

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 537.5:772.93

Применение теории плазмы для исследования физических процессов в электрографии и электростатической печати

В. Е. Литвинов

Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, Москва, Россия

Предложены теория и численные методы решения системы уравнений Максвелла и уравнения Навье-Стокса для областей и граничных условий, соответствующих процессам электрографии, позволяющие оптимизировать режимы работы и конструктивные параметры ксерографической аппаратуры и электростатических печатающих устройств.

Плазменные технологии находят все большее распространение в различных областях техники и промышленности, что ставит новые проблемы перед прикладной физикой плазмы, открывая неожиданные для плазменной науки явления. Так, исследования процессов электронно-ионной технологии привели к открытию и формированию новой области физики плазмы — пылевой плазмы (гетерогенной системы, состоящей из электронов, ионов, нейтральных атомов и молекул, а также из микрочастиц и субмикронных размеров, обладающих электрическим зарядом порядка $10^3 \div 10^4$ заряда электрона). Подобная плазма возникает в электрофотографических процессах, на которых основана работа электрографических устройств, устройств оперативной полиграфии, множительной техники, выводных устройств ЭВМ и др. Воздействие электрических полей на потоки заряженных частиц пылевой плазмы позволяет существенно интенсифицировать технологические процессы электрографии и открывает возможности тонкого регулирования движением потоков заряженных частиц, обеспечивая необходимое качество. Сложность расчетов указанных процессов заключается в том, что они соответствуют нелинейным дифференциальным уравнениям высокого порядка, для которых не разработаны устойчивые схемы численного решения.

Данная задача является самосогласованной, так как при высоких концентрациях заряженных частиц, используемых в указанных процессах, происходит существенное искажение внешнего первоначального поля за счет действия пространственного заряда частиц и поляризации среды, в которой протекают электрографические процессы. Происходит экранирование внешнего поля подвижными заряженными частицами среды. Возникает необходимость учета внутреннего трения (вязкости) и других диссипативных эффектов, используя описание движения рабочего вещества с помощью гидродинамических моделей к самосогласованному электрическому полю. Иными словами, для нахождения динамических характеристик процессов электрографии необходимо разработать численные методы устойчивого решения самосогласованной задачи, в которой движение электрических зарядов

определяется электрическими и гидродинамическими силами, а эти силы, в свою очередь, зависят от пространственного распределения электрических зарядов. Данную самосогласованную задачу нужно решать при правильной формулировке граничных условий, которые определяют не только электрическое поле с объемным зарядом, но и поведение проводящей среды в межэлектродном пространстве.

Именно такая самосогласованная задача рассматривается в данной работе в соответствии с требованиями электрофотографирования и энергетических затрат.

Основные положения теории расчета характеристик процессов электрографии

Характеристики электрического поля с объемным зарядом для данных процессов можно определить, решая систему уравнений Максвелла и уравнение Навье-Стокса.

$$\operatorname{div} \vec{j} = -\frac{d\rho}{dt}; \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon}; \quad (2)$$

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \Phi; \quad (3)$$

$$\vec{j} = \rho k \vec{E} + \rho \vec{V} - D \operatorname{grad} \Phi; \quad (4)$$

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\gamma} \operatorname{grad} p + \nu \vec{V}, \quad (5)$$

где E — напряженность электрического поля;

ρ — плотность объемного заряда;

j — плотность поля;

Φ — потенциал электрического поля;

V — скорость движения среды;

γ — плотность среды;

k — подвижность ионов;

D — коэффициент диффузии;

ϵ — диэлектрическая проницаемость среды;

ν — коэффициент выпуклости;

p — давление;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Уравнение (1) отражает условие неразрывности тока; уравнение (2) представляет собой теорему Остроградского-Гауса; уравнение (3) — устанавливает зависимость между напряженностью и потенциалом электрического поля; (4) дает связь плотности тока с плотностью объемного заряда и напряженностью поля; (5) — это уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости.

