

Детализация и общая модель электронной обработки поверхностей заряженных плазмOIDов (от атомных ядер до белых карликов, нейтронных звезд и ядер галактик). Часть III. Поведение, модификация и синергетизм плазменных положительно заряженных кумулятивно-диссипативных структур (+КДС) при внешних воздействиях

Ф. И. Высикайло

ФГБНУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов»,
ул. Центральная, дом 7а, г. Троицк, 142190, Московская обл., Россия, e-mail: filvys@yandex.ru

Проведен анализ 3D архитектуры кумуляции и диссипации энергомассовоимпульсных потоков в плазменные +КДС при внешнем воздействии на эти структуры дальнедействующего электрического поля. Рассмотрены: 1) взаимодействия внешних электрических полей с квазистационарными положительно заряженными плазмOIDами (плазменными +КДС), в которых в результате кумуляции электронов происходит формирование кумулятивных струй высокоэнергетичных электронов; 2) кластеризация отдельных плазмOIDов в их регулярные системы – диссипативные «кристаллы» и 3) синергетические эффекты, обусловленные слиянием +КДС.

Ключевые слова: кумуляция, положительно заряженный плазмOID, кумулятивные струи, синергетика, точка либрации-кумуляции, страты, обратное движение катодного пятна.

УДК 537.5

ВВЕДЕНИЕ

От работ Джильберта (врача королевы Англии Елизаветы, 1600 г.) с электроскопом, где *нарушение нейтральности (НН)* вызывало отталкивание заряженных пластинок, прошло 413 лет. При этом сохраняется миф о полной нейтральности газоразрядной плазмы в её структурах. Этот миф является ошибкой, препятствующей развитию физики и приборов, в которых применяется плазма. Пора признать, что НН происходит от атомного ядра до скопления галактик и не учет этого приводит к огромному числу *асимптотических парадоксов* [1, 2]. Эти парадоксы (несовпадения экспериментальных наблюдений с неполноценными, как их называл А.А. Власов, теориями, пренебрегающими существенными процессами) возникают при пренебрежении дальнедействующим 3D стягиванием заряженных положительным зарядом плазменных кумулятивно-диссипативных структур (+КДС) далёкими электромагнитными силами и, в частности, давлением внешних (периферийных) для заряженного плазмOIDа электронов, захваченных в потенциальные ямы +КДС [1, 2]. Далее на базе [1, 2] опишем поведение, модификацию и синергизм +КДС в газоразрядной плазме при воздействиях.

САМООРГАНИЗАЦИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПЛАЗМОИДОВ

Даже слабое протяжённое НН приводит к самоорганизации кулоновских «зеркал» [1, 2]. Кулоновское «зеркало» постоянно возвращает запертые +КДС электроны к её центру [1]. Возвращение электронов в плазменную +КДС приводит к обжатию ими всех компонент плазмы и генерации динамического поверхностного натяжения на всей поверхности плазмOIDа. Положительные ионы в их синергетическом поле двигаются более медленно, чем электроны, и медленно выметаются из плазмOIDа, формируя в +КДС подобие ионной решётки. Без внешнего воздействия +КДС, обжатый электронами извне, обязан из-за внутреннего давления электронного газа и объёмного заряда ионной решётки принимать форму шара с постоянным давлением в последнем. При возмущении +КДС наблюдается эллиптическая (рис. 1–3 в [1]), цилиндрическая (рис. 1 и рис. 4 в [1]) или даже плоскостная формы (рис. 4в) в [1]. Эффективной, в плане кумуляции (сбережения) энергии электронов в заряженном аттракторе, является плоскостная форма (страты) [1]. Нескомпенсированные ионы структурируются в ионные газообразные кристаллы. Для их

описания в плазменной +КДС следует использовать капельную модель (с плотностью объёмного заряда $\rho = \text{const}$), применяемую для описания атомного ядра. При структуризации от размеров плазмоида до атомного ядра ионов возникает *физическая динамическая фрактализация* концентраций, энергий и импульсов электронов на мезо- (макро-) и микроуровнях (атомных размерах). Исследование синергетического взаимодействия и взаимного уравнивания физических процессов на всех уровнях фрактализации и сортировки процессов кумуляции и диссипации представляет сложную задачу. Нужны упрощения задачи, но не учитывать НН в плазмоидах, формирование в них *газообразных ионных кристаллов* и резервуаров – аттракторов для накопления кинетической энергии свободных электронов нельзя, это является грубейшей ошибкой [1, 2].

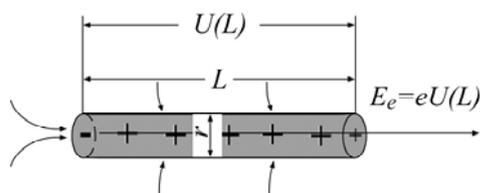


Рис. 1. Плазменная асимметричная андрогинная линейная ($L \gg r$) +КДС, кумулирующая в себя электроны (направление их движения отмечено стрелками) и формирующая из них пучок высокоэнергетичных электронов с энергией $E_e \sim U(L)$. Плазменная +КДС может прорасти в сплошную среду как в правую (вперёд андрочастью), так и в левую сторону (вперёд гинной частью). Пучок энергетичных электронов (андроструктура) распространяется только в одну сторону – против поля.

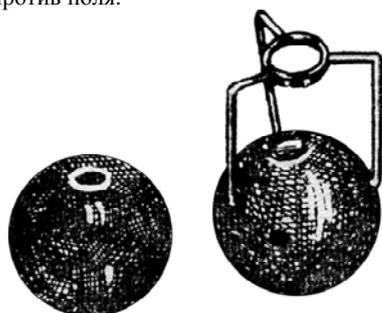


Рис. 2. Конструкции полых сферических катодов, применявшихся в начале прошлого века.

Упрощением для описания +КДС являются обобщённые в [1, 2]: 1) модель Резерфорда – супраатома; 2) капельная модель атомного ядра, в которой плотность нескомпенсированного заряда ρ постоянна; 3) модель Гамова (проникновения α -частицы через потенциальный барьер атомного ядра).

Экстракция энергетичных электронов из плазмоидов используется в полых катодах. Полые катоды имели форму амфор, в которых локализовалось заряженное катодное пятно (*КП*) (рис. 2). Из +КДС–КП внешним полем экстраги-

ровался пучок энергетичных электронов, преионизирующий газ в промежутке. Согласно теореме Гаусса и обобщённой модели Резерфорда-Гамова, максимальные значения напряжённости полей $E \sim \rho R$ достигаются на периферии +КДС с потенциальным барьером $U \sim \rho R^2$ [1]. R – размер плазмоида. Запертые в +КДС электроны имеют максимальную кинетическую энергию $E_e \approx U \sim \rho R^2$ в центре плазмоида (рис. 5в и г в [1]). Понимание кумулятивных и диссипативных процессов в КП в полых катодах и иных +КДС достигается в последнее время [1–5], хотя эти задачи обсуждались в [6–10]. В 3-й части работы рассмотрим взаимодействия внешних полей с плазменными +КДС. Воздействия будем считать малыми, то есть не разрушающими +КДС. Корректный учёт НН позволяет решить огромное число парадоксов. Эти парадоксы для +КДС приведены в [6]. Решение парадоксов, обусловленных НН, проведём не на базе диффузионных диссипативных структур Пригожина-Тьюринга-Колмогорова или моделей А.В. Гуревича о «загадочном» пробое по трекам Космических лучей, а на базе теории формирования кумулятивных струй (*КС*) электронов из плазменных конвективных +КДС Высикайло [1–4].

ВЫБОР ОБЩЕЙ КОНЦЕПЦИИ В РАМКАХ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

Проведём анализ свойств +КДС в слабоионизованной плазме с $\alpha_e = n_e/N \sim 10^{-6}$, где N – плотность газа; n_e – концентрация электронов. Таунсенд доказал, что все процессы переноса, рождения и гибели в слабоионизованной газоразрядной плазме определяются параметром E/N (E – напряженность электрического поля). Параметр E/N определяет и глобальные параметры +КДС [3–5, 7, 8]. Ещё с позапрошлого века можно выделить две концепции при описании структур в такой плазме. К приверженцам первой концепции можно отнести: Л. Леба, утверждавшего, что явления в искре нельзя свести только к тепловому нагреву [6] (изменению только N); И.Г. Кесаева, исследовавшего взрывные процессы в области катодов [9]; А.А. Власова и их последователей, считающих, что в плазменных явлениях имеет место нелинейное взаимодействие электрического поля (E и U) с плазмой. Власов утверждал (в общих чертах), что плазма – это система заряженных частиц, не являющихся свободным газом, а это своеобразная 3D система, стянутая далёкими кулоновскими силами [10, стр. 12]. Мы учтём влияние стягивающих сил и потенциальных стенок ($U(r)$) на кумулятивные процессы в +КДС. Во внешнем поле профили поля определяют визуализацию плазмоидов. Где происходит кумуляция поля (боль-

ше E/N), там происходит генерация заряженных частиц, возбуждаются атомы и молекулы, поэтому визуально и фотографически наблюдаются светящиеся +КДС (плазмоиды).

