

Об электромагнитных явлениях, возникающих при кавитационном движении жидкости в коаксиальном диэлектрическом канале

В. А. Полянский, А. А. Монахов, *И. Л. Панкратьева

*Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Мичуринский пр., 1, г. Москва, 119192, Россия, *e-mail: ilpan@imec.msu.ru*

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований течений слабопроводящей жидкости в узком коаксиальном канале с диэлектрическими стенками, в котором наблюдается свечение жидкости. Экспериментально показано, что кроме видимого светового излучения имеются также электромагнитное излучение в радиодиапазоне и рентгеновское. Обсуждаются различные физические механизмы, которые могут вызывать эти явления. Считается, что их основная причина связана с электризацией жидкости при ее течении в канале сложной формы. Приводятся результаты расчетов электризации в рамках электрогидродинамической двухфазной модели среды с учетом электрохимических процессов на границах раздела и конвективного переноса зарядов с образованием вблизи стенок сильных индуцированных электрических полей.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, электризация, кавитационные явления, слабопроводящая жидкость.

УДК 532.542

ВВЕДЕНИЕ

Транспортировка слабопроводящей жидкости (например, углеводородов) по диэлектрическим каналам в различных технологических процессах обычно сопровождается электризацией, то есть образованием в движущейся жидкости нескомпенсированного объемного электрического заряда [1, 2]. Возникающие при этом сильные электрические поля могут существенно влиять на условия транспортировки и приводить к ряду нежелательных явлений, таких как электрические пробой с эрозией стенок канала под действием джоулева нагрева жидкости током пробоя. Следует заметить, что наибольший эффект присутствия сильных полей проявляется в тонких каналах, когда характерный размер поперечного сечения канала соизмерим с толщиной заряженных пристеночных слоев. В тонких каналах сложной формы процессы электризации транспортируемой жидкости усложняются из-за возникновения кавитационных пузырьков с поверхностным зарядом, обусловленным их обтеканием заряженной жидкостью. Из описанных в литературе экспериментов известно, что при наличии кавитации в определенных условиях может наблюдаться свечение жидкости [3–9]. В литературе обсуждается несколько возможных механизмов свечения: тепловая люминесценция, вызываемая сильным нагревом газа в кавитационном пузырьке при его сжатии [4], хемолюминесценция [5] и электрический пробой газовой смеси в кавитационной полости

под действием электрического поля. Поле, вызывающее пробой, индуцируется поверхностным электрическим зарядом границы раздела при ее деформации и разрушении [5, 7, 8]. Ниже приводятся экспериментальные факты в пользу электрической природы излучений. Рассматривается также еще один возможный механизм, связанный с холодной эмиссией электронов стенками канала в сильных электрических полях, возникающих вследствие электризации при течении жидкости.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процессов электризации при течении слабопроводящей жидкости в тонком коаксиальном канале с диэлектрическими стенками. Общая схема установки и схема коаксиального канала представлены на рис. 1.

Движение жидкости через исследуемый канал 1 в рабочем тракте установки (рис. 1а) создавалось перепадом давления, вырабатываемого шестеренчатым насосом 2. В регистрационном модуле 4 измерялись давление жидкости электронным датчиком 7 и температура – датчиком 8. В потоке присутствовали как мелкомасштабные пульсации давления на частоте около 130 гц, которые определялись скоростью вращения шестеренок насоса, так и пульсации с небольшой амплитудой более

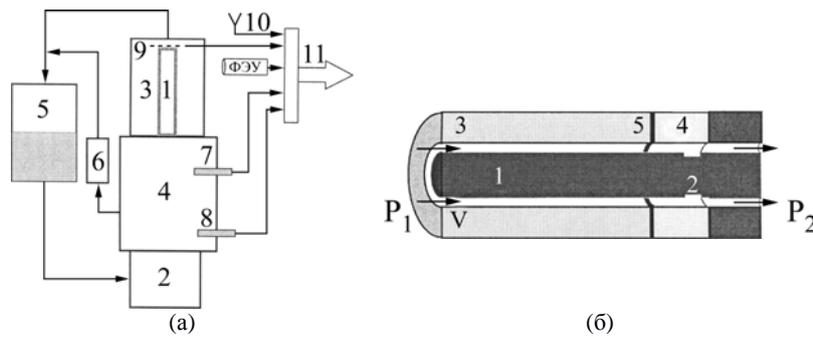


Рис. 1. Схемы установки для исследования электромагнитных явлений при электризации жидкости в диэлектрических каналах (а) и коаксиального канала (б). Давление жидкости $P_1 > P_2$. Стрелки указывают направление течения со скоростью V .