Сложность данной системы дифференциальных уравнений исключает возможность ее аналитического решения, поэтому в настоящей работе предлагается методика, использующая последовательное применение численных методов решения дифференциальных уравнений.

Единственно возможный способ получения устойчивого численного расчета состоит в последовательной реализации решения неразрывности тока (1) относительно плотности объемного заряда по заданным распределениям потенциала электрического поля и скоростей среды, а затем по полученному распределению плотности объемного заряда, решая (2), (3), определялось распределение электрического поля и т. д. [1–3].

В зависимости от граничных условий и конфигурации межэлектродного пространства использовалась совокупность различных численных методов. Так, для межэлектродных промежутков, которые можно отобразить на канонические области “кольцо” или “прямоугольник”, использовались метод разностной факторизации для определения плотности объемного заряда и метод Писмена-Рекфорда для определения потенциала. В ряде случаев применялся метод декомпозиции или нечетно—четного исключения с факторизацией. Для полей сложной конфигурации использовались метод трубок тока (больших частиц) и метод конечных элементов [3]. Оказалось, что сходимость решения значительно улучшается, если счет вести, фиксируя нормальную производную потенциала электрического поля (напряженность) у поверхности одного из электродов, и проверять на каждой итерации соответствие потенциала приложенному напряжению в отличие от обратного процесса, а именно, фиксации потенциала и сравнения полученной напряженности со значениями заданной напряженности и электрода.

Во многих электрографических устройствах для получения электрического поля с объемным зарядом используется коронный разряд. При расчетах характеристик коронного разряда необходимо использовать в качестве одного из граничных условий напряженность электрического поля у коронирующего электрода, определяемую по формуле Пика [4].

$$E_0 = 30,3 \cdot 10^5 \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{r_0}} \right). \quad (6)$$

Для ускорения процесса счета в результате анализа решений были получены рекомендации по заданию граничных условий в виде распределения плотности объемного заряда на поверхности коронирующих электродов пропорционально третьей степени превышения напряженности электростатического поля у коронирующего электрода над начальной напряженностью, определяемой формулой Пика.

При расчетах характеристик технологических процессов в устройствах электрографии, помимо электрических параметров, сильное влияние на эти процессы оказывают гидро- и аэродинамические свойства среды. Влияние движения воздушных потоков и жидкости в межэлектродных пространствах на технологические процессы учитывалось путем определения распределений скоростей из решения уравнения Навье-Стокса. Для большей части расчетов решение осуществлялось методом разложения в ряд Фурье.

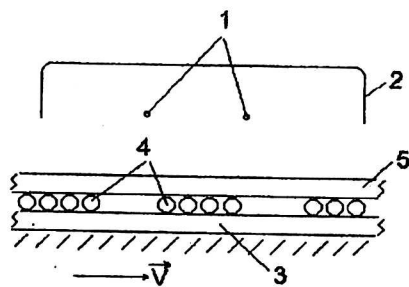
Следует отметить, что данная методика численного определения характеристик электрического поля не только позволила исследовать технологические процессы электрографии, но и явилась эталоном при сравнении результатов, полученных приближенными методами.

Исследование электрографических процессов, включающих коронный разряд

Используя предложенную методику численных решений, оказалось возможным исследовать такие наиболее важные этапы получения электрографического изображения как зарядка фотослоя, перенос порошкового изображения с фотослоя на бумагу и нейтрализация электрических зарядов слоя. Эти процессы осуществляются в зарядных устройствах (рис. 1), представляющих собой систему, состоящую, чаще всего, из двух или более проволок, находящихся под высоким напряжением для получения коронного разряда и расположенных на расстоянии нескольких миллиметров от поверхности фотослоя. Над проволоками располагается заземленный электрод (экран), служащий для стабилизации коронного разряда. Указанные процессы происходят при движении фотослоя через область коронного разряда, образуемую в зарядном устройстве [5, 6].

