

УДК 543.8+541.13

М. А. Маргулис, В. Н. Пильгунов

## МЕХАНИЗМ СВЕЧЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ТЕЧЕНИИ В УЗКИХ КАНАЛАХ

*Обнаружено сине-фиолетовое свечение в минеральном масле при прокачке его через узкий канал при давлении на входе более 2 МПа, а также возникновение электрических импульсов при протекании диэлектрической жидкости через тонкое проходное отверстие задолго до появления свечения. Разработано устройство, позволяющее непрерывно сканировать электрический потенциал вдоль оси потока без его возмущения. Выявлено, что электрический сигнал высокочастотный, он не может быть синхронизирован, и отдельные импульсы имеют амплитуду 1000 мВ и более. При повышении температуры жидкости до 30...35 °С или при повышении давления подпора поток светового излучения уменьшается. Обнаружен гистерезис процесса излучения света при гидродинамической люминесценции. Предложен механизм обнаруженных явлений, основанный на значительной роли электрокинетических процессов; получены уравнения для тока заряджения и тока проводимости; рассчитаны стационарный электрический заряд, потенциал и напряженность на внутренней поверхности проходного сечения. Показано, что электрический заряд образуется не только при возникновении гидродинамической кавитации, но и при работе ламинарного дросселирующего устройства, когда в жидкости вообще не развивается кавитация; этот случай также может быть описан электрокинетическим механизмом. Показано, что электрический заряд образуется при дросселирующем устройстве, изготовленном не только из пластмассы, но и из металла.*

**E-mail:** [margulis@akin.ru](mailto:margulis@akin.ru); [margulisma@mail.ru](mailto:margulisma@mail.ru)

**Ключевые слова:** электрокинетические явления, диэлектрическая жидкость, световое излучение, гидродинамическая люминесценция.

В высокоскоростных потоках жидкости может происходить концентрация энергии, при которой возникают локальные потоки с кинетической энергией, значительно превышающей средние по потоку значения энергии [1]. Возникновение световых вспышек при прохождении высокоскоростным потоком препятствия или трубы Вентури впервые наблюдали Константинов [2], а затем Питерсон и Андерсон [3]. Авторы объясняли наблюдаемые эффекты возникновением гидродинамической кавитации, однако им не удалось установить область, откуда происходит эмиссия света, и оставалось полагать, что свечение происходит в виде вспышек из некоторых случайных точек гидродинамического потока. Так как свечение очень слабое и оно возникает в

различных точках потока, быстро изменяющихся во времени, поэтому свечение при гидродинамической кавитации — чрезвычайно сложный объект исследования. Хотя свечение из жидкости при гидродинамической кавитации и не имеет прямого отношения к звуковым колебаниям, его часто называют сонолюминесценцией. В соответствии с природой процессов, приводящих к возникновению описанного светового излучения, целесообразно называть его гидродинамической люминесценцией (ГЛ) по аналогии с фотолюминесценцией, ультразвуковой люминесценцией и т.д. Вследствие экспериментальных трудностей при исследовании ГЛ, работ в этой области сравнительно немного.

Локализацию гидродинамической люминесценции обнаружили авторы работы [4]. Они установили, что при высокоскоростном обтекании препятствия возникает свечение, которое локализуется в сравнительно узкой полосе турбулентного потока. Например, при скорости набегающего потока воды 24 м/с и среднем статистическом “времени жизни” кавитационного пузырька  $19 \pm 2$  мс максимум эмиссии света фиксируется на расстоянии 150 мм от центра препятствия. Свечение наблюдалось из полосы шириной около 50 мм, и максимум ГЛ обнаружен раньше момента максимального сжатия “среднестатистического” кавитационного пузырька. Открытие локализованной сонолюминесценции, которая излучается одним пульсирующим пузырьком [5], привлекло внимание многих исследователей.

Следует отметить, что в работах [6–8] приведены результаты независимых экспериментов в различных условиях, но общим в них является наблюдение некоего “светящегося образования”. Однако, несмотря на большой научный интерес, систематическое экспериментальное и теоретическое обоснование этого эффекта отсутствует.

Задачей данной работы состоит в исследовании физических и физико-химических эффектов, возникающих при работе гидродинамической установки.