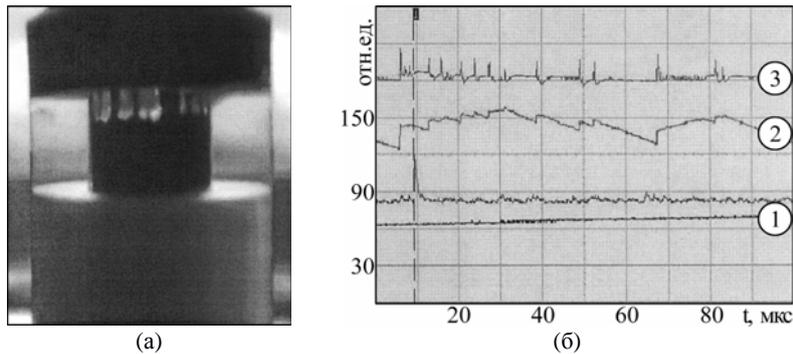


Рис. 2. Свечение жидкости в кавитационных областях (а); осциллограммы: 1 – давления жидкости в канале; 2 – электромагнитной помехи; 3 – кавитационного свечения (б).

низкой частоты в 14 Гц, которая соответствовала резонансной частоте контура подвода жидкости к каналу. Скорость движения жидкости в канале регулировалась перепускным клапаном 6 и определялась по расходу жидкости. После регистрационного модуля жидкость поступала в блок визуального наблюдения 3, который был выполнен из органического стекла. Через этот блок проводилась кино- и фоторегистрация процессов, а также регистрация свечения жидкости фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Из блока 3 жидкость попадала в коллектор 5, где происходило отделение кавитационных пузырьков и термостатирование жидкости. В некоторых экспериментах на выходе из канала 1 устанавливался электрический зонд 9 в виде сетки для измерения через делитель напряжения электрического потенциала жидкости. Также проводилась регистрация электромагнитного фона в радиодиапазоне антенной 10. Излучение в рентгеновской области регистрировалось ионизационным датчиком и рентгеновской пленкой. В качестве жидкости использовалось техническое масло АИ 20 с вязкостью 80 сСт. Числа Re по характерному поперечному размеру исследуемого канала не превышали 150.

Центральная часть 1 коаксиального канала (рис. 1б) выполнена из эбонита диаметром 10 мм и длиной 30 мм. Для стимулирования кавитации жидкости на его оконечной части имелись небольшие равномерно расположенные по окружности каверны 2 глубиной в 0,5 мм.

Внешняя часть канала 3 – составная. Большая часть ее, длиной 20 мм, изготовлена из фторопласта, оконечная часть 4 – из прозрачного органического стекла для регистрации происходящих в канале процессов. Между фторопластом и оргстеклом размещена металлическая шайба 5. Зазор между стенками канала составлял 1,5 мм.

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ И СВЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ В КОАКСИАЛЬНОМ КАНАЛЕ

После входа жидкости в диэлектрический канал в окрестности стенок за счет различного рода поверхностных электрохимических процессов происходит образование нескомпенсированного электрического заряда (электризация) [1]. Зондовые измерения показали, что в результате электризации жидкость по отношению к стенке приобретала положительный электрический потенциал. При этом для расходов, при которых средняя скорость потока в коаксиальном канале превышала 3 м/с, в кавитационных областях 2 наблюдалось свечение жидкости (рис. 2б).