Рис. 1. Зарядное устройство электрофотографического аппарата:

- 1 — коронирующие электроды (проволоки);
 2 — экран; 3 — фотослой на заземленной подложке;
 4 — порошок свой частиц красителя (тонера);
 5 — бумага



Существуют особенности использования предложенных числовых методов при расчетах характеристик процессов электрофотографии, обусловленные наличием криволинейных границ и многосвязностью областей расчета, а также присутствием в коронирующих зарядных устройствах диэлектрических и фотополупроводниковых включений, влияющих на условия коронирования. Дополнительные трудности при реализации численного метода возникали из-за необходимости учета движения фотослоя и бумаги через область коронного разряда (см. рис. 1). Однако наряду с этими факторами, усложняющими расчеты, есть обстоятельство, позволяющее ослабить требования к выбору величины шага по времени между итерациями и, следовательно, уменьшить общее время счета — это квазистационарность процесса (возникновение устойчивого технологического режима). Расчеты осуществлялись по предложенной в настоящей работе методике последовательного определения потенциала электрического поля, а затем методом трубок тока (больших частиц) находилось распределение плотности объемного заряда и методом конечных элементов определялись распределения потенциала и напряженности электрического поля и т. д. [7]. При каждой итерации находился рельеф заряда, осевшего на фотослой и бумагу, и его изменение и смещение в непостоянном электрическом поле. При этом использовалась линейная и квадратичная аппроксимация плотности поверхностного заряда. В процессе расчетов учитывалось изменение свойств фотослоев в электрическом поле на базе известных из литературы экспериментальных зависимостей проводимости

сти фотослоев и темповых токов. Выяснены резервные возможности двух- и трехпроводных коронирующих зарядных устройств при очувствлении фотослоев. На рис. 2 представлено накопление поверхностного заряда на фотослое аморфного селена при его прохождении через коронирующее зарядное устройство с различными скоростями (слой смещается вправо). Видно, что при скоростях 0,1; 0,2 и 0,4 м/с на выходе из зарядного устройства плотность поверхностного заряда оказалась одинаковой. Исследовано влияние поверхностного и объемного сопротивления бумажных слоев, помещенных в область коронного заряда на процессы переноса изображения. Определена оптимальность этих процессов при различных режимах работы электрофотографических аппаратов. Было обнаружено, что поверхностное сопротивление бумаги оказывает влияние на напряженность электрического поля в промежутке между бумагой и фотопроводником по-разному в различных диапазонах изменения сопротивления. Так, при изменении удельного поверхностного сопротивления с 10^6 до 10^7 Ом напряженность увеличивается в восемь раз, в то время как при изменении удельного поверхностного сопротивления от 10^7 до 10^{12} Ом — напряженность практически не изменяется (рис. 3).

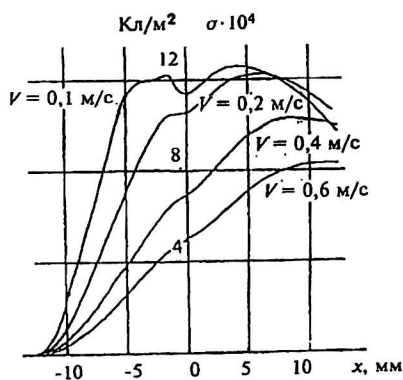
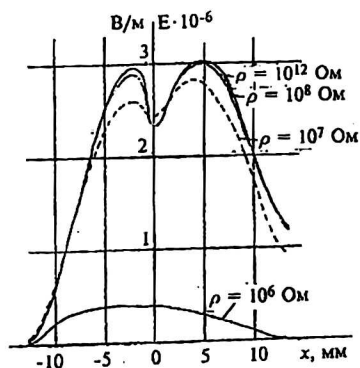


Рис. 2. Распределение плотности поверхностного заряда на фотослое при различных скоростях движения через зарядное устройство:
 $U = 8$ кВ; $d = 5$ мм; $h = 10$ мм; $R_0 = 0,05$ мм

Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля в зазоре бумага — фотослой при скорости движения 0,2 м/с



Предложен способ улучшения качества переноса изображения с фотослоя на бумагу при ее высокой влажности, заключающийся в просушивании бумаги не на всю глубину, что требует длительного времени и значительного слоя. Тем самым повышается сопротивление лишь небольшой поверхностной части слоя, но этого достаточно для существенного увеличения напряженности поля переноса и улучшения качества перенесенного порошкового изображения.

