

**Модель процесса  
диспергирования жидкости из  
металлического капилляра в  
высокопотенциальном  
электрическом поле.**

*Вердиев М.Г.*

Проблема разработки модели процесса диспергирования жидкости в высокопотенциальном электрическом поле возникла в ходе исследований по диссертационной работе при разработке физической теории кривой кипения Широ Нукияма при описании модели роста зародыша пара на поверхности теплоподвода. В диссертационной работе при разработке модели процессов тепломассопереноса для всего интервала тепловых нагрузок было установлено, что под растущим на поверхности теплоподвода зародышем пара образуется метастабильная нано - микроплёнка и, что максимум плотности теплового потока при кипении жидкости обусловлен её выпариванием. Впервые экспериментальную зависимость интенсивности процесса теплопереноса через контакт поверхность теплоподвода - жидкость для всего интервала температурных напоров (0 - 200) К было получено Широ Нукияма.

Для экспериментального подтверждения этой модели роста зародыша пара необходимо было разработать способ получения устойчивых нано–микроплёнок жидкостей толщиной  $10^{-9}$ – $10^{-6}$  м на поверхности теплоподвода и произвести экспериментальную оценку плотности теплового потока при их выпаривании. Это обусловлено тем, что в разработанной модели процесса теплопереноса максимум плотности теплового потока при кипении жидкости приписывается механизму выпаривания метастабильной нано – микроплёнки жидкости образующейся под растущим на поверхности теплоподвода паровым зародышем.

Как оказалось экспериментальное получение равномерных и стабильных во времени нано – микроплёнок жидкостей незначительных толщин на поверхности является проблематичным. Все известные экспериментальные данные по определению интенсивности процесса теплоотвода от поверхности теплоподвода относятся к выпариванию плёнок жидкостей получаемых методом стекающей жидкости по наклонной поверхности из трубчатой фильеры с продольной щелью, установленной вдоль её верхней кромки. Средняя толщина, так называемых, стекающих по наклонной поверхности плёнок жидкостей получаемых экспериментальным путём составляет  $(2-3) \cdot 10^{-3}$  м, т. е. величину превышающую толщину плёнки под зародышем пара более чем на три порядка.

Другие известные способы получения плёнок методами: испарительно–конденсационных технологий, струйных технологий, способами механического напыления с использованием струйных технологий пульверизации жидкости в виде аэрозоля, методами нанесения плёнок с использованием способа работы транспортных стеклоочистителей и др. не дают желаемого эффекта, так как плёнки разрываются, и контролировать их параметры по всей поверхности практически не представляется возможным. Тогда возникла, как показали дальнейшие исследования, не удачная идея положительно заряжать частицы паровой фазы жидкости при их движении через капилляр в высокопотенциальном электрическом поле с целью их обязательного осаждения на поверхность теплоподвода с противоположным зарядом.

Этот способ оказался малоэффективным толи из-за того, что основная часть частиц пара не приобретала электрического заряда или величина приобретаемого ими заряда была ничтожно мала. Затем было решено попробовать диспергировать жидкость в интенсивном электрическом поле с тем, чтобы заряженные частицы жидкости осели на заземлённую через микроамперметр поверхность – второй электрод, как это показано на рисунке 1.

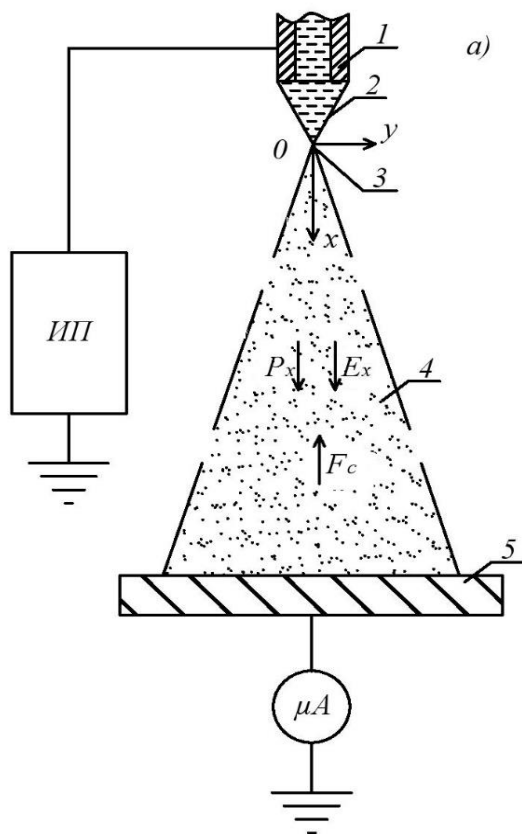


Рисунок 1. Схематическое изображение узла диспергирования жидкости в высокопотенциальном электрическом поле. 1 - капилляр, 2 - «усечённый» конус жидкости - конус Тейлора со сферической вершиной, 3 - вершина конуса дисперсного потока, 4 - дисперсный поток. На схематическом рисунке конус Тейлора идеальный из-за ничтожно малого радиуса кривизны его вершины - «порядка радиуса отрывающейся частицы жидкости» ( $10^{-9}$ ) м и совпадает с вершиной дисперсного потока.

Если приложить высокий потенциал к капилляру внутри, которого находится жидкость, то при определённом его значении жидкость диспергируется с высокой степенью дисперсности. Это направление исследований оказалось очень эффективным и представляет самостоятельный научный и производственный интерес в области нанотехнологий, и имеет применение в: энергетике, холодильной технике, строительстве, в технологиях нефтепереработки, дорожном строительстве, медицине, фармакологии, химической промышленности, солнечной энергетике, микроэлектронике, порошковой металлургии, технологиях струйных принтеров, машиностроении, в двигателях внутреннего сгорания для получения горючей смеси и многих других областях промышленности. Однако широкое промышленное внедрение результатов этой области исследований задерживается из-за отсутствия достаточно точных аналитических методов их расчёта и управления процессами при диспергировании различных жидкостей, расплавов, растворов, коллоидных составов с широким спектром их физических свойств и их интервалами изменения.

## Описание процесса диспергирования жидкости

Процесс диспергирования жидкости в интенсивных электрических полях является сложной функцией: структуры электрического поля в зоне формирования дисперсного потока – на конце капилляра, физических параметров диспергируемой жидкости, скорости её истечения из капилляра, температуры окружающей среды и её физических свойств. Для упрощения физической модели процесса диспергирования в работе практически сведено к нулю влияние скорости истечения жидкости из капилляра путём установления режима отсутствия её расхода через капилляр при его потенциале равном нулю или при нулевом её уровне в ёмкости для жидкости относительно конца капилляра.

Если к такому капилляру прикладываем монотонно возрастающий потенциал с задаваемой скоростью его роста и наблюдаем за процессами, протекающими в пространстве от конца капилляра до второго электрода, то до режима возникновения устойчивого конуса Тейлора на конце капилляра режимы истечения жидкости последовательно пребывают в следующих состояниях. При напряжённости электрического поля порядка  $12 \cdot 10^4$  В/м из капилляра вытягивается жидкость в форме сферической капли и при незначительном его увеличении капля отрывается .