Свечение имело дискретный характер и сопровождалось коррелированным электромагнитным сигналом в радиодиапазоне. На рис. 2б представлены осциллограммы датчика давления 1, электромагнитного сигнала в радиодиапазоне 2 и свечения кавитационной области 3. Хорошо видно соответствие между интенсивностью радиосигнала и частотой

появления пиков в осциллограмме свечения. Впервые обнаруженная корреляция между свечением жидкости и возникающим при этом радиосигналом свидетельствует об электрогидродинамической природе наблюдаемого явления. Объемный электрический заряд электризации переносится конвективным потоком в область с кавернами 2 (рис. 1б), где при течении образуются многочисленные кавитационные пузырьки. На поверхности пузырьков (межфазных границах раздела), обтекаемых заряженной жидкостью, образуется поверхностный электрический заряд. Электрический пробой газовой среды пузырьков при их деформации с образованием границ раздела с большой кривизной приводит к появлению пиков в осциллограмме излучения и вызывает радиопомехи. Отметим, что обнаруженную корреляцию оптического и радиосигналов нельзя объяснить люминесценцией (химической или тепловой) молекул газового наполнения пузырьков, которая может возникать при повышении давления и температуры в процессе схлопывания кавитационных образований [4, 5].

Дополнительный вклад в свечение может дать механизм, обусловленный дезактивацией электронно-возбужденных отрицательных ионов жидкости. Такие ионы образуются в среде за счет прилипания свободных электронов к атомам и молекулам с большим электронным сродством (типа углерода, хлора, фтора), которые входят в состав исследуемых углеводородных жидкостей и примесей. Теоретические расчеты электризации слабопроводящих углеводородных жидкостей [10] показали, что в тонком пристеночном электродиффузионном слое образуются сильные электрические поля, которые могут вызывать холодную автоэлектронную эмиссию из материала стенки. Поскольку свободные электроны в жидкости существовать не могут, они захватываются молекулами жидкости с большим электронным сродством на высокие орбиты. Дезактивация таких отрицательных ионов может происходить как за счет столкновительных процессов в среде, так и путем излучения фотонов. На рис. 3 представлен измеренный спектр свечения в кавитационной области. Излучение регистрировалось оптическим анализатором спектра OSA-WP4 с приемной камерой SIT-500. Заметим, что измеренный спектр излучения достаточно хорошо соответствует фоторекомбинационному спектру иона Cl^- [11]. В пользу дополнительного механизма излучения за счет дезактивации отрицательных ионов свидетельствует наблюдение свечения в экспериментах, где реализовалось течение жидкости в круглом канале с гладкими стенками в отсутствие кавитации.

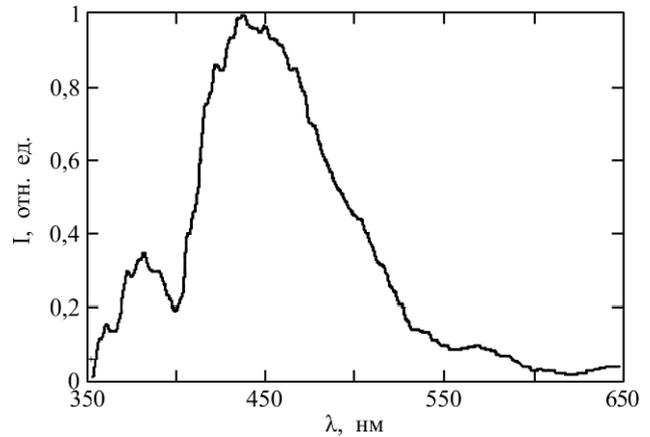


Рис. 3. Спектр свечения кавитационной области.

В кавитационных областях благодаря циркуляции жидкости происходит накопление переносимого конвекцией заряда, величина которого, как уже отмечалось, может создавать напряженность электрического поля, достигающую десятков кВ/м. Области накопления заряда являлись изолированными и их разряд в экспериментальной установке происходил на металлическое кольцо 5 (рис. 1б), которое выступало в роли катода. Наблюдаемые нестационарные разряды 2 (рис. 4а) возникали в разных областях между кавитаторами 1 и кольцом 3. Как видно на фотографии, яркость свечения, определяемая плотностью разрядного электрического тока, неравномерная вдоль канала разряда и уменьшается при подходе к области накопления заряда. Длина каждого разряда составляет примерно 8 мм.

Разрядные явления между областью накопления заряда и кольцом невозможно объяснить обычными электрическими пробоями исследуемой жидкой среды, которая имеет достаточно высокую электрическую прочность.