Ко второй группе относятся Н.А. Капцов и его сторонники, считающие, что нейтральные плазменные структуры определяются неоднородностями тепловыделения, термической или ступенчатой неустойчивостью или пробоем по трекам космических лучей. По этой концепции E/N и частота возбуждения газа зависят только от N , колебательного возбуждения молекул или возбуждения электронных степеней свободы. Структурная 3D самокумуляция электрического поля в плазменных +КДС в их работах не затрагивается или прячется под словом *пробой*.

Автор не умаляет роль процессов нагрева газа, уменьшающего N и тем самым увеличивающего E/N , определяющего процессы и свечение +КДС. Но доказывает, что в основе самоорганизации +КДС лежат кумулятивные явления. Соорганизация дальнедействующих полей и заряженных компонент плазмы синергетически (совместно) определяет формообразование и жизнедеятельность 3D плазмоидов, а в дальнейшем – и 3D формы нагрева в 3D+КДС. Определение кумуляции в физике плазмы до сих пор не применяется, хотя кумуляция и КС определяют во многом явления, происходящие в +КДС. Экстремальные состояния в среде достигаются через механизмы формирования областей кумуляции энергомассовоимпульсных потоков (ЭМИП) [11]. Эти области можно назвать притягателями или аттракторами [1, 2]. В аттракторах происходит кумуляция материи в различных ее проявлениях. При кумуляции параметры активизированной среды достигают критических значений и в этой области часто аттракторы визуализируются [12]. По Я.Б. Зельдовичу: “Кумуляция, то есть концентрация в малом объеме силы, энергии или другой физической величины, представляет собой важнейшее явление природы” [11]. Это удачное определение самофокусировки в экстремальных природных явлениях. В области фокусировки, как результат кумуляции, формируется КС или иная диссипативная (разбрасывающая) структура. В активной фазе фокусировщик и диссипатор (разбрасыватель или КС) работают в диалектическом единстве. Основа всех кумулятивно-диссипативных 3D систем – конвективная динамика. Явления в аттракторах любой природы энергетически подпитываются благодаря постоянной фокусировке радиально схлопывающихся ЭМИП и их трансформации (рис. 1 и в [1] рис. 1–5). В заключение в [11] сказано, что, несмотря на неустойчивость кумуляции в сплошных средах, она остается очень полезной идеализацией, до-

пускающей точные решения и указывающей, как к ней приближаться практически, не рассчитывая, однако, на самофокусировку. В [1–5] и в данной работе автор доказывает, что такая ограниченная самофокусировка кулоновскими силами существует в плазме на всех уровнях размеров +КДС – от фемтометров до размеров галактик и их скоплений. Зная о её существовании, можно описать «загадочные» явления, обусловленные формированием плазменных заряженных или поляризованных аттракторов. В плазменной +КДС кумуляцию ионов исполняют возвращающиеся в неё электроны. Они сбрасывают +КДС к её центру. Кумуляция электронов и формирование КС высокоэнергетичных электронов из +КДС обусловлены нескомпенсированным зарядом +КДС.

ПРОЦЕССЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ КОНВЕКТИВНЫЕ +КДС

Основными процессами, формирующими +КДС, являются амбиполярные и не амбиполярные конвективные процессы – КС электронов [13–16]. При различной зависимости подвижностей электронов и ионов от параметра E/N в плазме появляется амбиполярный дрейф в электрическом поле. Из-за этого дрейфа неоднородности плазмы поляризуются и сносятся к одному из электродов (в зависимости от параметров разряда). Скорость амбиполярного дрейфа плазмы в азоте направлена от катода к аноду и достигает, согласно экспериментам и аналитическим расчётам, до 70 м/с [14–16] (см. рис. 2 в [1]). Это обуславливает возможность формирования *конвективных* +КДС с ограниченной кумуляцией ЭМИП (см. рис. 2 в [1]). Конвективные амбиполярные процессы соорганизации потоков различных компонент плазмы в схлопывающиеся амбиполярным дрейфом плазменные +КДС в электрических полях имеют скорости от 10 до $\sim 10^5$ м/с [3–5, 7, 13–17].

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМОИДОВ С ВНЕШНИМИ ПОЛЯМИ

У свободных электронов в плазменной +КДС во внешнем электрическом поле формируется функция распределения электронов по энергиям (скоростям). При степени ионизации в плазменной +КДС на уровне $\alpha_i \approx 10^{-5}$ существенными становятся электрон-электронные столкновения. При этом возникает мощный энергетический поток в область высокоэнергетичных электронов, которые, получив энергию большую, чем потенциальный барьер +КДС, будут покидать эту потенциальную яму в виде КС высокоэнергетичных электронов в направлении, противоположном

напряжённости внешнего электрического поля (рис. 1), питающего цилиндрический плазмоид (+КДС), тем самым увеличивая потенциальный барьер плазмоида (из-за увеличения ρ). Это кумулятивно-диссипативная неустойчивость плазмоида развивается при наличии внешнего энергетического источника питания, способного поддерживать функционирование плазменной +КДС при наличии в ней диссипативных процессов, расплывающих энергию и положительные ионы. Постоянно или периодически выводя пучок высокоэнергетичных электронов из +КДС, можно поддерживать структуру (рис. 1) в квазистационарном или импульсно-периодическом состоянии и применять на практике для катализации различных реакций и даже для специальных целей. Такими задачами занимался Н. Тесла и занимаются по сей день США, например на Аляске. При этом на КС электронов может происходить бикумуляция ионных потоков к катоду [2, 3]. Самоорганизация плазменных +КДС, как сообщалось в [1–4], в основном обусловлена различием *инерционных свойств* электронов (с массой m_e) и ионов (с массой $M_i \gg m_e$). Конвективные потоки плазмы обусловлены и нелинейными эффектами [1–5]. Дуальность процессов в +КДС обусловлена тем, что в них имеются два типа локально свободных электронов по величине кинетической энергии E_e : с $E_e < U(L)$ и с $E_e > U(L)$. Слабоэнергетичные электроны с $E_e < U(L)$ – потенциальная энергия электрона в +КДС – не могут покинуть +КДС и являются её частью, определяющей свойства плазмоида – резонатора для электронов. Давление внутри плазмоида определяется давлением именно захваченных им электронов. Электроны с $E_e > U(L)$ покидают +КДС и поэтому не являются постоянной составляющей +КДС. Но они активизируют внешнюю среду, окружающую +КДС. Согласно обобщённой автором модели Резерфорда-Гамова (рис. 1 и рис. 5 в [1]), максимальная возможная энергия запертых в +КДС электронов достигает величины перепада потенциала $U(L)$ на всей +КДС и достигает в молниях нескольких МэВ [6] (рис. 1). Высокоэнергетичные электроны локализируются в центре +КДС (схема, рис. 5 в [1]) и могут выплёскиваться из неё в виде КС при наложении внешнего возмущения, локально разрушающего барьер, запирающий электроны в +КДС (рис. 1).

Классификации 3D плазмоидов и кумулятивно-диссипативных «кристаллов» следуют непосредственно из архитектуры кумуляции и диссипации ЭМИП в +КДС с кулоновским барьером.

В процессах фокусировки выделяют несколько типов симметрии упорядоченных кумулирующих ЭМИП. Возможны кумуляции с: 1) пло-

скостной, 2) цилиндрической, 3) сферической и 4) конической геометрией (рис. 3) [1]. У регулярных систем из +КДС можно выделить несколько типов симметрии (рис. 4, 5). Время формирования всей +КДС определяется суммой времени t_n , необходимого для прохождения амбиполярных и не амбиполярных сигналов по всем кумулятивным и отталкивательным подструктурам, формирующим смешанный каскад [18]:

$$T = L/V_{al} = \sum_1^n L_1/V_{a1} + L_2/V_{a2...} + L_n/V_{an}, \quad (1)$$

где L и V_{al} – размер и средняя скорость распространения сигналов в иерархичной макроструктуре; L_k и V_{ak} – характерный размер k -й мезоструктуры и скорость амбиполярного сигнала в этой структуре, входящей в каскад (из n структур), соответственно. Формула (1) очевидна в рамках теории каскадной кумулятивной гидродинамики +КДС, но с ее помощью удастся объяснить «загадочное» импульсно-периодическое продвижение молнии [4], экспериментальные наблюдения которой приведены в [6, стр. 518]. В [3, 4] рассмотрено несколько типов каскадов. К первому типу каскадов отнесены плоскостные аттракторы (рис. 3–1), формирующие регулярные системы или плазменные плоскостные диссипативные «кристаллы» – страты. Ко второму типу аттракторов в работе [3, 4] относятся цилиндрические аттракторы (рис. 1 и 3–2) с КС, осуществляющие фокусировку и вынос энергетичных электронов из +КДС. К третьему типу отнесены сферические притягатели (рис. 3–3) с КС. Первый и второй типы кумуляции наблюдались в экспериментах с разрядами в сверхзвуке в [4] (рис. 4в [1]).

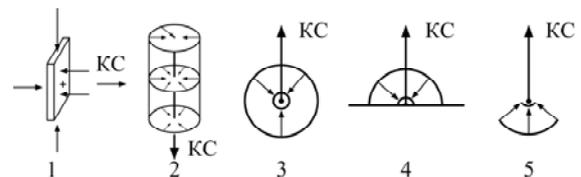


Рис. 3. Схемы геометрической кумуляции: 1 – плоскостной; 2 – цилиндрической; 3, 4 – сферической; 5 – конической. КС – кумулятивная струя.