При дальнейшем незначительном повышении потенциала капилляра (50 – 100 В) частота отрыва капель растёт и при напряжённости поля порядка  $18 \cdot 10^4$  В/м поток капель переходит в режим тонкой непрерывной струи жидкости, которая далее распадается на мелькие частицы вблизи второго электрода.

Частицы дисперсного потока при этом имеют большой разброс размеров, достигающий интервала значений порядка до  $10^{-3}$  м.

При последующем монотонном росте потенциала капилляра точка распада струи приближается к его концу и когда она доходит до точки соответствующей точке максимума значения вектора напряжённости электрического поля жидкость принимает форму конуса Тейлора. Конус Тейлора при этом имеет максимальную высоту с острой вершиной и еле заметным при боковом освещении дисперсным потоком частиц с его вершины, как это показано на фотографии, приведённой на рисунке 2.

Этому режиму соответствует стационарный устойчивый дисперсный поток с минимальным разбросом размеров частиц. Высота конуса по порядку величины соответствует радиусу капилляра.



Рисунок 2. Фотография конуса Тейлора на конце капилляра со стационарным дисперсным потоком чернил струйного принтера при 500 кратном увеличении. Наружный диаметр капилляра составляет 0,38 мм.

Стационарный процесс диспергирования жидкости в электрическом поле с минимальным интервалом разброса размеров частиц возникает только на вершине конуса Тейлора с максимально возможной его высотой при заданном радиусе капилляра. Причём разброс размеров частиц растёт с уменьшением высоты конуса, что то же самое с ростом потенциала диспергирования капилляра. Наибольший практический интерес представляет стабильные режимы диспергирования и истечения жидкости из капилляра в высокопотенциальном электрическом поле. Режим истечения жидкости из капилляра в виде тонкой струи широко используется в легкой промышленности для получения различных органических и неорганических волокон.

Дальнейшие исследования показали, что на сегодняшний день практически отсутствуют более универсальные технологии получения веществ нано – микроструктурных состояний сферических и цилиндрических форм. Для перевода исходного вещества в дисперсное состояние вещество или их смесь необходимо перевести в жидкое состояние путём их расплавления, или растворения в различных растворителях, или в состояние различных коллоидов и суспензий необходимого состава (как чернила струйных принтеров) и далее их диспергировать в высокопотенциальном электрическом поле. Результаты экспериментальных исследований показали, что наноструктурные потоки жидкостей с наибольшей степенью монодисперсности, как это показано на рисунках 3 и 4 получаются в режиме их диспергирования при отсутствии расхода через капилляр в нулевом электрическом поле или в режиме диспергирования из ёмкости с верхним уровнем жидкости, соответствующим уровню конца капилляра.



В этом режиме так же достигается условие непрерывного и стабильного диспергирования жидкости, и процесс хорошо поддаётся моделированию с соответствующими экспериментальными подтверждениями расчётных данных.

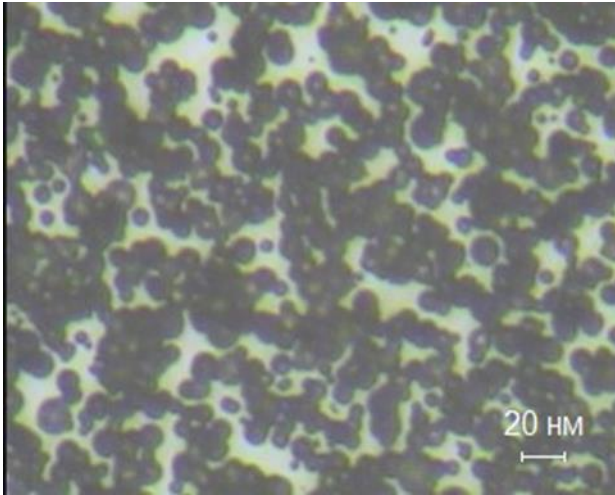


Рисунок 3. Фотография частиц дисперсного потока парафина, осаждённых на предметное стекло. Процесс диспергирования осуществлялся при потенциале 10,47 кВ из капилляра с наружным диаметром  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м при расстоянии между электродами равном  $4,5 \cdot 10^{-2}$  м. Диаметр частиц парафина варьируется в интервале значений  $(2-18) \cdot 10^{-9}$  м. Фотография получена с использованием микроскопа МИ 8.

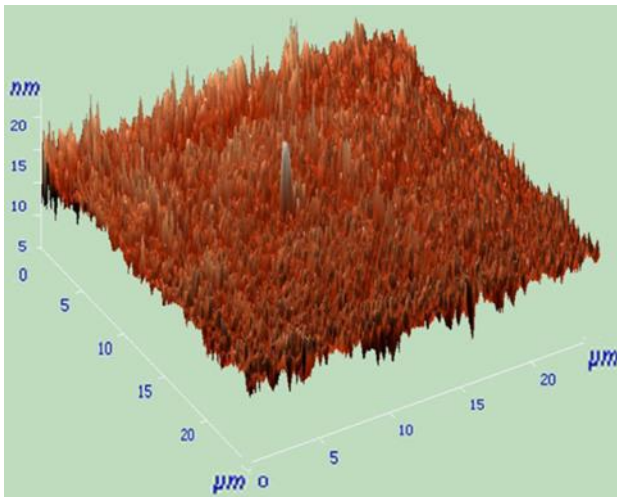


Рисунок 4. Фотография структуры наноплёнки парафина нанесённого на предметное стекло полученной с использованием атомно силового микроскопа NTEGRA Prima. Процесс диспергирования осуществлялся при потенциале 10,47 кВ из капилляра с наружным диаметром  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м при расстоянии между электродами равном  $4,5 \cdot 10^{-2}$  м. Толщина плёнки варьируется в интервале значений  $(2-20) \cdot 10^{-9}$  м.

