
  22. German, R.M., Progress in titanium metal powder injection molding, *Materials*, 2013, vol. 6, p. 3641.
  23. Melander, A., Delic, A., Björkblad, A., Juntunen, P., et al., Modelling of electrohydraulic free and die forming of sheet steels, *Int. J. Mater. Form.*, 2013, vol. 6, p. 223.
  24. Hassannejadas, A., Green, D.E., Golovashchenko, S.F., Samei, J., et al., Numerical modeling of electrohydraulic free-forming and die-forming of DP590 steel, *J. Manuf. Process.*, 2014, vol. 16, p. 391.
  25. Malyshevskaya, A.P. and Malyshevskii, P.P., Optimization of the process of fine electric discharge dispersion, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, p. 400.
  26. Gruzdev, A.A., Morgunov, Y.A. and Saushkin, B.P., Electrical discharge drilling of small diameter holes upon ultrasonic field application. Part 1. Results of technological experiments, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, p. 166.
  27. Furusato, T., Yamamoto, Y., Sakamoto, T., Oura K., et al., Simulation of voltage/current waveforms and contact area of pulsed surface discharge on water, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, vol. 26, p. 439.
  28. Поздеев В.А., Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости, Киев: Наукова думка, 1980.
  29. Shchukin, E.D. and Zelenev, A.S., *Physical-Chemical Mechanics of Disperse Systems and Materials*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
  30. Косенков, В.М., Влияние объема цилиндрической разрядной камеры с жесткими стенками на поле давления в заполняющей ее воде, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 2, с. 68.
  31. Slobodyan, M.S., Shishigin, S.A. and Slobodyan, S.M., Method of acoustic sensor diagnosis, *Meas. Tech.*, 2008, vol. 51, no. 7, p. 798.
  32. Bol'shanin, A.A., Slobodyan, S.M., Yakovlev, A.R. and Vasil'eva, L.A., Two-channel optical transducer for an industrial inspection system, *Meas. Tech.*, 1987, vol. 30, no. 10, p. 954. [doi: 10.1007/BF00864986](https://doi.org/10.1007/BF00864986).
  33. Deeva, V. and Slobodyan, S., Assessment of the tribological contact between sliding surfaces via an entropy approach, *J. Tribol. – Trans. ASME*, 2019, vol. 141, 031602.
  34. Deeva, V. and Slobodyan, S., Nanolayer in brush collector contact under Joule heating, *Appl. Surf. Sci.*, 2020, vol. 500, 143999.
  35. Kim, S.H., Haines, C.S., Li, N., Kim, K.J., et al., Harvesting electrical energy from carbon nanotube yarn twist, *Science*, 2017, vol. 357, p. 6353.
  36. Гухман, А.А., *Введение в теорию подобия*. М.: ВШ, 1973. 296 с.
  37. Deeva, V. and Slobodyan, S., Mathematical model of tip oscillations: influence on image quality, *Appl. Surf. Sci.*, 2020, vol. 516, 146144.
  38. Смирнов, А.П., Жекул, В.Г., Хвощан, О.В., Иницирование электрического разряда в воде тонкослойным проводником, *ЭОМ*, 2021, vol. 57, № 2, с. 15.
  39. Kumar, Y., Sahoo, S. and Chakraborty, A.K., Mechanical properties of graphene, defective graphene, multilayer graphene and SiC-graphene composites: A molecular dynamics study, *Physica B: Cond. Matter.*, 2021, vol. 7, 413270.
  40. Li, X.J., Hibiki, T., Frictional pressure drop correlation for two-phase flows in mini and micro single-channels, *Int. J. Multiphase Flow*, 2017, vol. 90, p. 29.
  41. Kong, R., Kim, S., Bajorek, S., Tien, K., et al., Effects of pipe size on horizontal two-phase flow: Flow regimes, pressure drop, two-phase flow parameters, and drift-flux analysis, *Experim. Therm. Fluid Sci.*, 2018, vol. 96, p. 75.
  42. Dai, H., Hafner, J., Rinzler, A., Colbert, D., et al., Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy, *Nature*, 1996, vol. 384, p. 147.
  43. Sun, P.Z., Yang, Q., Kuang, W.J., et al., Limits on gas impermeability of grapheme, *Nature*, 2020, vol. 579, p. 229.
  44. Radha, B., Esfandiar, A., Wang, F., Rooney, A.P., et al., Molecular transport through capillaries made with atomic-scale precision, *Nature*, 2016, vol. 538, p. 222.

### Summary

A model of the physical properties and structure changes inside the gap between the swcnt and surface is proposed. The swcnt was viewed in the model as anode, the surface as cathode, and the gap between them as the time-changed homogeneous media. The electrical erosion occurs in this gap according to probabilistic nature. The aim of the paper was to propose the model to stimulate particle emissions from the gap, namely, to ejects particles from the space to prevent electrical corrosion. This stochastic model investigates the stream of the micro- and nanosized particles generated and detached from the surfaces of the anode and the cathode considering the movement of the particle flow, orientation of the gap in space, and the stream density change. The result demonstrates the impact of the orientation angle of the space on the parameters of the erosion particle flow. The findings are in a good agreement with the experimental studies of many investigations.

*Keywords:* wear fraction, probabilistic nature, uniform medium, erosion zone, nanotube, spacing arrangement