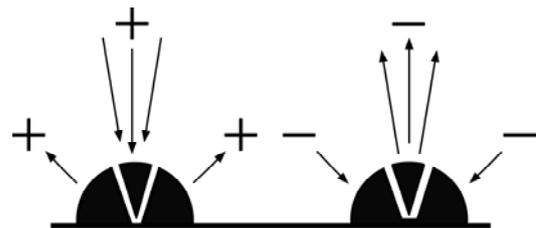


Рис. 4. Два катодных пятна. Стрелками над первым пятном показаны направления потоков ионов, над вторым – электронов. Схемы иллюстрируют бикумуляцию потоков ионов на потоках электронов, выбитых сфокусированным пучком ионов из катода.

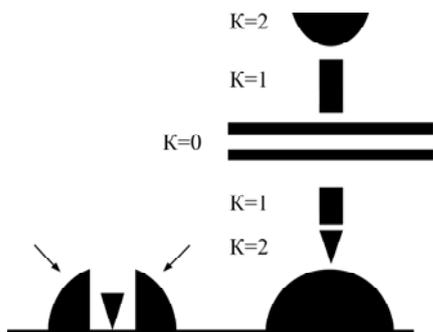


Рис. 5. Два катодных пятна. Стрелками на первом пятне показаны направления кумуляции потока электронов и взрывного роста приведенной напряженности электрического поля [3]. Над вторым пятном приведена компоновка структурированных плазмодов с различной симметрией ($\kappa = 0$ – плоскостная; $\kappa = 1$ – цилиндрическая; $\kappa = 2$ – сферическая).

ПЛОСКОСТНЫЕ 3D КУМУЛЯТИВНО-ДИССИПАТИВНЫЕ «КРИСТАЛЛЫ»

Плоскостные +КДС (аттракторы), формирующие регулярную систему, называются стратами (рис. 5, $k = 0$ и рис. 6). Страты формируют регулярные системы из чередующихся светящихся и темных областей [6, 13, 19, 20]. В темных областях происходит кумуляция электронов к фокусу – точке кумуляции Высикайло-Эйлера, а в светлых – увеличивается напряженность поля [13]. Поэтому страты относятся к кумулятивно-диссипативным «кристаллам» [3, 13]. Страты бывают стационарными и бегущими. Парадоксы, связанные с 3D-стратами в наносекундных разрядах из-за формирования точек кумуляции Высикайло-Эйлера, подробно исследованы в [13]. В результате исследований в [13]:

1) выявлены аналоги в небесной механике (исследованные Эйлером, Лагранжем и Рошем), в газоразрядной плазме и полупроводниках в [13]. В аналогах стягивание потоков частиц осуществляется дальнедействующими потенциалами, описываемыми уравнением Пуассона ($\Delta\phi = \rho$, здесь ϕ – потенциал, ρ – соответствующая плотность массы или заряда). Потенциальные стенки управляют потоками частиц на расстояниях как в случае гравитации, так и в случае кулоновского поля. Точки кумуляции Высикайло-Эйлера потоков электронов (с напряженностью электрического поля $E \approx 0$ и большими концентрациями электронов) за +КДС – катодными пятнами – обуславливают формирование фарадеева темного пространства между КП и положительным столбом в разрядах [13] (рис. 6а);

2) классифицированы страты и аналитически определены фокусные расстояния плазменных положительно заряженных линз – 3D страт. Доказано, что характерный размер фокусного расстояния положительно заряженной страты (до-

мена электрического поля) $R_F \approx 1/\alpha_i = V_e/v_i$ в случае наносекундных разрядов определяется **эффективным** первым ионизационным коэффициентом Таунсенда α_i , то есть эффективной ионизацией v_i и дрейфовой скоростью электронов V_e ;

3) установлено, что **эффективный первый коэффициент Таунсенда** в случае узких (вдоль тока) и широких страт (в ортогональном полном току направлении), когда согласно уравнению Пуассона $\partial E_x/\partial x \approx E_x/l_x \approx \partial E_r/\partial r \approx E_r/l_r \sim \rho$ и $E_r \gg E_x$, **определяется** не продольным $E_x \approx l_x \rho$, а **радиальным электрическим полем** $E_r \sim l_r \rho$. У этих страт $l_r \gg l_x$, а значит, $E_r \gg E_x$;

4) выявлена подавляющая роль периферийной ионизации в процессах формирования узких и широких страт (рис. 6б), обусловленная объемным зарядом светящихся областей (рис. 6а,б).

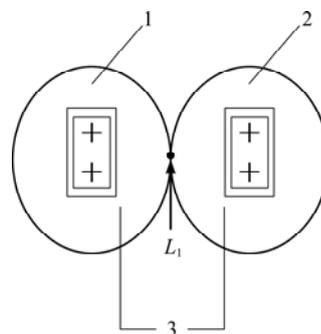


Рис. 6а. Сечение равного потенциала в сечении двух +КДС: катодного пятна и положительного столба. Схема эквипотенциальной поверхности Высикайло-Роша состоит из двух замкнутых (эквипотенциалью) полостей 1 и 2, окружающих катодное пятно 1, например, слева, и положительный столб – 2 – справа (или две положительно заряженные страты) и имеющих общую точку кумуляции потоков электронов L_1 [13], 3 – область Фарадеева темного пространства между +КДС.

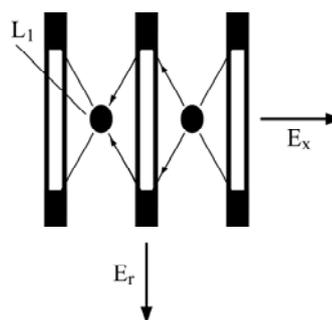


Рис. 6б. Схема кумуляции потоков электронов в области +3D структур – страт [13]. Черными прямоугольниками отмечены периферийные области повышенной ионизации частиц газа. Фокусы L_1 являются аналогами точек либрации (кумуляции) Лагранжа, открытых Эйлером в 1767 г. Стрелками показаны потоки электронов из областей периферийной ионизации в точки их кумуляции L_1 .

Волновые колебания тока с частотой $\sim 10^9 - 10^{10}$ Гц наблюдались в однородном многодолинном полупроводнике при приложении к нему сильного электрического поля. Впервые этот эффект наблюдался Джоном Ганном в

1963 г. [21]. *Эффект Ганна* сразу же был его первооткрывателем связан с ударными волнами электрического поля. Ганн в первых же работах [21, 22] обнаружил зависимость частоты осцилляций тока от поперечного размера полупроводника. Это явно указывало на важность в эффекте Ганна, а значит, и в заряженных стратах, периферийной ионизации и дрейфа электронов (рис. 6б). Однако всюду в численных и аналитических моделях для описания и эффекта Ганна, как и в случае страт, до сих пор **ошибочно** применяются 1D модели (с учётом 1D уравнения Пуассона). Об открытии скачков с НН (ударных волн электрического поля) в плазме, аналогичных скачкам Ганна, ударным волнам Маха и ударным волнам магнитного поля Сагдеева, сообщалось в 1985 г. в [5]. Более детальная 1D теория скачков с НН в газоразрядной плазме позднее, в 1986 г., была предложена в [23]. Сравнение экспериментальных профилей поля в области ударной волны, остановленной прокачкой газа (рис. 2 в [1]) с 1D численными расчётами, показало [15], что для моделирования слоя заряда необходимы 3D модели с учётом НН и периферийной ионизации (рис. 6б).

Описаны расслоения Пекарика [19], когда групповая скорость V_g страт равна фазовой V_p и противоположно ей направлена. В [20] указывалось, что такое возможно только при существенной роли смешанной производной. Смешанная производная возникает только при учёте НН (уравнения Пуассона (см. уравнение (7) в [5])):

$$\partial n_e / \partial t + \partial(\nabla E_0 / 4\pi e) / \partial t + \nabla(\mu_{i0} E_0 n_e) + \nabla\{\mu_{i0} \nabla(E_0^2 / 8\pi e)\} = I_i - R_i. \quad (2)$$

3D уравнение (2) содержит члены, описывающие нелинейные процессы амбиполярного переноса, обусловленные НН. Второй член со смешанной производной ответствен за **конвективный** амбиполярный перенос в случае нестационарных явлений. Для стационарных задач этот член равен нулю. Он ответствен за формирование и распространение бегущих неоднородностей (бегущих страт и расслоение Пекарика [19]). Третий член определяет амбиполярный дрейф плазмы как целого и принимает активное участие в формировании неоднородных слоев типа фарадеева темного пространства [3–5, 15–17] и стоячих страт в [24]. Четвертый член ответствен за амбиполярную диффузию, обусловленную НН плазмы [5, 8]. В настоящее время решить уравнение (2) и получить аналитически соответствующие коэффициенты амбиполярного переноса удается только в одномерном случае [5, 8] в рамках плоскостной, сферической и цилиндрической симметрий. В случае плоскостной симметрии

$$\partial n_e / \partial t - \partial l_E \nabla n_e / \partial t + \nabla(\mu_{i0} E_0 n_e) - \nabla\{\mu_{i0} E_0 (l_E \nabla n_e)\} = I_i - R_i, \quad (3)$$