## Модель процесса диспергирования жидкости

Как известно высота конуса Тейлора – положение точки максимума значения вектора напряжённости электрического поля создаваемого электрoзаряженным кольцом – образующим конца капилляра определяется его радиусом, а именно:

$$l = r_k / \sqrt{2}$$

На рисунке 5 схематически изображён конус Тейлора с указанием векторов сил действующих на гипотетическую заряженную частицу, находящуюся на вершине конуса. Оптимальный заряд частицы сферической формы, покидающей конус Тейлора определяем из известного соотношения:

$$q_0 = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot r_0 \cdot \varphi_B$$

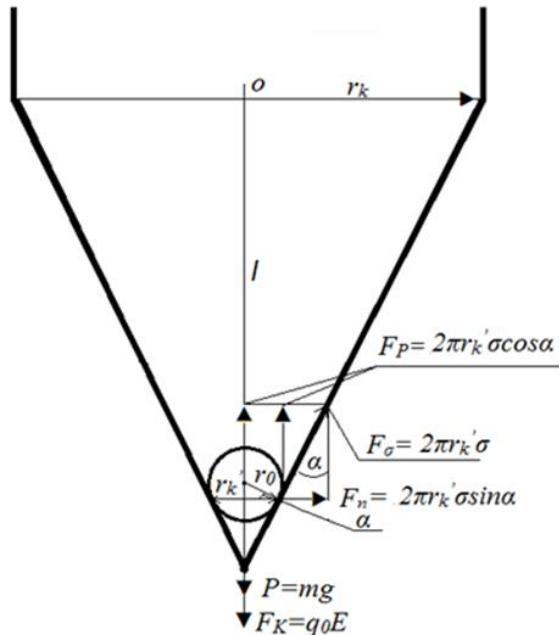


Рисунок 5. Схематическое изображение конуса Тейлора с указанием области поверхности мениска, с которой начинается стационарный процесс диспергирования при выполнении условия равновесия сил, действующих на заряженную частицу жидкости находящуюся в точке максимума вектора напряжённости электрического поля на его оси. Радиус гипотетической частицы для наглядности сильно увеличен относительно вершины конуса жидкости. Здесь  $F_\sigma$  – сила поверхностного натяжения направленная по касательной к сферической поверхности мениска.

Критическое значение электрического поля, при котором возникает режим неустойчивости на вершине конуса Тейлора и процесс диспергирования жидкости, как это следует из рисунка 5 определяется из неравенства:

$$\vec{F}_K + \vec{P} + \vec{F}_p + \vec{F}_{от} \geq 0$$

Здесь  $F_K$  – нормальная к сферической поверхности вершины конуса Тейлора кулоновская сила отталкивания воображаемой (гипотетической) электрoзаряженной частицы от контура конца капилляра,  $P$  - сила тяжести,  $F_p$  – нормальная составляющая силы поверхностного натяжения диспергируемой жидкости, удерживающая частицу на вершине конуса и  $F_{от}$  - сила отдачи диспергируемых частиц.

Сила отдачи практически равна нулю при минимальной начальной скорости выхода частиц из конуса.

С учётом последнего условия для определения критерия неустойчивости на вершине конуса Тейлора, в случае ориентации капилляра вертикально вниз в воображаемом условном вакууме получаем неравенство:

$$q_0 \cdot E + m_0 \cdot g \geq 2 \cdot \pi \cdot r_k' \cdot \sigma \cdot \cos \alpha$$

где  $\sigma$ ,  $r_k'$ ,  $m$  и  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения и радиус плёнки поверхностного натяжения в области максимума напряжения суммы сил: поверхностного натяжения, тяжести и кулоновской под действием которой заряженная частица покидает вершину конуса – радиус перешейки отрывающейся частицы, её масса и половина угла раствора при вершине конуса.

12

Массу частицы определяем по величине её отклонения в гравитационном и электрическом полях при горизонтальном её движении от конца капилляра ко второму электроду исходя из составляющих по осям  $x$  и  $y$  уравнений перемещения осевой частицы потока:

$$m_0 \cdot a_x = F_k - F_{cx}$$

$$m_0 \cdot a_y = P - F_{cy} - F_a + F_k$$

Для массы частицы определённой из этих уравнений получаем очевидное соотношение:

$$m_0 = \frac{q_0 \cdot E \cdot \Delta y}{gL}$$

где  $q_0$ ,  $E$ ,  $\Delta y$ ,  $g$ ,  $L$  – соответственно заряд частицы, вектор напряжённости электрического поля направленный по оси дисперсного потока от его вершины ко второму электроду, отклонение её траектории по оси  $y$ -ов, ускорение свободного падения и расстояние между вершиной конуса Тейлора и вторым электродом.

Результаты экспериментальных исследований показали, что величина отклонения частиц по оси  $y$ -ов при направлении потока по горизонтали практически равна нулю при расстояниях между электродами, достигающими несколько сантиметров. Проведённые расчёты показали, что при радиусах частиц дисперсного потока меньших  $10^{-8}$  м величина отклонения потока по оси  $y$ -ов оценивается значением порядка  $10^{-10}$ – $10^{-11}$  м, которая не может быть измерена экспериментально. Эти данные хорошо согласуются с экспериментальными значениями для размеров частиц и их отклонений по оси  $y$ -ов для парафина.

Исходя из условия баланса сил, для критического значения вектора напряжённости электрического поля на вершине конуса Тейлора получаем:

$$E_B = \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot \sigma}{6 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_l \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right)}}$$

где  $k$ ,  $\sigma$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_l$ ,  $l$  – соответственно безразмерный корректирующий коэффициент  $k \leq 1$ , коэффициент поверхностного натяжения жидкости, электростатическая постоянная, диэлектрическая постоянная жидкости и высота конуса Тейлора. Безразмерный коэффициент - величина, определяющая возможное отклонение радиуса перешейки частицы от её радиуса.

При исследованиях экспериментально измеряемой величиной является потенциал капилляра, при котором диспергируется жидкость с вершины конуса Тейлора ( $\varphi_{\text{в}} = \sqrt{2}\varphi_{\text{к}}/\sqrt{3}$ ) для которого получаем выражение:

$$\varphi_{\text{к}} = \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot \sigma \cdot L^2}{4 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_l \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right)}}$$

$$\varphi_{\text{в}} = \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot \sigma \cdot L^2}{6 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_l \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right)}}$$

Далее, исходя из экспериментального значения потенциала диспергирования жидкости и заданных значений: радиуса капилляра, расстояния между вершиной жидкого конуса и вторым электродом, физических свойств жидкости, гипотетической величины отклонения потока по оси у-ов в условном «вакууме» для расчётных характеристик частиц получаем:

$$r_0 = \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot \sigma}{2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right)}}$$

$$m_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi^2 \cdot \kappa^3 \cdot \sigma^3}{3 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^3 \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right)^3}}$$

$$q_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_l \cdot k^2 \cdot \sigma^2 \cdot L^2}{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot l \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right)}}$$

$$\frac{q_0}{m_0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_l \cdot g^2 \cdot L^2 \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right)^2}{k \cdot \sigma \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right)}}$$

Все экспериментальные исследования были проведены в среде воздуха ( $\varepsilon = \varepsilon_l / \varepsilon_c$ ), где  $\varepsilon_c$  – диэлектрическая постоянная среды;  $r_0$  – радиус частицы .