Исследование процессов проявления электростатической печати и микрофильмирования

Объектом исследования явилась физическая модель процессов визуализации электростатического изображения за счет осаждения на него заряженных частиц из движущегося потока жидкого проявителя. Обычно при расчетах процессов проявления ввиду сложности подлежащей решению системы дифференциальных уравнений допускались упрощения, в частности, отсутствие объемных зарядов в проявителе и равномерность концентраций частиц и ионов по объему проявителя в течение всего времени осаждения. Эти предложения значительно упрощали расчет, однако приводили к существенным искажениям [6]. С помощью предложенной методики были проведены численные расчеты процесса осаждения тонера на скрытое зарядное изображение без упомянутых упрощений. При этом проявитель представлен обычно используемой физической моделью, согласно которой он содержит заряженные мицеллярные частицы пигмента и положительные и отрицательные ионы.

Сопоставление данных расчетов с экспериментальными результатами показало расхождение в части скорости осаждения тонера. Такое расхождение могло быть связано как с погрешностями эксперимента (неточность данных о скрытом изображении, режима проявления и т. д.), так и из-за неправильности представлений о проявителе и ошибочности данных о нем. Поэтому для оценки достаточности представлений о проявителе при описании процесса электрофоретического проявления были проведены исследования прохождения электрического тока через плоскую электрофоретическую ячейку и сопоставлены временные зависимости тока во внешней цепи ячейки, полученные экспериментально и расчетным путем. Оказалось, что для реализации численного исследования процессов проявления необходимо учитывать минимум четыре фракции носителя заряда, т. е. фракцию частиц красителя, фракцию дополнительных ионов, обладающих зарядом того же знака, что и частицы красителя, и две фракции медленных и быстрых ионов, заряженных противоположно заряду частиц красителя. Кроме того, необходимо учитывать генерацию дополнительных ионов из областей проявителя с повышенной напряженностью ионов. Для выяснения возможного диапазона концентрации частиц красителя была использована методика определения их размеров путем фотографирования различных участков проявителя с увеличением в 1500 раз. При этом пришлось преодолеть трудности, связанные с тем, что объекты съемки (частицы тонера) имели размеры 10^{-7} м, т. е. меньше длины видимой части спектра. Для экспериментального определения подвижности частиц тонера применялись фото- и киносъемки траекторий их движения в электрическом поле, а также проводился анализ просветления различных участков проявителя при осаждении пигмента в электрофоретической ячейке во время ее просвечивания.

В результате была разработана методика определения электрофоретических параметров проявителей и получены конкретные значения параметров для жидких проявителей четырех цветов (тонер 113 — черный, тонер 130 — желтый, тонер 128 — красный, тонер голубой — на основе фталоцианинового пигмента). В таблице приведены электрофоретические параметры для указанных проявителей.