где индекс “0” обозначает, что в этих коэффициентах параметр E/N следует считать в нулевом приближении ($E = E_0$). Уравнение (3) получено при модификации концентрации ионов n_i на $n_e - l_E \nabla n_e$. Член $l_E \nabla n_e$ возникает из-за НН и учитывает нелокальность n_e к n_i . Здесь l_E – характерный размер изменения поля или концентрации электронов, μ_{i0} – подвижность ионов $l_E = E / 4\pi e n_e$ [5, 8]. Уравнение (3) имеет структуру уравнения диффузии (четвертый член), а второй член содержит смешанную производную по времени и координате. Из второго члена можно вычленил амбиполярный дрейф плазмы, обусловленный НН и нестационарностью l_E . Скорость этого амбиполярного дрейфа $V_E = \partial l_E / \partial t$ направлена от анода к катоду, и на стадии ионизационного размножения $V_E \sim I_i l_E / n_e = v_i l_E$, где v_i – частота ионизации (прямым электронным ударом или происходящая ступенчатым образом). Если $l_E \approx 1$ см, а $v_i \approx 10^4$ с⁻¹ (как в условиях экспериментов [15, 16]), то V_E достигает 100 м/с. Расчеты этой скорости, как и объяснения расслоения Пекарика, нет ни в одной работе по стратам [19, 20, 25–31].

Амбиполярная диффузия, обусловленная НН, в [5] была названа диффузией Пуассона. Эффективный коэффициент диффузии Пуассона в одномерном приближении согласно [5, 8] равен:

$$D_p = \mu_{i0} E_0 l_E. \quad (4)$$

Если классическая, амбиполярная диффузия Шоттки мала, то диффузионные стационарные профили в пространстве обусловлены НН плазмы [1–8, 32]. При решении уравнений переноса часто необоснованно исследователи сравнивают процессы амбиполярного переноса с процессами гибели и рождения частиц. Тем самым при решении сложных задач забывается о фундаментальных различиях задачи Дирихле и задачи Коши. Такие парадоксы называются **асимптотическими парадоксами**. Они возникают при ошибках в моделировании распределенных (в пространстве) нестационарных заряженных систем. И в этих ошибках кроется суть асимптотических парадоксов, наблюдаемых при моделировании нелокальных процессов в плазме со слабым нарушением её нейтральности.

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ +КДС И ИХ СВОЙСТВА ВО ВНЕШНЕМ ПОЛЕ

К линейным диссипативным, регулярным системам отнесем системы с трансляционной симметрией, у которых радиальные размеры $r \ll L$ – продольных размеров (рис. 1). К регулярным

КДС относятся молнии, электрические дуги, длинные разряды и электрические шнуры +КДС) смерчи, водовороты, длинные обобщенные трещины (КДС) с системой ЭМИП и т.д. Прорастают линейные +КДС (рис. 1) как обобщенным притягателем (фокусирующим в себя потоки электронов – гинной подструктурой), так и отталкивателем (КС электронов – андроподструктурой) вперед [3, 4]. В анодонаправленных шнурах электроны выбрасываются в неактивизированную среду, а в катодонаправленных шнурах фокусируются в область более активизированной среды – внутрь плазмоида в гинную часть +КДС (рис. 1). В этом состоит основное отличие анодо- и катодонаправленных молний, электрических дуг и джетов из чёрных дыр (рис. 5 в [2]).

Показательный пример кумуляции при переносе энергии цилиндрическими +КДС с КС электронов – молниями. Из-за проводимости воздуха к земной поверхности *на площади около 100 км²* (10^8 м^2) в секунду от облака поступает ток $\sim 1 \text{ А}$. В то же время ток молнии диаметром $3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ в течение долей секунды достигает 500 кА. Эффективность переноса энергии молнией в 10^{15} раз выше. При этом из-за кумуляции *радиальные поля* достигают пробойных значений $\sim 2\text{--}3 \text{ МВ/м}$, а концентрации электронов возрастают от 10^2 до 10^{13} см^{-3} и более. Молния явное (глазами видимое) динамическое кумулятивное явление. В 1937 г. Симпсон и Скарзе измерили градиенты потенциала у поверхности Земли. Они не превышали 300 В/см. Это в 100 раз меньше пробойных значений. Исключения дали измерения, произведённые немедленно после молнии. Этот парадокс давно наблюдается в неоднородных структурах в плазме (*парадокс Симпсона и Скарзе, 1937*). Фокусировка ЭМИП и напряженности поля в +КДС происходит по всей их поверхности (рис. 1), как и в случае трещины в твердом теле, при формировании водостока в жидкости или смерча в воздухе. Энергия элементов в КС во всех перечисленных КДС достигает разницы потенциалов, питающей кумулятивное формообразование (рис. 1).

Контуры плазменной структуры визуализируются в лабораторных условиях, как принято среди экспериментаторов, при установлении на их границе средней энергии электронов на уровне 1 эВ и их концентрации на уровне $10^9 \div 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Если структуры наблюдаются на значительных расстояниях, то эти параметры могут отличаться в сторону увеличения. Пробойные поля в воздухе хорошо известны. Это – $2\text{--}3 \text{ МВ/(м}\cdot\text{атм.)}$ в зависимости от влажности воздуха. Казалось бы, это утверждение противоречит экспериментам (*парадоксу*) *Лауренса и*

Дённингтона, описанным в [6]. В этих экспериментах промежуток $L = 1 \text{ см}$ нагружался $U_0 = 30 \text{ кВ}$, пробивался дугой диаметром 0,02 см ($r \approx 10^{-2} \text{ см}$) и далее поддерживался при напряжениях нескольких киловольт [6] (пусть будет $U_1 = 2 \text{ кВ}$). При этом экспериментаторы на протяжении горения дуги все время наблюдали расширение линий Zn. Расширение соответствовало полям порядка 10^5 В/см , если относить расширение линий Zn на счет расширения линий под действием интенсивных электрических полей благодаря эффекту Штарка. Это *второй парадокс Штарка в дугах* (первый парадокс связан с обратным движением КП в поперечном магнитном поле). Исследователи зациклились на продольных полях, которые существенно не превышали $U_1/L \sim 1 \text{ кВ/см}$, и развернули теорию о практически полной (30%) ионизации газа в этой узкой дуге [6]. Это были не единственные прекрасно выполненные исследования градиентов потенциала в дугах посредством эффекта Штарка. В 1924 г. *Нагаока и Сигуира* указали на изменяющиеся электрические градиенты потенциала поля вдоль шнура дуги, которые после интегрирования по длине разрядного промежутка привели к напряжениям на электродах, на целые порядки величины превышающим действительно наложенные напряжения (*второй парадокс Штарка в дугах*) [6]. Учет установления радиальных (поперечных) электрических полей, осуществляющих радиальную кумуляцию электронов, которые нагреваются в радиальных полях и осуществляют ионизацию частиц газа в развитой цилиндрической плазменной +КДС (рис. 1), позволяет все поставить на свои места и получить значения электрических синергетических квазистационарных макрополей, кумулирующих к центру дуги (аттрактору для электронов) на уровне $E_r \approx U_1/r = 2 \text{ [кВ]}/0,01[\text{см}] = 2 \cdot 10^5 \text{ В/см}$. Следовательно, эти значения *радиальных* полей и были измерены в экспериментах Лауренса, Дённингтона, Нагаока, Сигуира и др. по эффекту Штарка. Решение *парадоксов Штарка, Симпсона, Лауренса, Дённингтона, Нагаока и Сигуира* в электрических шнурах, дугах и молниях возможно на базе кумулятивной модели автора, в основе которой лежит учёт слабого НН в плазменных +КДС. Эта модель верифицирована сравнением с экспериментами, проведенными в [4]. *Трактовка экспериментов в [6] была ошибочной из-за непонимания исследователями кумулятивного характера переноса тока электронов из-за слабого НН в дугах и не учета формирования русел в +КДС для струй высокоэнергетичных электронов (рис. 1)*. Аналогичное игнорирование в литературе кумулятивных 3D процессов, обусловленных НН, и определяющей ро-

ли радиальных электрических полей в формировании и жизнедеятельности +КДС в плазме сохраняется практически во всех моделях дуг и молний [25–30].

Рассчитаем концентрацию нескомпенсированных ионов, заряд которых возбуждает в области дуги радиусом $r = 0,01$ см напряженность радиального синергетического электрического поля величиной $2 \cdot 10^7$ В/м. Согласно теореме Гаусса для цилиндрической +КДС $n_+ = 2\epsilon_0 E_r / (er) \approx 2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ или $n_+ \approx 2,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Степень ионизации газа, согласно расчетам, порядка 10^{-6} (а не 30%, как предполагалось в [6]). (Структура дуги и электрического шнура (рис. 1) является аналогичной водостоку.) Природа из-за формирования +КДС в миллион раз меньше перетруждается.