Зависимости расчётных параметров частиц от свойств жидкости и параметров системы в произвольной среде диспергирования (воздухе) принимают вид:

$$r_0 = \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot \sigma}{2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right) \cdot \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_{\text{ж}}}\right)}}$$

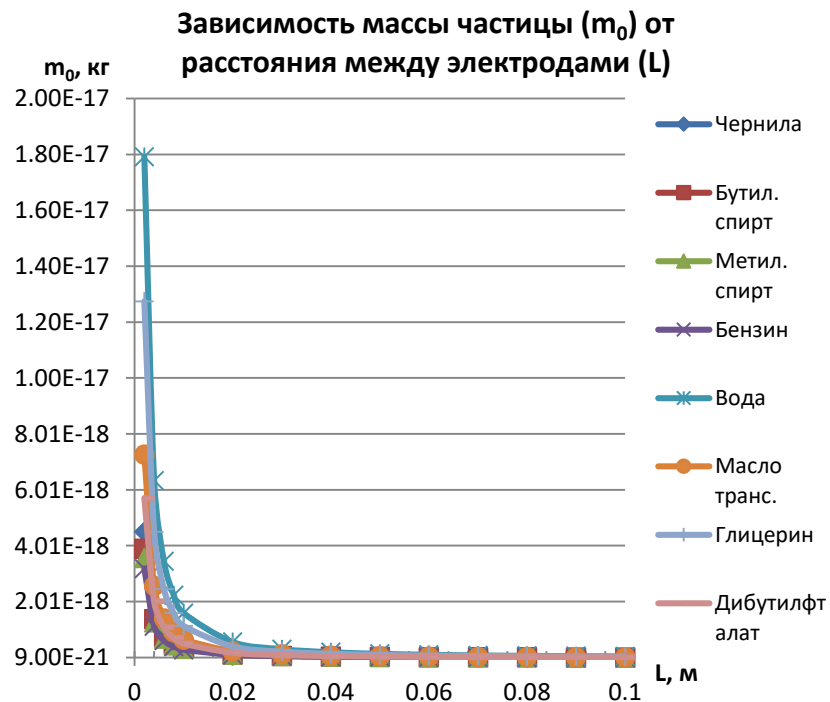
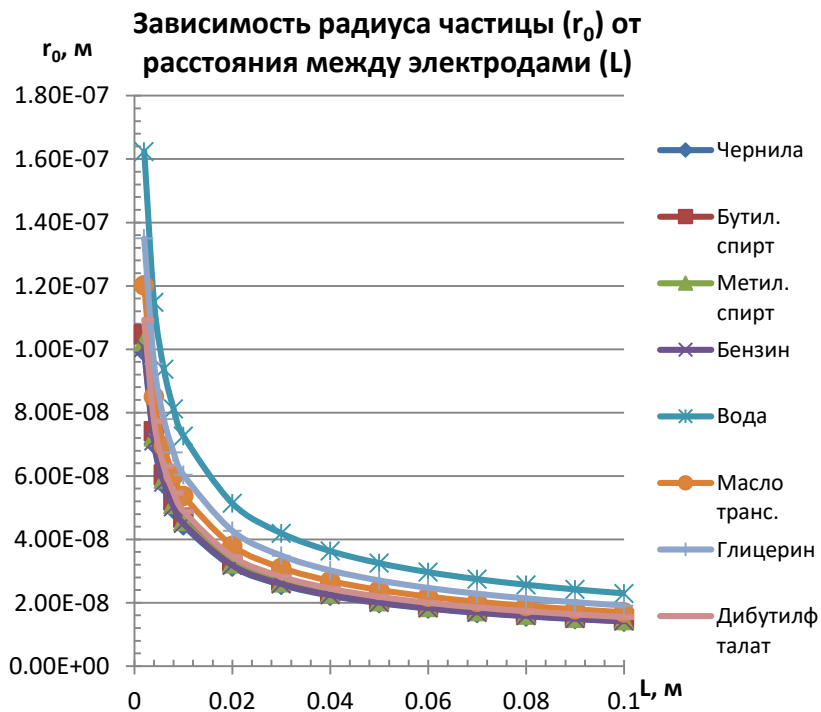
$$m_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi^2 \cdot \kappa^3 \cdot \sigma^3}{3 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^3 \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right)^3 \cdot \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_{\text{ж}}}\right)^3}}$$

$$q_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot k^2 \cdot \sigma^2 \cdot L^2}{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot l \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right) \cdot \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_{\text{ж}}}\right)}}$$

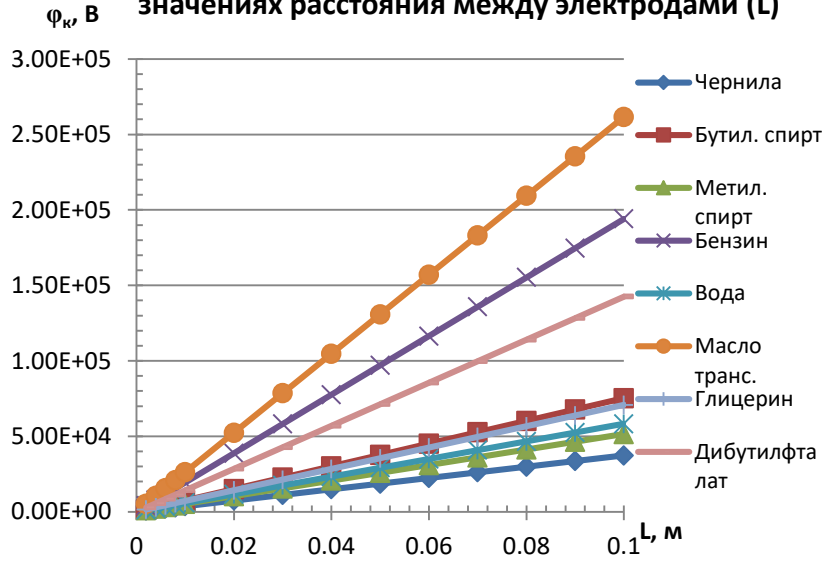
$$\frac{q_0}{m_0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot g^2 \cdot L^2 \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_{\text{ж}}}\right)^2}{k \cdot \sigma \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right)}}$$



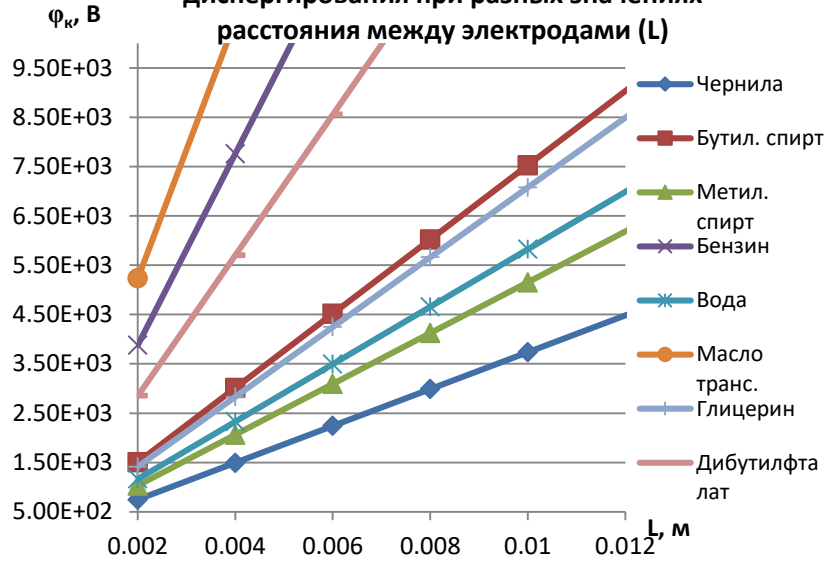
Как видно из полученных соотношений параметры частиц являются сложными функциями физических свойств среды диспергирования и диспергируемой жидкости, потенциала и радиуса капилляра, расстояния между вершиной жидкого конуса и вторым электродом. Расчётные зависимости параметров частиц от расстояния между электродами в произвольной среде диспергирования (воздух) приведены на следующих графиках. Естественно эти параметры также зависят от массового расхода жидкости через капилляр, который в нашем случае сведён к минимуму.