Показатели	Цвет проявителя			
	черный	голубой	красный	желтый
Средний размер частиц, мкм	0,21	0,20	0,50	0,31
Подвижность частиц, м ² /В·с	0,5·10 ⁻⁹	0,5·10 ⁻⁹	0,5·10 ⁻⁹	0,5·10 ⁻⁹
Подвижность дополнительных ионов, м ² /В·с	1·10 ⁻⁹	2·10 ⁻⁹	2·10 ⁻⁹	2·10 ⁻⁹
Подвижность быстрых ионов, м ² /В·с	2·10 ⁻⁹	2·10 ⁻⁹	2·10 ⁻⁹	2·10 ⁻⁹
Подвижность медленных ионов, м ² /В·с	0,5·10 ⁻⁹	0,5·10 ⁻⁹	0,5·10 ⁻⁹	0,5·10 ⁻⁹
Концентрация частиц, м ⁻³	0,5·10 ¹⁷	0,5·10 ¹⁷	1,1·10 ¹⁶	1,4·10 ¹⁶
Концентрация дополнительных ионов, м ⁻³	4·10 ¹⁸	4·10 ¹⁸	0,9·10 ¹⁸	1,1·10 ¹⁸
Концентрация быстрых ионов, м ⁻³	4·10 ¹²	4·10 ¹⁸	0,9·10 ¹⁸	1,1·10 ¹⁸
Концентрация медленных ионов, м ⁻³	4·10 ¹⁸	4·10 ¹⁸	0,9·10 ¹⁸	1,1·10 ¹⁸
Интенсивность генерации осадительного электрода У	60	100	100	400
Интенсивность генерации контрэлектрода У, %	60	100	100	400
Напряженность начала генерации у осадительного электрода, кВ/см	4,5	4,5	3,4	3,6
Напряженность начала генерации у контрэлектрода, кВ/см	4,5	4,5	3,4	3,6

На основании полученных представлений об электрофоретических свойствах жидких проявителей и разработанной физической модели процесса проявления были проведены расчеты класса технологических задач электростатической печати и микрофильмирования и исследована оптимальность работы этих устройств.

На рис. 4 представлено сечение проявляющего канала, вдоль которого происходит движение жидкости проявителя (перпендикулярно плоскости чертежа), в верхней его части в горизонтальном направлении смещается бумага, соприкасающаяся с жидким проявителем. Осаждение частиц красителя на зарядное изображение на бумаге осуществляется в пространстве *A* между бумагой и изображающим электродом. В реальных электростатических печатающих устройствах осуществляется прокачка проявителя для восполнения частиц красителя в проявляющем канале. Поэтому важным этапом расчетного исследования было использование уравнения Навье-Стокса, решение которого осуществлено методом разложения в ряд Фурье. Были рассчитаны профили скоростей при различных соотношениях ширины к высоте канала в диапазоне от 1 до 50. Найдено, что при соотношениях больше 10 для основной части канала распределение скоростей соответствует квадратичному закону.

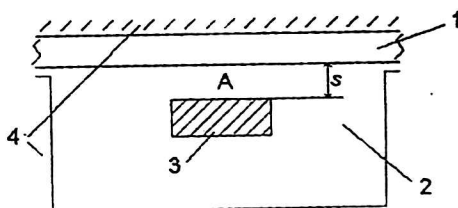


Рис. 4. Место контакта бумажной ленты с жидким проявителем:

- 1 — бумажная лента; 2 — жидкий проявитель;
3 — проявляющий электрод (контрэлектрод);
4 — металлические части конструкции

В результате расчетов получены распределения напряженности электрического поля и концентрации частиц красителя в проявляющем канале в различные моменты времени (рис. 5—7). Области с избыточным положительным и отрицательным зарядами создают дополнительное электрическое поле, ослабляющее начальное электрическое поле в средней части промежутка и усиливающее напряженность электрического поля на краях промежутка. По мере расширения областей с избыточным объемным зарядом электрическое поле в середине промежутка ослабевает.

Рис. 5. Изменение распределения напряженности электрического поля в пространстве проявителя с течением времени при $v_{cp} = 11$ мм/с; $s = 0,6$ мм.
 Время проявления: 1 — 0 с; 2 — 0,2 с; 3 — 0,4 с; 4 — 1 с; 5 — 2 с