Формирование пучков высокоэнергетических электронов в цилиндрических КДС при наличии внешнего электрического поля происходит даже из-за слабого НН в плазмоиде. НН модифицирует архитектуру внешнего силового поля в разрядном промежутке. Модифицированные электрические поля в свою очередь формируют и структурируют в пространстве и времени +КДС – электронные ускорители (рис. 1, рис. 1–4 в [1] и рис. 5 в [2]). Процесс взаимодействия плазмы и модифицируемого самосогласованного электрического поля нелинейный и трёхмерный. В цилиндрических +КДС этот процесс сопровождается усилением или кумуляцией объемного заряда, генерацией динамического поверхностного натяжения, увеличением частоты ионизации газа прямым электронным ударом, взрывным ростом силового радиального электрического поля, проникающего и кумулирующего в плазменные +КДС, и многими другими явлениями, сопровождаемыми возбуждением новых степеней свободы в +КДС. Из-за эффективности кулоновских электрон-электронных столкновений +КДС одновременно играют роль фокусирующих (кумулятирующих) плазменных линз, направляющих и ускоряющих электроны в КС в сторону, обратную напряжению электрического поля. КС высокоэнергетических электронов со скоростью значительно большей, чем средняя скорость электронов, покидает плазменную +КДС (линзу) (рис. 1). Плазменные +КДС или самоорганизующиеся линейные ускорители (рис. 1) в среде выжигаются процессами ионизации и далее формируются при участии процессов энергообмена и переноса заряженных частиц плазмы в электрическом поле. В формировании электронных ускорителей различной геометрии из-за НН и заключается глубокая *функциональность* +КДС для переноса и ускорения электрических зарядов до энергий перепада электрического потенциала $E_e \sim eU$ (рис. 1). Экспериментальные наблюдения, подробно описан-

ные в [6], позволяют сделать вывод, что в плазменных +КДС действительно формируются два типа электронов: 1) слабоэнергетичные электроны, фокусирующиеся в +КДС, и 2) высокоэнергетичные электроны, формирующиеся в пучок и упорядоченно покидающие +КДС по самоорганизующемуся кумулятивному руслу (рис. 1) или через точки либрации Высикайло-Эйлера (рис. 6,а,б и рис. 1 в [1]). При этом скорость обострения электрического поля или скорость изменения заряда плазменных структур определяется не средней скоростью электронов (слабоэнергетичными электронами), а скоростью высокоэнергетичных электронов в КС. Не учет этого фактора, влияющего на обострение электрического поля, обуславливает *очередной парадокс* в численных расчетах, моделирующих процессы переноса в +КДС. Разметка пространства +КДС может происходить в виде пульсаций или страт в продольном направлении с формированием КС из высокоэнергетичных электронов или в виде сплошных однородных в продольном направлении шнуров с кумуляцией электронов в радиальном направлении к КС электронов (рис. 4 и 5).

Асимметричное функционирование цилиндрических андрогинных плазменных +КДС проявляется в особенностях их продвижения и развития. Как установлено в 1938 г. с помощью камеры Бойса в экспериментах Шоленда и его сотрудников, электроны, ускоренные в молнии, высыпаются на 5–10 м, что соответствует их энергии ~ 2 МэВ. Формирование высокоэнергетичных пучков электронов в направлении против поля – это один из первых парадоксов при формировании цилиндрических +КДС в плазме (*парадокс Шоленда, 1938*). **Как в абсолютно нейтральной плазме без кумуляции заряда и энергии могут возникать пучки электронов с энергией ~ 2 МэВ?** Приведём описание из [6]: «...более странным, чем обратный удар, был характер ведущего удара. В то время как средняя скорость его продвижения была $2 \cdot 10^7$ см/с, ведущий удар или лидер молнии в действительности продвигался отдельными ступенями, распространяясь со скоростью около $2 \cdot 10^9$ см/с на протяжении 5–10 м. После каждого такого продвижения ведущий лидер затем останавливался и позднее опять продвигался с той же скоростью. Перерыв между двумя последовательными ступенями продвижения лидера длился приблизительно 50 микросекунд. Продолжительность ступеней отличается той особенностью, что для каждого удара молнии она оказывается удивительно равномерной, причём все наблюдавшиеся ступени лидеров обладали длительностью между 30 и 80 микросекундами». Ни Шоленд, ни Леб не отметили, что такие пульсации могут указывать на

согласование времени формирования продольных и поперечных размеров самоорганизующейся новой части «электронной пушки» (новой части молнии) (рис. 1). Пучок электронов, который может пробить воздух атмосферы толщиной 5–10 м, должен иметь энергию порядка 2–3 МэВ. Это соответствует скорости электронов, близкой к скорости света c , а не $2 \cdot 10^9$ см/с, как установлено по излучению, зафиксированному на плёнку. В экспериментах Шоленда, видимо, занижена скорость электронов в КС в 10 раз.

Соотношения между прирастающими в единицу времени продольными L (по x) и радиальными размерами r и соответствующими скоростями формирования профилей параметров при росте линейной диссипативной, регулярной системы, например молнии или электрического шнура (рис. 1), подчиняются при цилиндрической симметрии закону r/L кумуляции [см. (1)] при $n = 2$ [4]:

$$V_{aL} = L/(r/V_{ar} + L/V_{ax}^*), \quad (5)$$

где V_{ar} – средняя радиальная амбиполярная дрейфовая скорость, формирующая радиальный профиль продвигающегося цилиндрического плазменного столба; V_{ax}^* – средняя продольная скорость в сформированной КС электронов или скорость света при ультрафиолетовой предионизации газа; V_{aL} – средняя скорость продвижения линейной, регулярной +КДС. Из (6) в зависимости от выбранного +КДС способа продвижения со скоростью V_{aL} , гинной подструктурой или кумулятивной струей (андроподструктурой) вперед (рис. 1) и от соотношения между r/V_{ar} и L/V_{ax}^* следует несколько возможных типов r/L кумуляции [4]. При импульсно-периодическом продвижении +КДС в сторону анода происходит выброс КС энергетичных электронов в неактивизированную среду. После этого происходит амбиполярное формирование очередного элемента +КДС (молнии и др.) с участием процессов вторичной ионизации и прилипания электронов (рис. 1) [4]. При непрерывном катодонаправленном движении (рис. 1) фокусировка электронов в области +КДС происходит в уже сформированную +КДС и поэтому двигается +КДС непрерывно, то есть без пульсаций и остановок. Структура, рассеивающая в не активизированную среду электроны в виде КС, более энергозатратна. Поэтому цилиндрические +КДС, фокусирующие электроны в себя и распространяющиеся с анода, реализуются чаще в разряде без прокачки газа. Они менее энергозатратны [4, 33], так как фокусируют в себя ЭМИП электронов. Энергия +КДС этим экономится. Ионы двигаются медленнее, быстро термализуются и распыляют

энергию +КДС. Результаты экспериментов в [4] подтверждают установленную в [4, 33] различающуюся закономерность формирования прианодных и прикатодных +КДС.

В [4, 18] получен закон r/L кумуляции: $V_{aL} = V_{ar}L/r$ для регулярных цилиндрических +КДС в плазме. В [4] рассмотрена s/S или парашютная кумуляция (парашют с отверстием аналогично кумулирует поток воздуха) параметров, определяющих динамический порядок для сферически-симметричных плазмоидов (см. следующий раздел). Сформулировать эти законы можно в общем виде. Это позволяет применять законы кумуляции для описания и других аналогичных кумулятивных явлений и по размерам оценивать скорость продвижения и полный обобщенный поток в кумулятивную регулярную систему (в молнию, электрическую дугу, в электрический шнур, в трещину в металлоконструкциях, в смерчах, водоворотах и т.д.) Для качественного описания кумулятивных систем возможно применение общего подхода и без строгой детализации процессов организации ЭМИП [4].

Нормальная плотность тока на цилиндрическую КДС обусловлена особенностью кумуляции тока на обобщенную границу КДС с любым типом симметрии. На границе любой КДС параметры достигают критических значений, и поэтому неравновесный фазовый переход, например, визуализируется, осязается и т.д., то есть на обобщенной границе КДС и возникает скачок (например, ударная волна электрического поля). О себе КДС заявляет внешнему миру свечением всей её поверхности и через кумулятивную струю или их систему (рис. 5 [2]), тем самым являясь в диалектическом плане открытозамкнутой системой с отверстиями в кумулирующих (массовые и энергетические потоки) обобщенных границах (рис. 1). Не представляет большого труда рассчитать нормальную плотность тока на поверхность любого плазмоида или шнура как анодонаправленного, так и катодонаправленного, если полагать, что весь ток проводится и собирается этой структурой, а затем сбрасывается из структуры в узкой кумулятивной струе [3, 4]. Нормальная плотность на всю цилиндрическую структуру $j_N = I/S$, где I – полный ток, собираемый +КДС; S – эффективная площадь визуализировавшейся +КДС (рис. 1, 3–6). Величина нормальной плотности тока на цилиндрические шнуры $\sim 10^{-1}$ А/см² [4] при плотности воздуха $N \sim 6 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Если эту плотность тока применить для расчётов молнии длиной в 500 м и диаметром в 10 см, то получим ток в 375 кА, что согласуется с данными в [6].