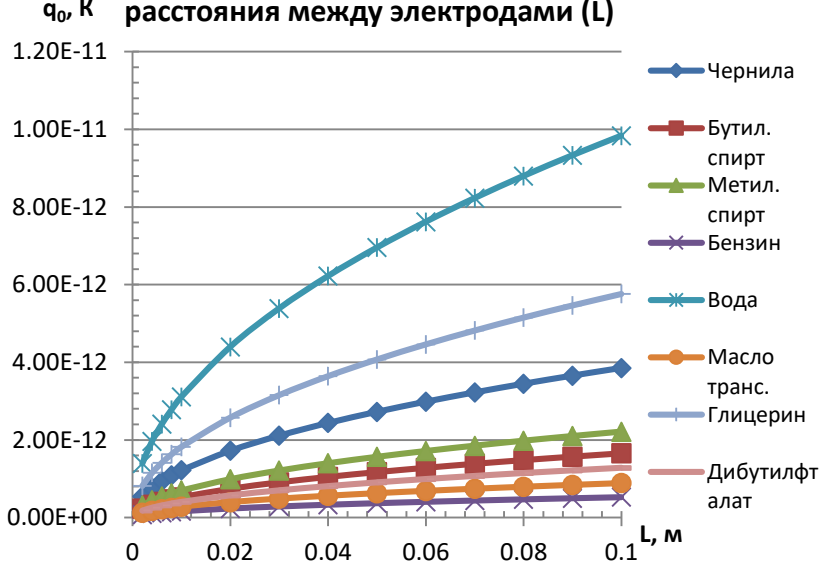
Потенциал диспергирования ( $\phi_k$ ) при разных значениях расстояния между электродами (L)



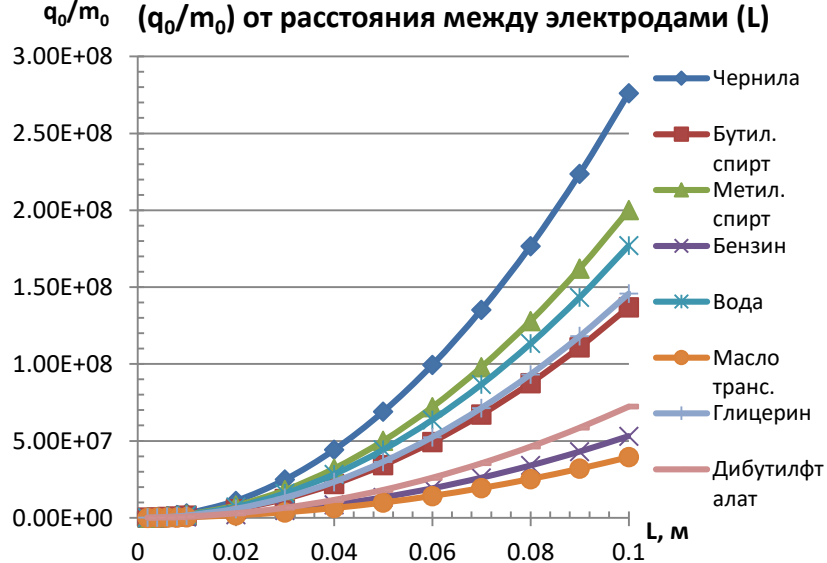
Начальная область зависимостей потенциала диспергирования при разных значениях расстояния между электродами (L)



Зависимость заряда частицы ( $q_0$ ) от расстояния между электродами (L)



Зависимость удельного заряда частицы ( $q_0/m_0$ ) от расстояния между электродами (L)



## Сопоставительный анализ известных и полученных в ходе исследований данных

Эту важную задачу определения потенциала диспергирования жидкости впервые попробовал решить Тэйлор. Тэйлор при решении этой задачи применил метод нахождения потенциала диспергирования проводящей жидкости путём замены системы капилляр с жидким конусом на его конце на гипотетический бесконечный конус, как в случае струйки жидкости. Такая гипотетическая математическая модель позволила Тейлору искусственно исключить влияние радиуса капилляра на потенциал диспергирования жидкости, и для зависимости потенциала диспергирования от величины коэффициента поверхностного натяжения получил выражение:

$$\varphi_T = 1,432 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\sigma \cdot L}$$

В дальнейшем модель Тейлора был в частности усовершенствован Шевченко С.И. в работе [8] и для потенциала диспергирования получил:

$$\varphi_{Ш} = B \cdot \sqrt{\sigma}$$

где  $B$  - полуэмпирический коэффициент порядка  $16 \cdot 10^3$ .

Известны и другие гипотетические модели диспергирования жидкостей, основанные на критерии неустойчивости Релея, где заряд дисперсных частиц определяется по соотношению:

$$q_0 = \pm \sqrt{16 \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \sigma}$$

По нашей модели заряд частицы, как отмечено выше определяется соотношением:

$$q_0 = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot r_0 \cdot \varphi_B$$

По модели Релея процесс диспергирования жидкости протекает с обязательным перезарядом частиц. Если воспользоваться критерием Релея для заряда диспергируемых частиц, то они оказываются неустойчивыми по заряду и подлежат дальнейшему их распаду до состояния зарядовой устойчивости дочерних систем. Однако в экспериментальных исследованиях наблюдается монотонное уменьшение плотности частиц по сечению потока с удалением от вершины конуса Тейлора, как это явно следует из рисунка 2 и фотографий дисперсных потоков приведённых на рисунке 6.