Наблюдения показали, что большая вероятность возникновения таких разрядов обусловлена появлением кавитационных «нитей» в начальном участке канала (3 на рис. 1б). Видимо, на входе в канал образуется неустойчивая кольцевая кавитационная каверна, которая время от времени разрывается под действием пульсаций давления и скорости, вызываемых насосом. Части этой каверны отрываются от зоны образования и движутся вместе с потоком в виде светоотражающих кавитационных нитей. На рис. 4б показана такая кавитационная нить. При выходе нити в область течения за кольцом происходит пробой газовой канала, обладающего значительно меньшей пробивной прочностью, чем жидкая среда. Фотография разрядов из кавитационных областей на металлическое кольцо через эти нити представлена на рис. 4а. Таким образом, кавитационная область на выходе из канала служит своеобразным нако-

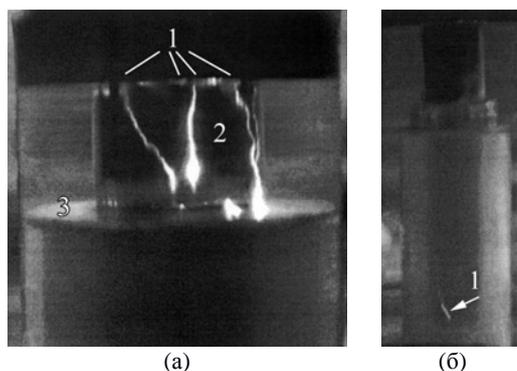


Рис. 4. Разряды (2) кавитационных областей (1) на металлическое кольцо (3) – (а); образование кавитационной нити (1) в начальном участке канала – (б).

пителем заряда, который сносится конвективным движением из пристеночных заряженных областей, образующихся в результате электризации жидкости в канале [1]. Этот заряд нейтрализуется в результате многочисленных наблюдаемых разрядов.

При разряде светящихся кавитационных областей из-за протекания разрядного тока происходит интенсивный джоулев разогрев токового канала, а за счет этого – жидкости и стенок канала. Уровень разогрева оказывается значительным, более 100°C , что приводит к оплавлению органического стекла (рис. 5). Отметим, что речь идет об обычном токе проводимости в ионизированной газовой смеси, а не о конвективном токе электризации в жидкости. Последний, очевидно, не дает никакого вклада в источник тепла.

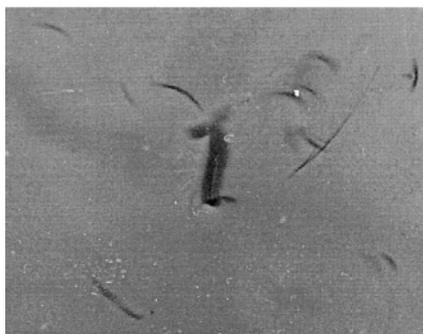


Рис. 5. Затемнение рентгеновской пленки при разряде кавитационной области.

В процессе экспериментов также было установлено, что наблюдаемые разряды в газовой фазе приводят к генерации тормозного рентгеновского излучения. Регистрация рентгеновского излучения проводилась газоразрядным счетчиком на расстоянии 60 мм от разряда. Уровень излучения составлял 750 мкР/ч при фоне в помещении 12 мкР/ч . Излучение не было изотропным и имело остронаправленную форму. Контрольная регистрация рентгеновского излучения проводилась рентгеновской пленкой, расположенной на таком же расстоянии. Результат, полученный на пленке, приведен на

рис. 6. Видно, что имеются центральное затемнение от прямого рентгеновского излучения и несколько подковообразных интерференционных участков. Поскольку разряд был нестабильным и проходил на жидкость, картина несколько отличается от классической при стационарном разряде на кристалл.

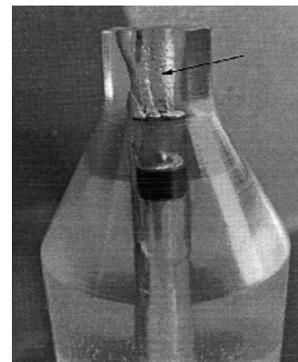


Рис. 6. Стенка цилиндрического канала из органического стекла, оплавившаяся под влиянием джоулева нагрева, сопровождающего кавитационное свечение жидкости.