СФЕРИЧЕСКИЕ И ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ КУМУЛЯТОРЫ С КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУЕЙ

В кумулятивно-диссипативной динамике появилось понятие нормальной плотности тока (или потока) на +КДС [3, 4, 18]. В газоразрядной плазме этот закон открыт как феноменологический закон – нормальной плотности тока на визуализированное катодное или анодное пятно. Если практически весь ток электронов с поверхности катодного пятна (КП) действительно вначале конвективно коллапсирует в +КДС, а затем выбрасывается иначе структурированно уже в виде узкого пучка высокоэнергетичных электронов из КП в объем, то эти токи в стационарном или квазистационарном режиме должны совпадать, а значит, можно оценить (снизу, без учета автоэлектронной эмиссии и т.д.) и полный ток из КП (+КДС), в этом случае: $I \approx 2\pi e R^2 n_e^* V_e^*$. Кумулятивно-диссипативная модель объясняет формирование нормальной плотности тока на КП:

$$j^* = en_e^* V_e(E/N^*), \quad (6)$$

где звездочка обозначает критические значения параметров.

Обратное движение катодного пятна в поперечном магнитном поле естественно объясняет кумулятивно-диссипативная модель (рис. 4). Действительно, у катода существует область с положительным объемным зарядом, фокусирующая слабоэнергетичные электроны. Эти электроны, ускоряясь в области взрывного роста приведенного электрического поля, формируют кумулятивную струю (пучок высокоэнергетичных электронов), ответственную за фарадеево темное пространство. Эта модель объясняет правильное отклонение кумулятивной струи электронов в фарадеевом пространстве и отклонение в “правильную” сторону положительного столба плазмы, так как в этих областях все электроны движутся в “правильном” направлении, то есть к аноду (рис. 4).

Оценим скорость движения в поперечном магнитном поле КП, формируемого фокусирующимися в него слабоэнергетичными электронами [3, 4, 18]:

$$V_a \approx \mu_i ([V_e^* \times H]/c), \quad (7)$$

где V_a – скорость амбиполярного дрейфа КП, обусловленная поперечным магнитным полем; H – напряженность магнитного поля; μ_i – подвижность основного иона; c – скорость света. Согласно (7) скорость перемещения КП определяется подвижностью иона. Меняя величину магнитного поля, можно исследовать плазмохимические ионные реакции перезарядки и т.д.,

протекающие в КП. Процессы формирования КП определяются процессами НН плазмы. Характерная скорость такого нелинейного нестационарного процесса формообразования $\sim l_E v_i n_e$ (здесь v_i – частота рождения плазмы).

Из (6) мы получили не только оценку снизу нормальной плотности тока на катодное или анодное пятно, но и условие, при котором эта плотность тока практически постоянна на всей указанной поверхности +КДС (S), за исключением площади S_1 сопла с высокоэнергетичными электронами ($S_1/S \ll 1$). При этом следует не забывать о возможности внутреннего, дальнейшего самообострения профиля поля в глубь уже самого электрода.

СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ТОКА ПРИ СЛИЯНИИ КАТОДНЫХ ПЯТЕН

Число работ по исследованию взаимодействия +КДС друг с другом и формированию точек кумуляции между ними невелико. В 1930 г. вышла работа Гюнтершульце [35, 36, см. [6]], и имеются наблюдения по взаимодействию электрических шнуров [4]. Вот понимание процессов в дугах, согласно Интернету, по теме «*Вакуумные выключатели*»: «В последние годы отмечается интенсивное использование вакуумных коммутаторов в области напряжений 6–35 кВ для создания вакуумных контакторов, выключателей нагрузки, вакуумных выключателей для иных устройств. Это объясняется рядом достоинств: высокое быстродействие, полная взрыво- и пожаробезопасность, экологическая чистота, надежность и др. В вакууме электрическая дуга существует либо в рассеянном, «диффузном» виде при токах до 5–7 кА, либо в концентрированном, «сжатом» виде при больших значениях тока. Граничный ток перехода дуги из одного состояния в другое зависит в значительной степени от материала, геометрической формы и размеров контактов, а также от скорости изменения тока. «Диффузная» дуга в вакууме существует в виде нескольких параллельных дуг одновременно, через каждую из которых может протекать ток от нескольких десятков до нескольких сотен ампер. **Катодные пятна, отталкиваясь друг от друга**, стремятся охватить всю контактную поверхность. При небольших токах и значительной площади контактов силы электромагнитного взаимодействия этих проводников с током (токи одного направления притягиваются) не могут преодолеть силы отталкивания катодных пятен друг от друга. Так как через каждое катодное пятно протекают небольшие токи, это приводит к небольшим размерам опорных пятен дуги на катоде. По мере увеличения тока силы электромагнитного притяжения преодолевают силы отталкивания, и проис-

ходит слияние отдельных дуг в один канал, что приводит к резкому увеличению размеров катодного опорного пятна. Вследствие этого появляются значительные трудности гашения дуги либо происходит полный отказ камеры. Поэтому задачи, стоящие при разработке выключателей, заключаются в создании условий, при которых дуга существовала бы в диффузном виде либо время воздействия «сжатой» дуги на электроды было бы минимальным. Это достигается созданием радиальных магнитных полей, обеспечивающих быстрое перемещение опорных точек дуги по электродам».

Пока аналогичные явления, например разрушение лопастей кораблей при кавитации (схлопывании пузырьков газа в жидкости), уже 150 лет считаются кумулятивными, а визуально наблюдаемая аналогичная структура поедания катода сфокусированной струей положительных ионов в КП, несмотря на работы [3, 4, 18] (рис. 4 и 7), все еще не относятся в обзорах и оригинальных статьях к таковым. Исследователями газоразрядной плазмы наблюдаются визуальное развитие и разрушение плазменных +КДС как таковых, и иногда применяется обратное движение КП в поперечном магнитном поле, открытое Штарком. При этом о заряженности плазменных +КДС исследователи предпочитают не говорить прямо, а о динамическом поверхностном натяжении в плазменных +КДС не говорится вообще. КП дуги, как полагает автор, являются положительно заряженными, и поэтому они отталкиваются. Их взаимодействие друг с другом в эксперименте, наверное, впервые исследовал Гюнтершульце (Günterchulze A., 1930) в тридцатых годах прошлого века при исследовании разряда с полым катодом (см. [6]). Он обнаружил эффект увеличения плотности тока до 10^3 раз с вынужденным уменьшением расстояния между двумя КП (см. подробнее [6, стр. 581] и [34, стр. 246–247]). В его экспериментах доказано, что резкое увеличение плотности тока с катодов начинается тогда, когда два отдельных КП заставляют сливаться друг с другом [6]. Это явление – усиление тока – при вынужденном слиянии двух КП удаётся объяснить, согласно авторской модели (полученной модификацией моделей Резерфорда и Гамова), ростом синергетического периферийного радиального поля E_r при совмещении двух заряженных структур. Согласно теореме Гаусса, синергетическое электрическое поле на периферии положительно заряженной структуры при слиянии двух положительно заряженных КП увеличивается пропорционально общему характерному размеру и плотности заряда:

$$E_r = e r n_+ / 2\epsilon_0. \quad (8)$$

При любом приближении двух отрицательных свечений разряда друг к другу эффективный параметр E/N на периферии общей структуры может возрасти в два и более раз, если полное число нескомпенсированных ионов останется прежним или радиус общей структуры возрастёт в два раза. При увеличении параметра E/N в два или более раз частота ионизации газа прямым электронным ударом или частота возбуждения электронных уровней нейтральных частиц в области КП может возрасти в сотни и тысячи раз [25, 27, 29]. Наблюдения Гюнтершульце полностью соответствуют теоретическим выводам автора. Совмещение КП существенно увеличивает интенсивность их уже общего свечения. Это может приводить к увеличению роли УФ ионизации в области сливающихся КП. Исследования, проведенные в этой работе и в [1–4, 13], позволяют утверждать, что разметка пространства, резкое увеличение частоты ионизации, рост тока разряда и формирование эффективных заряженных КДС (с различной топологией) в первую очередь определяются генерацией огромного радиального (периферийного) синергетического электрического поля – $E_r \sim r\rho$, возникающего в динамике переноса тока из-за асимметрии масс электронов и ионов [1–4, 13].

БИКУМУЛЯТИВНАЯ СИНЕРГЕТИКА В ПЛАЗМЕННЫХ +КДС

Без формирования КП (как установлено автором – плазменных +КДС) ток в разряде ничтожен [6, 9, 25, 27, 29, 34]. По мере развития КП полный ток увеличивается в огромное число раз, а при слиянии КП, согласно наблюдениям Гюнтершульце, или применению полых катодов полный ток можно увеличить ещё в тысячу раз [6, 34]. Уже в этих фактах проявляется синергизм (совместное действие) +КДС. Формирование и функционирование +КДС приводят к ряду удивительных явлений для исследователей, игнорирующих как слабое НН в +КДС в газоразрядной плазме, так и дальнедействующий характер кулоновских потенциалов со структурированным в 3D пространстве давлением электронного газа. В наблюдениях подтверждается бикумуляция ионных потоков на КС электронов (рис. 4 и 7Б). Как видно на рис. 7А, каверна получена на зеркально-полированном катоде в результате работы кумулятивной струи ионов по схеме (рис. 4 и 7Б), сфокусированной на струе электронов. Чёрной стрелкой на рис. 7А указана капля, вырванная из катода. Фокусировка ионов в КП [3] может взрывать (в отличие от «эктонов» Месяца, формирующихся только на остриях) даже зеркально-полированные катоды. Фокусировка напряженности поля и электронов в областях аттрактора

обеспечивает локально неоднородный (со взрывным характером) нагрев газа и объяснение сложного «обратного» перемещения КП или +КДС у катода в поперечном магнитном поле [3], открытое экспериментально в 1903 г. Штарком.