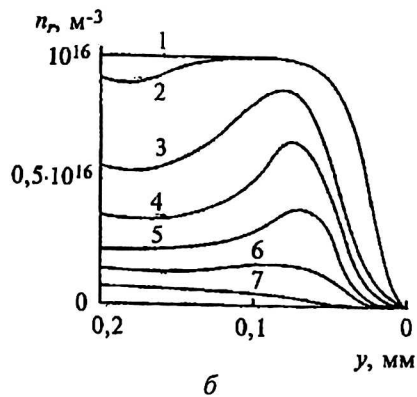
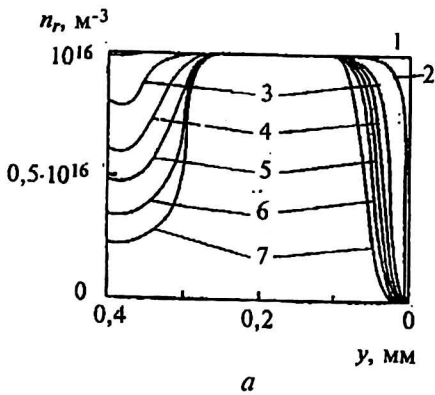
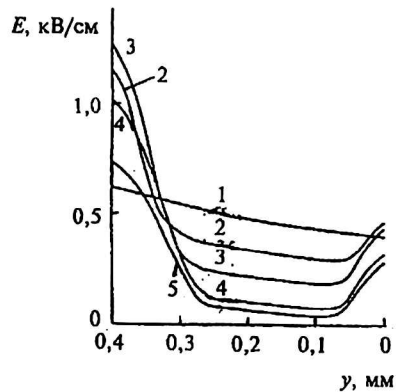


Рис. 6. Изменение объемной концентрации частиц тонера при $v_{cp} = 4$ мм/с; $s = 0,2$ мм:
 а — время проявления: 1 — 0 с; 2 — 0,01 с; 3 — 0,2 с; 4 — 0,4 с; 5 — 0,6 с; 6 — 1 с; 7 — 2 с;
 б — время проявления: 1 — 0 с; 2 — 0,1 с; 3 — 0,4 с; 4 — 0,8 с; 5 — 0,6 с; 6 — 1 с; 7 — 2 с

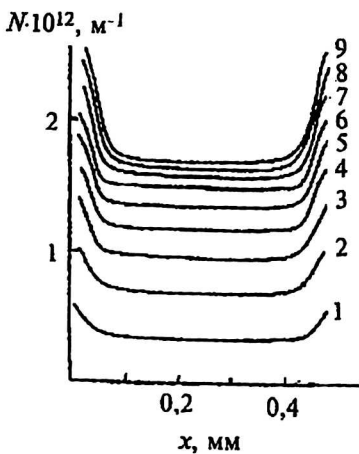


Рис. 7. Распределение поверхностной концентрации осевших частиц тонера на зарядном изображении при $v_{cp} = 0$ мм/с; $s = 0,4$ мм.
 Время проявления: 1 — 0 с; 2 — 0,4 с; 3 — 0,6 с; 4 — 0,8 с; 5 — 1 с; 6 — 1,2 с; 7 — 1,4 с; 8 — 1,6 с; 9 — 1,8 с

На основании расчетных данных можно сделать вывод о том, что процесс осаждения частиц тонера на зарядное изображение приводит к ослаблению электрического поля за счет нейтрализации отрицательных зарядов пятна осевшими положительными зарядами частиц тонера. Вследствие этого интенсивность осаждения частиц тонера вначале максимальна, а затем уменьшается и постепенно осаждение прекращается, т. е. поверхностная концентрация осевших частиц тонера выходит на насыщение (см. рис. 7). Такое прекращение процесса осаждения частиц тонера при малых и больших расстояниях между бумагой и контрэлектродом происходит по разным причинам: при малых расстояниях — из-за того, что в промежутке мало частиц и оседают больше нечему, хотя результирующая напряженность электрического поля у поверхности изображения еще не уменьшилась до нуля; при больших расстояниях между бумагой и контрэлектродом, т. е. в толстом слое проявителя, частиц тонера достаточно для того, чтобы при осаждении уменьшить результирующее поле у поверхности зарядного изображения на бумаге до нуля, и процесс осаждения прекращается именно после этого.