Данная схема генерации рентгеновского излучения аналогична схеме в рентгеновской трубке. В роли анода здесь выступают кавитационные области с высоким электрическим потенциалом. В роли катода – металлическое кольцо. Кавитационные разрядные нити создают электропроводную среду между ними.

ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ

Как уже отмечалось, основной причиной, которая приводит к описанным выше наблюдаемым явлениям, служит, по мнению авторов, контактная электризация жидкости при ее взаимодействии со стенками канала. В качестве обоснования этого утверждения приведем некоторые результаты электрогидродинамических расчетов электризации для течения в узком коаксиальном канале с диэлектрическими стенками, параметры которого в основном соответствуют эксперименту. Такие модельные расчеты позволяют оценить характерные значе-

ния индуцируемых течением электрических полей и плотности объемного заряда.

Кратко опишем постановку задачи. Рассматривается стационарное ламинарное течение жидкости с малой примесью ионов двух сортов с концентрациями n_m и зарядами e_m ($m = 1, 2$, $e_1 > 0$, $e_2 < 0$) в узком коаксиальном полубесконечном канале с шириной зазора h , стенки которого находятся под некоторым одинаковым постоянным электрическим потенциалом (например, ζ -потенциалом, поскольку рассматриваются диэлектрические стенки). На входе в канал среда считается квазинейтральной с концентрацией носителей заряда n_0 , изначально присутствующих в жидкости вследствие диссоциации молекул примеси электролитной природы ($n_1 = n_2 = n_0$). Скорость несущей жидкости V считается заданной, поскольку в отсутствие внешних полей малая примесь заряженных частиц не влияет на движение среды.

Уравнения электрогидродинамики в двумерной цилиндрической системе координат, где ось x направлена вдоль канала, а ось r вдоль радиуса поперечного сечения канала, запишем в виде [1]:

$$\begin{aligned} V \frac{\partial n_m}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n_m U_m) &= 0, \\ \varepsilon \varepsilon_0 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial F}{\partial r} \right) &= -q, \\ E &= -\frac{\partial F}{\partial r}, \\ n_m U_m &= -D_m \frac{\partial n_m}{\partial r} - \text{sign}(e_m) b_m n_m \frac{\partial F}{\partial r}, \\ q &= \sum_m e_m n_m, \quad m = 1, 2. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь D_m , b_m – коэффициенты диффузии и подвижности ионов; U_m – скорость ионов в поперечном к стенкам канала направлении; q – плотность объемного заряда F – электрический потенциал; E – поперечная составляющая напряженности электрического поля; $\varepsilon \varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость.

Определяющее значение в рассматриваемой задаче имеет формулировка граничных условий для концентраций заряженных компонент. В работе используются граничные условия, полученные из баланса потоков частиц на стенки канала с учетом неравновесных электрохимических процессов поверхностной ионизации и рекомбинации ионов [12]. Для определенности сделаем следующие предположения. Стенка химически нейтральна по отношению к положительным ионам, отрицательные ионы сорта 2 участвуют в поверхностных реакциях

рекомбинации и ионизации. С учетом вышесказанного соотношения на поверхности внутреннего цилиндра запишем в виде (для внутренней стенки внешнего цилиндра условия аналогичны):

$$n_1 U_1 = 0, \quad n_2 U_2 = A_2 - K_2 n_2. \quad (2)$$

Входящие в (2) параметры A_2 , K_2 описывают поверхностную ионизацию и рекомбинацию ионов. Эти параметры зависят от материала стенок канала и могут быть разными для различных участков стенок, например при переходе от участка 1 (фторопласт) к участку 3 (оргстекло) (рис. 2б). Для постоянного электрического потенциала на стенках зададим условие $F = 0$.

Задачи (1)–(2) решаются численно. Ниже приведены результаты расчетов для среды типа технического масла с добавками сильного электролита. Добавки позволяют менять проводимость среды в широком диапазоне. При обезразмеривании уравнений использованы следующие характерные значения: проводимость $\sigma_0 = 10^{-10}$ См/м, коэффициент диффузии $D_0 = 1,34 \cdot 10^{-9}$ м²/с, скорость $u_0 = 15$ м/с (соответствует расходу жидкости с устойчивым свечением), потенциал $F_0 = kT/e$, напряженность поля $E_0 = F_0/h$, полный заряд сечения канала $Q_0 = e n_0 h$, скорость поверхностной рекомбинации ионов $K_{20} = 5 \cdot 10^{-5}$ м/с [13]. Концентрация n_0 рассчитывается по значениям σ_0 , D_0 . Рассматриваются каналы малой ширины с характерным размером $h = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, при этом $E_0 = 17$ В/м для $T = 300$ К.

Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 7, 8. На основе полученного решения можно представить следующую картину процессов в среде. Сразу после входа жидкости в канал в результате неравновесной поверхностной рекомбинации концентрация отрицательных ионов в окрестности стенки уменьшается и в жидкости начинает генерироваться положительный объемный заряд. Этот заряд индуцирует неоднородное электрическое поле, направленное к стенке. В возникшем поле положительные ионы, не реагирующие на поверхности, начинают двигаться из ядра потока в пограничную область, их концентрация вблизи стенки растет, еще более увеличивая объемный заряд. В описанных процессах наряду с полем возникают также градиенты концентраций заряженных компонент, создающие потоки диффузии отрицательных ионов к стенке, а положительных ионов от стенки. Диффузионные потоки заряженных компонент конкурируют с их дрейфовыми потоками под действием индуцированного поля. Изменение вдоль канала концентраций ионов,

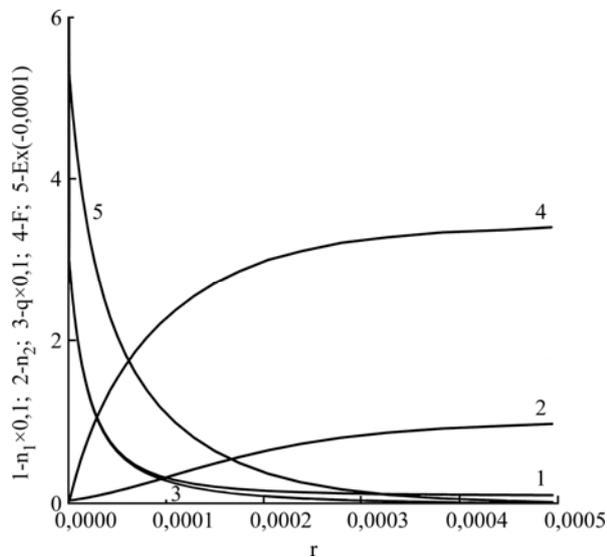


Рис. 7. Распределения концентраций ионов n_1 (1), n_2 (2), плотности объемного заряда q (3), электрического потенциала F (4), напряженности поля E (5) в тонком слое вблизи стенки внутреннего цилиндра.

объемного заряда и обусловленного им продольного конвективного электрического тока происходит до тех пор, пока не установится баланс потоков диффузии и дрейфа ионов в поперечном направлении. При этом объемный заряд сечения и конвективный ток выходят на насыщение и далее вдоль канала меняются слабо.

Распределения параметров среды в малой окрестности внутренней стенки канала показаны на рис. 7. Данные приведены для некоего сечения канала достаточно далеко от входа. Видно, что вблизи стенки имеется слой положительного заряда (кривая 3), который индуцирует сильное электрическое поле вблизи стенки (кривая 5). Рост абсолютной величины напряженности этого поля на поверхности стенки E_w и полного конвективного тока через поперечное сечение вдоль длины канала представлен на рис. 8.

Таким образом, расчеты в рамках электрогидродинамической модели среды показывают, что разделение зарядов в тонком электродиффузионном пограничном слое на границе раздела генерируют конвективный электрический ток и сильные электрические поля, которые могут вызвать автоэлектронную эмиссию из стенки. Свечение движущейся через узкий канал жидкости в отсутствие кавитационных явлений можно объяснить прилипанием электронов к молекулам с положительным электронным сродством и образованием в среде высоко электронно-возбужденных частиц с последующим фоторекомбинационным высвечиванием. Например, в сечении, близком к выходному концу канала, размерное значение поля $E_w = 570$ кВ/м. Отметим, что вид измеренного спектра излучения (рис. 3)