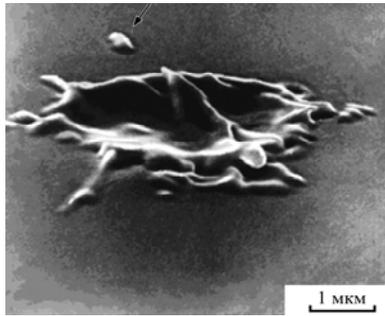


Рис. 7А. Кратер на молибденовом катоде, сформированный в течение 10 нс в результате функционирования катодного пятна [Juttner В. IEEE Trans. Plasma Sci. 15 474 (1987)].

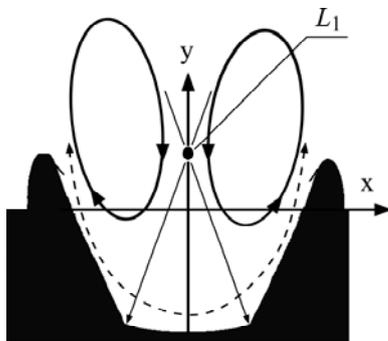


Рис. 7Б. Схема потоков положительных ионов в плазменной КДС – катодном пятне. Штриховая кривая – траектория материала катода, увлекаемого ионной кумулятивной струей. L_1 – точка либрации – кумуляции потоков ионов и электронов в области катодного пятна.

При малых вкладах в разрядный промежуток за сформированным положительно заряженным КП и положительно заряженным положительным столбом плазмы наблюдается переходная область между двумя положительно заряженными структурами (рис. 6а). Называется эта область Фарадеево тёмное пространство. В Фарадеевом тёмном пространстве в точке кумуляции Висикайло-Эйлера происходит кумуляция электронов в КС, переносящую поток электронов в область положительного столба, где процессы ионизации уравниваются процессами гибели плазмы. За положительным столбом плазмы располагается прианодная область, где происходит генерация положительных ионов. Все области в газовом разряде играют свою важную роль в совместном (синергетическом) формировании 3D структурированного переноса и диссипации электрической энергии. Так как слоистые структуры – страты – являются наиболее эффективными в плане кумуляции свободных электронов в плазменную +КДС, то вначале при малых энергокладах в разряде формируются плоскостные

страты. Они формируются и в областях, удалённых от областей основного энергоклада, из-за недостаточности в них энергии (рис. 4 в [1]). Структуризация в 3D пространстве слабого НН, обусловленной нескомпенсированностью заряда ионов, позволяет проявиться совместному действию электрического поля этих ионов в управлении поведением электронов, осуществляющих перенос тока в разрядном промежутке или между заряженными структурами в природе.

При синергетической самоорганизации разряда ток между +КДС (стратами, плазмоидами и др.) для электронов осуществляется в виде сфокусированных пучков высокоэнергетичных электронов (см., например, чёткую молнию рис. 1 [1] или джет рис. 5 [1]). Локальная свобода электронов и несвобода в более глобальных масштабах приводят к *диффузионным и конвективным* процессам самоорганизации +КДС. В результате этого происходит выполнение принципа наименьшего действия в газоразрядных структурах. Кумуляция (самофокусировка) плазменных структур периферийными высокоэнергетичными электронами, возвращающимися в плазменную +КДС, обеспечивает и выполнение принципа Ле Шателье-Брауна в плазменных +КДС [3], сметая (кумулируя) электрическое поле в +КДС.

КУМУЛЯТИВНО-РЕАКТИВНЫЕ «ДВИГАТЕЛИ» В ПЛАЗМЕ

В [35, 36] обсуждалась возможность самосборки реактивных «микродвигателей» на заряженных пылевых частицах в плазме. Доказано, что у их поверхности во внешнем поле развиваются и усиливаются процессы асимметричной ионизации и кумуляции электрического поля, электронных и ионных потоков. В области кумуляции возникает асимметрия в нагреве поверхности частицы и в передаче ей импульса положительными ионами, в результате чего пылевая частица двигается в плазме с высокой скоростью в направлении от асимметричного нагрева и ионного дрега (рис. 8а).

Явление формирования *кумулятивно-реактивных кулоновских насосов* в сложной плазме может оказаться перспективным для увеличения адгезии напыляемых частиц, управления их потоками, селекции частиц плазмы и увеличения скорости напыления порошками и иными заряженными микро- и наночастицами. Формирование «ракетных двигателей» с бикумулятивной, асимметричной подачей «топлива» (потоков электронов и ионов) к пылевым частицам из внешней нелинейной плазменной среды представляет новую, еще не исследованную область физики нелинейных ионизационно-кумулятивно-реактивных систем или *-КДС* в экстремальных

состояниях. В области асимметричной кумуляции при достижении параметра $\gamma = E/N$ пробойных значений ионный ток может расти за счет ионизации во много раз. Коэффициенты ионизационно-кумулятивного усиления асимметричного термофореза и ионного дрега, согласно [35, 36], могут достигать величины 10^6 .

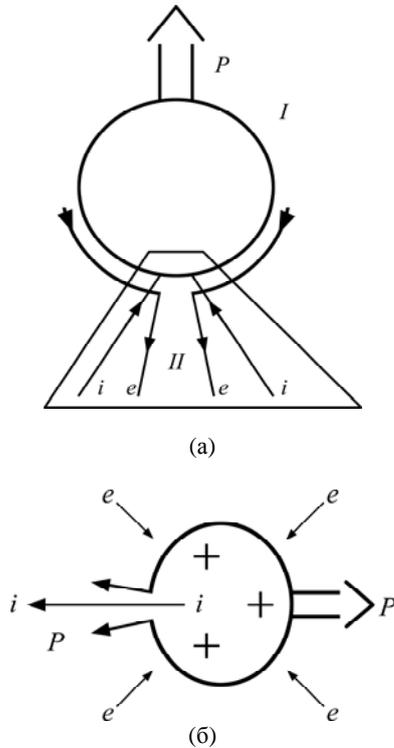


Рис. 8. Схема кумуляции энергомассоимпульсных потоков электронов (e) и ионов (i) на пылевую частицу (а); P – результирующая сила, действующая на отрицательно заряженную макрочастицу с самоформирующимся «реактивным микродвигателем» [35, 36]. Схема кумуляции энергомассоимпульсных потоков электронов (e) на жидкую или «квазизидкую» +КДС и формирования кумулятивной струи ионов (i) при частичном разрушении обжимающей плазмод электронной оболочки (б); P – результирующая сила, действующая на положительно заряженную жидкую или квазизидкую частицу с самоформирующимся поверхностным натяжением и реактивным двигателем, обусловленным разрушением части обжимающей плазмод электронной оболочки.

Формирование реактивной тяги у плазменных +КДС, обжатых периферийными электронами по схеме, восходящей к моделям Резерфорда и Гамова (рис. 5 в [1]), может возникать по ряду причин. Например, у плазменной +КДС из-за выбрасывания из неё части положительно заряженных ионов, что может происходить при локальном разрушении электронной оболочки, обжимающей (рис. 8б) положительные ионы. Это происходит, как в случае ракетного двигателя, применяемого для вывода спутника или человека в околоземный космос. Такой тип тяги может реализовываться в положительно заряженных квантовых звёздах и даже чёрных дырах, на это, воз-

можно, указывает визуализировавшаяся линейная кумулятивно-диссипативная структура с размером 1,5 кпк в области галактики $M\ 87$ (рис. 5 в [2]). В качестве ещё одного типа реактивного двигателя, обусловленного слабым НН ($\alpha \approx 10^{-18}$) квантовых звёзд, можно привести пример, когда отрицательно заряженные асимметричные пылевые облака поглощаются положительно заряженной квантовой звездой. В этом случае двигатель работает по схеме, представленной на рис. 8а. В отдельной статье модифицированная модель 8а будет применена автором для описания процесса формирования молнии (детонационной волны, снимающей поляризацию плазмы), наблюдавшейся и разрушившей метеороид под Челябинском.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках авторской модели заряженных плазменных кумулятивно-диссипативных структур (рис. 8 и в [1] рис. 5) удаётся описать многие ранее непонятные структурные 3D явления в газоразрядной плазме, обусловленные нарушением нейтральности. Модель плазмодов сформулирована автором на базе модели атома, предложенной Резерфордом, и модели атомного ядра Гамова и учитывает слабое нарушение нейтральности. Решённые качественно и количественно парадоксы можно отнести к асимптотическим парадоксам, в которых проявляется существенная роль членов с малыми коэффициентами у старшей производной (учёт уравнения Пуассона). Конвективные +КДС в плазме классифицированы по типу симметрии и показаны схематически на рис. 5 и в реальной красоте фотографически представлены в [1] на рис. 1–4. Дуализм процессов кумуляции и диссипации теоретики часто игнорируют. Одни видят только диссипацию (разбегание, Большой Взрыв, диффузионная синергетика Тьюринга-Пригожина-Колмогорова), другие – только кумуляцию и не замечают диссипацию (Безант, Рэлей, Лаврентьев, Покровский, Нигматулин и др.). Впервые обратил внимание на причины разрушения неограниченной кумуляции или генерацию центробежных «зеркал», по видимому, Е.И. Забабахин [11], хотя кумулятивно-диссипативные структуры впервые исследовал на устойчивость Лагранж, предсказавший троянцев в Солнечной системе в 1772 г., которые были открыты в 1906 г. Автором неоднократно доказывалось, что в природе существуют не только диффузионные диссипативные структуры Тьюринга [37, 38], но и конвективные +КДС Высикайло с ограниченной кумуляцией энергомассоимпульсных потоков электронов в кумулятивные струи [1–4, 13, 18]. В данной работе на базе

комплексного подхода к исследованию и классификации свойств заряженных КДС в газоразрядной плазме доказано, что процессы кумуляции и диссипации существенно определяют синергетическое усиление и активное поведение всей заряженной (или поляризованной) КДС с зарядом.