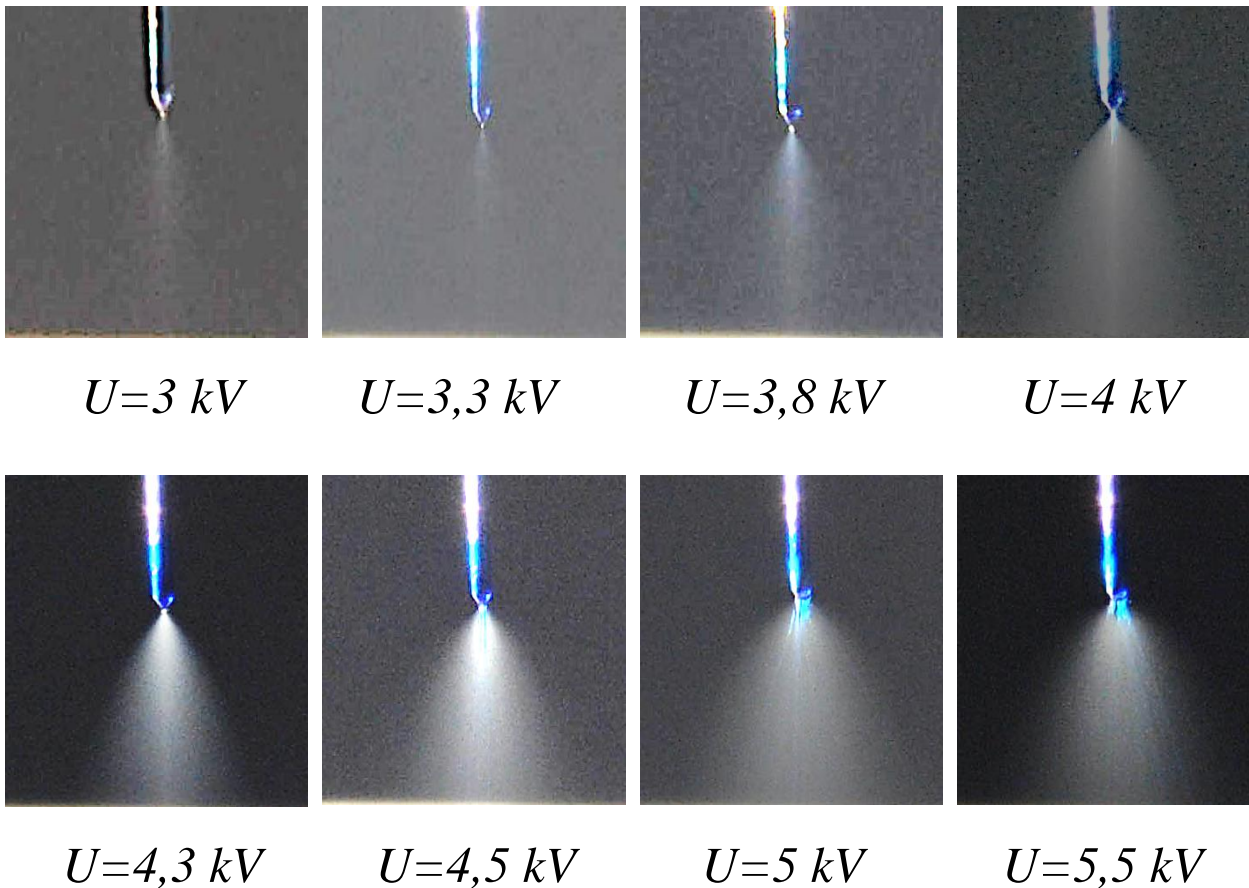


Рисунок 6. Зависимости режима диспергирования чернил струйных принтеров и структуры дисперсного потока жидкости от высоты конуса Тейлора на вершине капилляра без диска при радиусе капилляра  $0,3 \cdot 10^{-3}$  м. На photographs видно как высота конуса Тейлора убывает с ростом потенциала капилляра, и плотность частиц по сечению потока монотонно убывает по мере удаления от вершины конуса дисперсного потока.

Из этих фотографий дисперсных потоков с очевидностью следует, что заряд исходных частиц дисперсных потоков чернил струйных принтеров является оптимальным, и они по ходу потока не распадаются.

Таблица 1

№ п/п	Вещество	$\sigma$ , Н/м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\varepsilon$ , Ф/м	$\varphi_T$ , кВ	$\varphi_{Ш}$ , кВ	$\varphi_K$ , кВ	$\varphi_Э$ , кВ
1	Чернила струйных принтеров	$30 \times 10^{-3}$	1100	81			2,9	3*
2	Бутиловый спирт	$24,6 \times 10^{-3}$	810	16,35			6	
3	Метиловый спирт	$23,02 \times 10^{-3}$	792	32,65			4,1	2,8*
4	Бензин	$21 \times 10^{-3}$	750	1,9-2,3			15,5	
5	Вода	$73 \times 10^{-3}$	1000	81	17,3-21	4,42-4,48	4,6	4,7**
6	Масло трансформаторное	$40 \times 10^{-3}$	1000	2,2			20,9	
7	Глицерин	$62,5 \times 10^{-3}$	1239	47-68			5,7	
8	Дибутилфталат	$34,56 \times 10^{-3}$	1045	6,4	11,3	2,1	3,4	3**

В таблице 1 приведены физические параметры и расчётные данные потенциалов диспергирования некоторых исследованных жидкостей по соотношениям Тейлора  $\varphi_T$ , Шевченко  $\varphi_{Ш}$ , и по соотношению полученному в настоящей работе  $\varphi_K$  в сравнении с экспериментальными данными  $\varphi_Э$ .

\* - данные полученные в ходе работы.

\*\* - известные экспериментальные данные.

Для проведения сопоставительного анализа известных экспериментальных и расчётных данных для зависимостей параметров частиц от потенциалов диспергирования получаем:

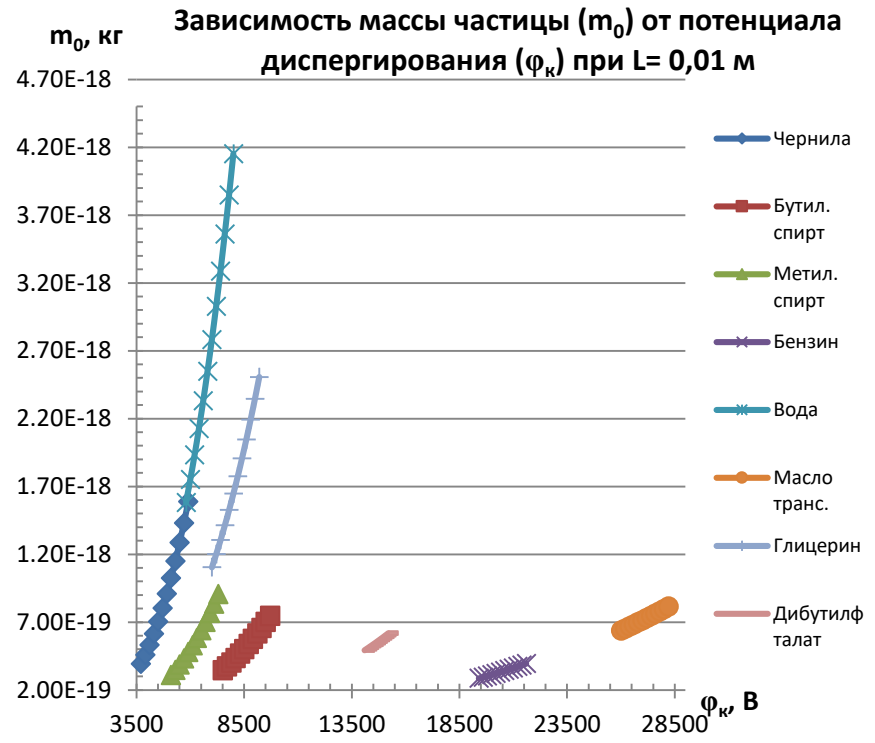
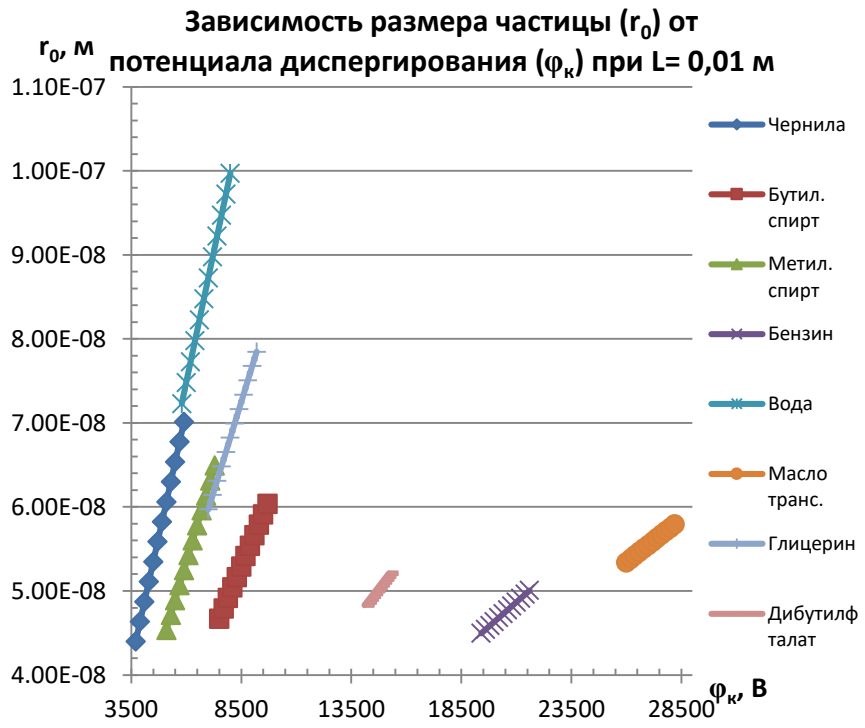
$$r_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right)}{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot L^2 \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right) \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{с}}}{\rho_{\text{ж}}}\right)}} \cdot \varphi_{\text{к}}$$

$$m_0 = \sqrt{\frac{128 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon_0^3 \cdot \varepsilon^3 \cdot l^3 \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right)^3}{9 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^3 \cdot L^6 \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right)^3 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{с}}}{\rho_{\text{ж}}}\right)^3}} \cdot \varphi_{\text{к}}^3$$

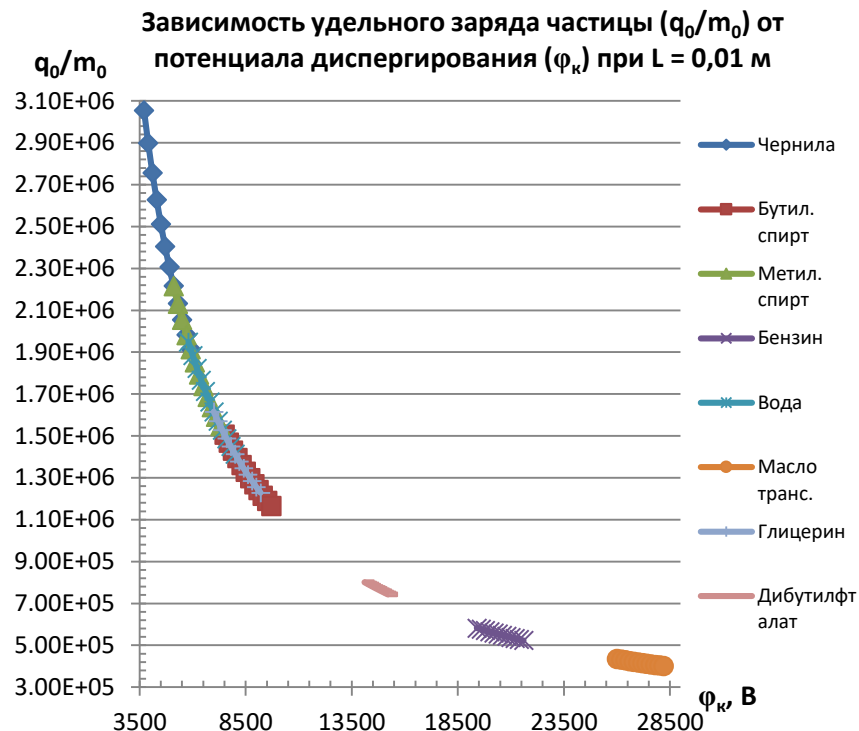
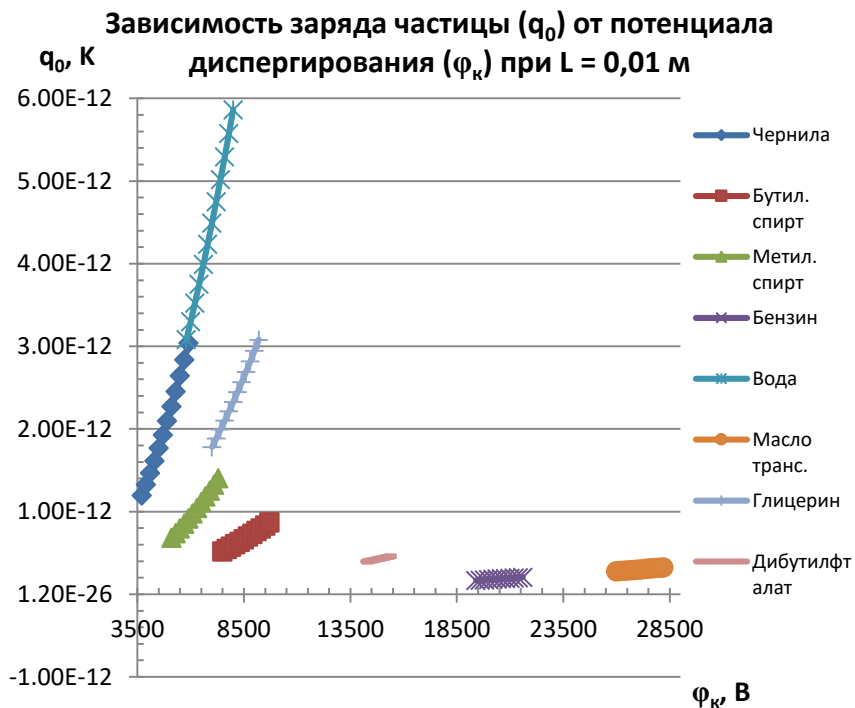
$$q_0 = \sqrt{\frac{64 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon_0^3 \cdot \varepsilon^3 \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right)}{3 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot L^2 \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right) \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{с}}}{\rho_{\text{ж}}}\right)}} \cdot \varphi_{\text{к}}^2$$

$$\frac{q_0}{m_0} = \sqrt{\frac{3 \cdot g^2 \cdot L^4 \cdot \left(1 + \frac{L}{\Delta y}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{с}}}{\rho_{\text{ж}}}\right)^2}{2 \cdot l^2 \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{L}\right)^2}} \Big/ \varphi_{\text{к}}$$