Смещение частиц тонера и ионов в пространстве проявителя под действием электрического поля регулирует величину напряженности электрического поля у поверхности зарядного пятна. При начальной концентрации частиц тонера в пространстве проявителя, близкой к насыщению, осаждение частиц тонера слабо зависит от расстояния между бумагой и контрэлектродом. Более сильная интенсивность осаждения частиц тонера при малых толщинах слоя проявителя наблюдается только в течение 0,1 с после начала осаждения, а затем становится примерно одинаковой при любых расстояниях между бумагой и контрэлектродом, пока не произойдет обеднение проявителя. В данном случае своеобразную роль проявляющего электрода начинает играть слой проявителя с малой напряженностью электрического поля в средней части проявляющего канала. Расчеты показывают, что распределение напряженности электрического поля вначале уменьшается в средней части промежутка между бумагой и контрэлектродом и возрастает у поверхности бумаги и у контрэлектрода, затем происходит общее снижение напряженности во всем промежутке (см. рис. 6, а). Необходимо отметить, что при малых расстояниях между бумагой и контрэлектродом изменение напряженности происходит более интенсивно, чем при больших размерах проявляющего промежутка. Так, при расстояниях между бумагой и контрэлектродом 0,1 мм напряженность электрического поля у зарядного изображения достигает максимума через 0,05 с после начала проявления; при 0,2 мм — через 0,18 с, при 0,4 мм — через 0,40 с. Из распределений концентрации частиц тонера следует, что интенсивное осаждение частиц тонера происходит из слоя толщиной 0,06—0,1 мм, где из-за высокой напряженности поля уменьшение концентрации частиц идет быстрее, чем в соседних слоях (см. рис. 6, а). Из расчетов следует, что ионы ведут себя аналогично частицам тонера и только благодаря другому знаку заряда движутся в сторону, противоположную движению частиц (см. рис. 6, б).

Таким образом, сближение проявляющего электрода с поверхностью бумаги приводит к увеличению интенсивности осаждения только за очень малые промежутки времени, пока не произойдет перераспределение концентраций частиц тонера и ионов в пространстве проявителя. Однако и это увеличение непропорционально росту начальной напряженности электрического поля. Так, при изменении толщины канала в 6 раз начальная напряженность изменяется тоже в 6 раз, однако начальная интенсивность осаждения из-за обеднения слоя увеличивается не более чем в 1,5—2 раза, а через

0,2—0,3 с поверхностные концентрации частиц при разных толщинах слоя оказываются близкими.

Из сказанного следует, что в качестве рекомендации для ускорения процесса осаждения частиц тонера на зарядное изображение можно использовать контрэлектрод, периодически приближающийся к поверхности электростатического изображения с периодом $< 0,1$ с. Эксперименты, проведенные с использованием вибрирующего электрода, показали улучшение процесса проявления.

Следует отметить, что численное исследование процесса проявления в данном случае является единственно возможным, так как из-за малых размеров проявляющего канала невозможно использовать фоновые измерения.

Л и т е р а т у р а

1. Самарский А. А. Введение в теорию разностных систем. — М.: Наука, 1971. С. 526.
2. Литвинов В. Е., Мирзабекян Г. З. //Электричество. 1972. № 5. С. 40.
3. Артамонов А. Ф., Верецагин И. В., Головин Г. Т., Литвинов В. Е. //Там же. 1982. № 9. С. 16.
4. Верецагин И. П., Левитов В. И., Мирзабекян Г. З., Пашин М. М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. — М.: Энергия, 1974. С. 467.
5. Литвинов В. Е., Старосельский М. В. //Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. 1991. № 2. Т. 35 С. 138.
6. Вильчинская А. Ю., Литвинов В. Е. //Там же. 1989. № 6. Т. 34. С. 438.
7. Горбачев В. В., Литвинов В. Е., Хмельник М. И. //Известия вузов. Сер. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2000. № 3—4. С. 32.

Use of the plasma theory for physical phenomena investigations in the electrographia and electrostatic print

V. E. Litvinov

The Timiryazev's Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russia

The theory and numerical methods for Maxwell's equation system and Navier-Stokes equation decision are suggested. The decision of electrography processes making have been got under chosen conditions. The decision allow to optimizes work modes and constructions of XEROX apparatuses and electrostatic printing equipment.