ЛИТЕРАТУРА

- Vysikaylo Ph.I. Detailed Elaboration and General Model of the Electron Treatment of Surfaces of Charged Plasmoids (from Atomic Nuclei to White Dwarves, Neutron Stars, and Galactic Cores): Self-Condensation (Self-Constriction) and Classification of Charged Plasma Structures – Plasmoids. Part 1. General Analysis of the Convective Cumulative–Dissipative Processes Caused by the Violation of Neutrality: Metastable Charged Plasmoids and Plasma Lenses. *Surf. Eng. Applied Electrochem.* 2012, **48**(1), 11–21.
- Vysikaylo Ph.I. Detailed Elaboration and General Model of the Electron Treatment of Surfaces of Charged Plasmoids (from Atomic Nuclei to White Dwarves, Neutron Stars, and Galactic Cores): Self-Condensation (Self-Constriction) and Classification of Charged Plasma Structures – Plasmoids. Part II. Analysis, Classification, and Analytic Description of Plasma Structures Observed in Experiments and Nature. The Shock Waves of Electric Fields in Stars. *Surf. Eng. Applied Electrochem.* 2012, **48**(2), 212–229.
- Vysikaylo Ph.I. Electric Field Cumulation in Dissipative Structures of Gas-discharge Plasmas. *J. of Experimental and Theoretical Physics.* 2004, **98**(5), 936–944.
- Высикайло Ф.И., Ершов А.П., Кузьмин М.И., Тивков А.С., Чекалин Б.В. Особенности переноса тока в разряде в поперечном сверхзвуковом потоке газа при формировании цилиндрических, кумулятивных структур (плазмодов). *Электронный журнал. Физико-химическая кинетика в газовой динамике.* 2007, **5**. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2007-06-21-002.pdf>.
- Высикайло Ф.И. Скачки параметров неоднородной столкновительной плазмы с током, обусловленные нарушением нейтральности. *Физика плазмы.* 1985, **11**(10), 1256–1261.
- Леб Л. *Основные процессы электрических разрядов в газах.* М.: Госиздат, 1950. 672 с.
- Высикайло Ф.И. О процессах сноса в плазме газового разряда. *Физика плазмы.* 1990, **16**(10), 1268–1270.
- Высикайло Ф.И., Кузьмин М.И., Чекалин Б.В. Решение уравнений Громека-Ламба по теории возмущений. *Математическое моделирование.* 2006, **18**(12), 52–66.
- Кесаев И.Г. *Катодные процессы электрической дуги.* М.: Наука, 1968. 244 с.
- Власов А.А. *Теория многих частиц.* М.; Л.: Технико-теорет. лит., 1950. 348 с.
- Забабахин Е.И., Забабахин И.Е. *Явления неограниченной кумуляции.* М.: Наука, 1988. 171 с.
- Маргулис М.А. Сонолюминесценция. *Успехи физических наук.* 2000, **170**(3), 263.
- Vysikaylo Ph.I. The Analytic Calculation of Ionization-drift Waves (3D-Strata) of Nanosecond Discharges: The Determination of the Cathode Drop in Nanosecond Discharges According to the Number of Visualized Plasma Structures. *Surf. Eng. Applied Electrochem.* 2011, **47**(2), 139–144.
- Бабичев В.Н., Высикайло Ф.И., Письменный В.Д. и др. Экспериментальное исследование амбиполярного дрейфа плазмы, возмущённой пучком быстрых электронов. *Докл. АН СССР. Физика.* 1987, **297**(4), 833–836.
- Бабичев В.Н., Высикайло Ф.И., Голубев С.А., Трухин С.С. и др. Исследование дрейфовых скачков газоразрядной плазмы. *Физика плазмы.* 1987, **13**(12), 1524–1529.
- Бондаренко А.В., Высикайло Ф.И., Кохан В.И. Продольный разряд в турбулентном потоке азота. *Теплофизика высоких температур.* 1983, **21**(2), 388–389.
- Велихов Е.П., Голубев В.С. и др. Тлеющий разряд в потоке газа. *УФН.* 1982, **137**(1), 117–150.
- Высикайло Ф.И. Кумулятивно–реактивные диссипативные структуры как парадигма синергетики. *Тр. семинара. “Синергетика”.* М.: Изд-во МГУ, 2001, **4**, 106–130.
- Пекарек Л. Ионизационные волны (страты) в разрядной плазме. *УФН.* 1968, **94**(3), 463–500.
- Ланда П.С. *Нелинейные колебания и волны.* М.: Наука. Физматлит, 1997. 496 с.
- Gunn J.V. Microwave Oscillations of Current in III-V Semiconductors. *Sol.-St. Comm.* 1963, **1**(4), 8–9.
- Gunn J. V. Instabilities of Current in III-V Semiconductors. *IBM Journ. Res. Dev.* 1964, **8**(2), 141–159.
- Высикайло Ф.И., Цендин Л.Д. Резко неоднородные профили концентрации плазмы в разряде при повышенных давлениях. *Физика плазмы.* 1986, **12**(10), 1206–1210.
- Клярфельд Б.Н. Образование страт в газовом разряде. *ЖЭТФ.* 1952, **22**(1), 66–77.
- Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. *Физика тлеющего разряда.* СПб.: Лань, 2010. 512 с.
- Недоспасов А.В. Страты. *УФН.* 1968, **94**(3), 439–462.
- Райзер Ю.П. *Физика газового разряда.* М.: Наука, 1988. 592 с.
- Ланда П.С., Мискинова Н.А., Пономарев Ю.В. Ионизационные волны в низкотемпературной плазме. *УФН.* 1980, **132**(4), 601–637.
- Ховатсон А.М. *Введение в теорию газового разряда.* Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1980. 182 с.
- Ланда П.С. *Автоколебания в распределенных системах.* М.: Наука, 1983. 320 с.

31. Голубовский Ю.Б., Цендин Л.Д. и др. *Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме: учебн. пособие*. СПб.: Изд-во С.-Пб. университета, 2004. 248 с.
32. Сорока А.М., Шапиро Г.И. Возникновение вынужденной амбиполярной диффузии под действием высокочастотного электрического поля. *Письма ЖТФ*. 1979, **5**(3), 129–132.
33. Высыкайло Ф.И. О модели продольного разряда в сверхзвуковом потоке электроположительного газа. *Теплофизика высоких температур*. 1986, **24**(4), 657–661.
34. Энгель А. Ионизованные газы. Под ред. М.С. Иоффе. М.: Гос. издат. физ-мат. литературы, 1959. 332 с.
35. Vysikaylo Ph.I., et al. Cumulative Processes on a Dust Particle in Plasma. *Surf. Eng. Applied Electrochem.* 2008, **44**(5), 377–382.
36. Высыкайло Ф.И., Митин С.В. и др. Асимметричные кумулятивные процессы на пылевой частице в плазме. *Нанотехника*. 2008, (4), 28–33.
37. Turing A.M. The Chemical Basis of the Morphogenesis. *Proc. Roy. Soc. B*. 1952, **273**, 37–71.
38. Пригожин И., Стенгерс И. *Время, хаос, квант. К решению парадокса времени*. М.: Едиториал УРСС, 2003. 240 с.

Поступила 03.04.12

После доработки 22.05.12

Summary

The 3D architecture of cumulation and dissipation of energy-mass-momentum flows into the positively charge plasma (cumulative- dissipative structures (+CDS)) are analyzed, with the account of the external influence of a long-range electric field on the structures under study. The interaction of external electric fields with a quasi-stationary positively charged plasmoids (plasma CDS) is considered, in which cumulative jets are formed of highly energetic electrons and jets of ions occur as a result of accumulation of electrons. Also, clusterization of certain plasmoids into the respective regular systems – dissipative “crystals” as well as synergy effects due to the integration of the + CDS.

Keywords: cumulation, positively charged plasmoid, cumulative jets, synergy, libration-cumulation point, strata, reverse movement of the cathode spot.