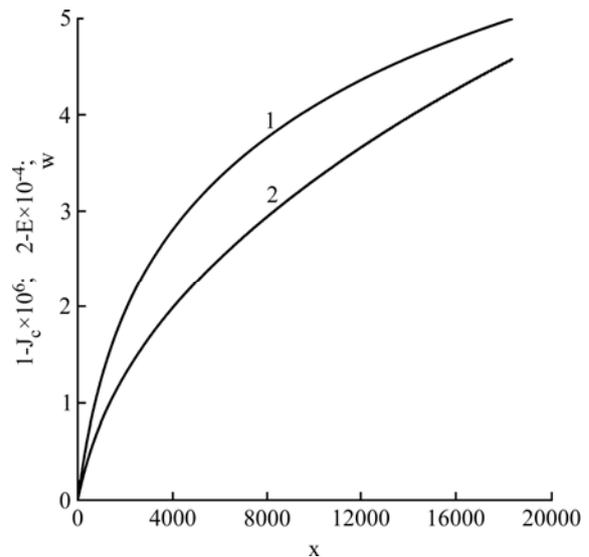


Рис. 8. Изменение вдоль канала полного конвективного тока через сечение J_c (1) и напряженности поля E_w (2) на поверхности стенки внутреннего цилиндра.

качественно подтверждает фоторекомбинационный характер процессов вблизи стенок канала [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При кавитационном движении слабопроводящей жидкости в тонких диэлектрических каналах наблюдается генерация электромагнитного излучения в широком диапазоне частот от радио- и светового излучения до рентгеновского. Генерация возникает за счет электрогидродинамических эффектов, связанных с контактной электризацией жидкости из-за различия во взаимодействии положительно и отрицательно заряженных ионов среды со стенками. В узких каналах заряженная жидкость при обтекании кавитационных полостей создает на границах раздела поверхностный заряд. При этом возникают условия для электрического пробоя парогазового наполнения полостей, сопровождающегося свечением и выделением тепла. При расчете различного рода технологических процессов с движением диэлектрических жидкостей по тонким диэлектрическим каналам сложной формы необходимо учитывать возможность таких явлений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-01-00157.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панкратьева И.Л., Полянский В.А. *Известия РАН. МЖТ*. 2006, (2), 3–16.
2. Touchard G. *J Electrostat*. 2001. **51–52**, 440–447.
3. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. *Кавитация*. Пер. с англ. М.: Мир, 1974. 688 с.

4. Сычев А.И. *Физика горения и взрыва*. 2003, **39**(2), 112–120.
5. Маргулис М.Н. *УФН*. 2000, **170**(3), 263–287.
6. Баранов Д.С., Бухарин Н.С., Герценштейн С.Я., Моныхов А.А. *Доклады РАН*. 2006, **406**(6), 749–752.
7. Kornilova A.A., Vysotskii V.I., Koldamasov A.I., Hyun Ik Yang, et al. *J of Surface Investigation X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2007, **1**(2), 167–171.
8. Бирюков Д.А., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А. *Письма в ЖТФ*. 2012, **38**(2), 53–57.
9. Бирюков Д.А., Власова М.И., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А. *Оптика и спектроскопия*, 2013, **114**, 5, 768–772.
10. Панкратьева И.Л., Полянский В.А. *Доклады РАН*. 2005, **403**(5), 619–622.
11. Месси Г. *Отрицательные ионы*. Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 760 с.
12. Вартанян А.А., Гогосов В.В., Полянский В.А., Полянский К.В. и др. *Известия РАН. МЖГ*. 1994, (3), 30–41.
13. Прибылов В.Н. *Коллоидный журнал*. 1996, **58**(4), 524–527.

Поступила 09.11.16

Summary

The paper presents the results of experimental and theoretical studies of flows of a weakly conducting liquid in a narrow coaxial channel with dielectric walls, in which the liquid is glowing. It has been experimentally shown that in addition to visible light radiation, there is also electromagnetic radiation in the radio range and X-ray radiation. Various physical mechanisms that can cause these phenomena are discussed. It is assumed that the main cause of the observed phenomena is associated with electrization of the liquid during its flow in a channel of a complex shape. The results of calculations of electrization in the framework of the electro-hydrodynamic two-ion model of the medium are given, taking into account the electrochemical processes at the interfaces and convective charge transfer with the formation of strong induced electric fields near the walls.

Keywords: electromagnetic radiation, electrization, cavitation phenomena, weakly conducting liquid.