Графики этих зависимостей в сравнении с известными и полученными в ходе настоящих исследований экспериментальными данными для воздуха приведены ниже:







Как следует из таблицы 1 и графиков, наиболее приближённые к экспериментальным данным значения потенциала диспергирования получаются на основе расчётных соотношений, полученных исходя из изложенной модели диспергирования жидкостей. Причём в настоящей работе исследовано большее количество веществ, включая бензин, изопропиловый и амиловый спирты, четырёххлористый углерод, диэтиловый эфир, тогда как в известной литературе исследовано всего лишь два – три вещества.



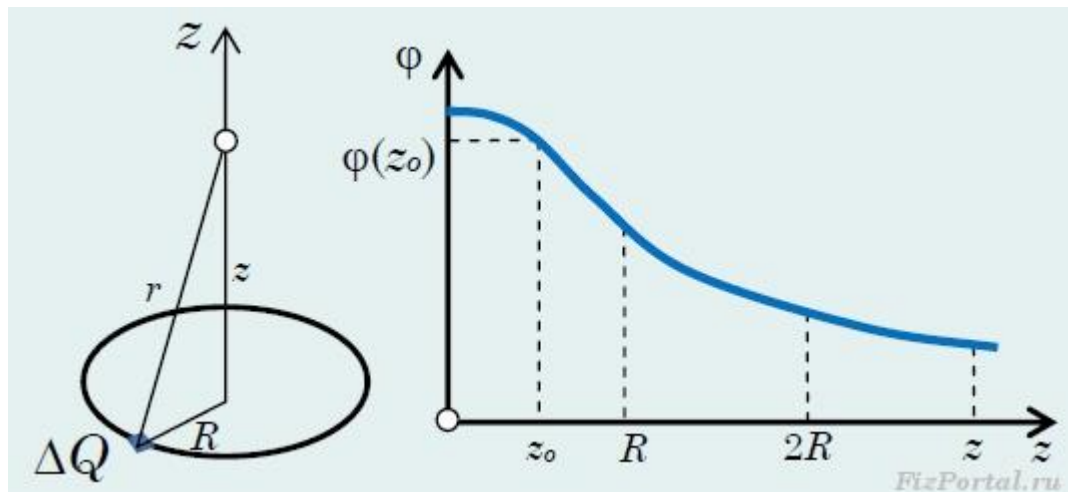
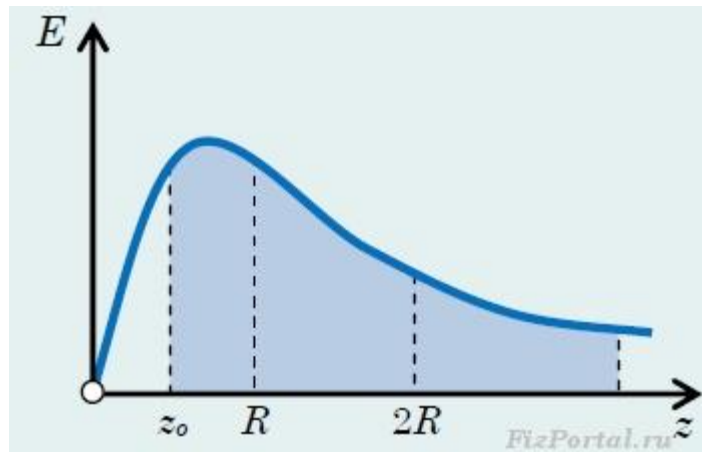
Из приведённого сопоставительного анализа следует, что полученная в ходе настоящих исследований модель диспергирования жидкостей наилучшим образом аппроксимирует известные и полученные в работе экспериментальные данные и характеры изменения известных экспериментальных данных. Количественное сравнение полученных значений параметров частиц с некоторыми известными данными не представляется возможным из-за сильного искажения структуры электрического поля в зоне формирования дисперсного потока и отсутствия условий стационарности режимов протекания процессов в известных исследованиях.

По результатам этих исследований получены три патента, в том числе один немецкий и опубликовано более 30-ти работ.

## Литература.

1. Nukiya S. Soc. Mech. Engine. Japan 37, 206, 267 (1934)
2. Вердиев М.Г. Теплофизические основы и методы расчёта систем обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии. Автореф. дис. док. техн. наук – Махачкала: Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, 1997. – 44 с.
3. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении.- Киев: Наукова думка, 1980. - 314 с.
4. Тонкие плёнки // Химическая энциклопедия. — М.: Большая Российская энциклопедия. С. 607–608.
5. Вердиев М.Г. Получение тонких плёнок жидкостей путём их диспергирования в электрическом поле. Электронная обработка материалов. – 1991. – №4. – С. 36 – 41.
6. Вердиев М.Г., Иванов О. П., Ниналалов С. А. Исследование диспергирования жидкостей в электрическом поле// Инженерно-физический журнал. – 1989. – Т.57. №2. – С. 275 – 280.
7. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Классификация режимов электродиспергирования жидкостей // ЖТФ. – 2012. – Т. 82. - № 10. – С. 7 – 17.
8. Жакин А.И. Электродинамика заряженных поверхностей. // Успехи физических наук. 2013 г., Том 183, № 2, С. 153 – 177.
9. Шевченко С.И. О потенциале образования конусного мениска проводящей жидкости в электрическом поле.// Журнал технической физики. 1990, Т. 60, в. 2, с. 54-57.
10. Taylor J. //Proc. Roy. Soc. (London). 1964. Vol. A280. P. 67 – 70.
11. Verdiyev M.G., Nabiev Sh.Sh. Kamnev N.A. The research of the technological parameters effect on the shape and structure of the disperse dye flow of the inkjet printers produced in the electric field // Journal of Physics: Conference Series 345. (2012).
12. Семкин Н.Д., Шепелев С.М. Исследование потоков микрочастиц при электростатическом диспергировании жидкости. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. № 3, 2006, С. 44 – 52.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**



Зависимости характеристик электрического поля на оси  
заряженного кольца от расстояния.