**Постановка экспериментов.** Схема установки, на которой проводились эксперименты, представлена на рис. 1. Минеральное масло марки Шелл вязкостью  $\nu_{60} = 20$  сСт из бака 1 емкостью 40 л насосом 2 подается в дросселирующее устройство 3 из прозрачного полированного оргстекла, а из него возвращается в бак 1. Давление на входе в дроссель регулируется вентилем 4. Цифровая видеокамера регистрирует ГЛ с частотой кадров 50...2000 с<sup>-1</sup> в отраженном или проходящем свете и при очень слабом освещении. Диаметр цилиндрического проходного отверстия 1 мм. Отношение длины узкой части проходного отверстия к его внутреннему диаметру 0,5. Таким образом, дросселирующее устройство, по сути, аналогично шайбе.

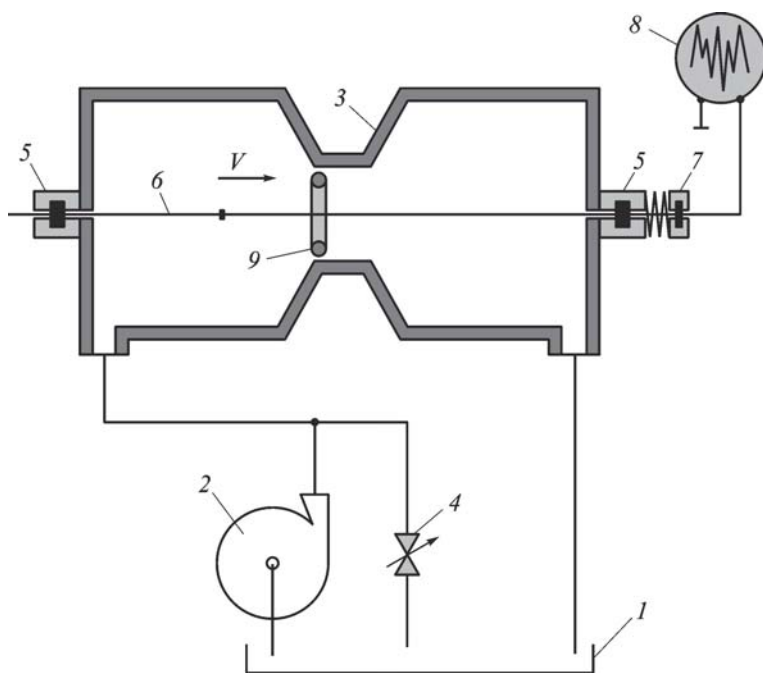


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В целях выяснения роли электрических эффектов проводилась непрерывная регистрация электрического потенциала в жидкости. Для этого через фторопластовые изолирующие втулки 5, установленные по центру потока, протянута струна из нихромового эмалированного провода 6 диаметром 0,05 мм, которая поддерживалась в натянутом состоянии посредством тяги 7 (см. рис. 1). Локальная зачистка тонкой полосы эмаливой изоляции струны длиной около 0,1 мм образовывала “метку”, с помощью которой измерялось перемещение места электрического контакта струны и обеспечивался электрический контакт с жидкостью. Линейное положение “метки” определялось с точностью  $\sim 0,1$  мм. Электрический потенциал в отдельных сечениях потока, зондируемый зачищенной поверхностью изолированной струны, регистрировался электронным осциллографом С1-83 8 с разверткой 1 мкс/деление и чувствительностью 1 мВ/деление. Таким образом, струна не возмущала поток жидкости, она не касалась стенки проходного отверстия и при перемещении ее вдоль оси потока осуществлялось непрерывное сканирование электрического потенциала, который мог возникать в жидкости. Специальное демпфирующее устройство предотвращало возникновение колебаний струны.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** При работе гидродинамической установки было обнаружено сине-фиолетовое свечение в минеральном масле, возникающее в проходном отверстии

диаметром 1 мм в прозрачном дросселирующем устройстве при давлении на входе более 2 МПа, которое из неподвижного локализованного малого объема было достаточно интенсивным и его можно было наблюдать не адаптированным к темноте глазом в незатемненной комнате. В связи с этим обнаруженный эффект может явиться уникальным объектом для всестороннего исследования гидродинамической кавитации, сонолюминесценции и других процессов. Достаточно отметить, что открытие однопузырьковой кавитации [5], при которой единственный кавитационный пузырек пульсировал и излучал свет в фиксированном малом объеме кавитационного поля (однопузырьковая сонолюминесценция), привлекло к этому объекту пристальное внимание многочисленных исследователей.

Существенным результатом данной работы является обнаружение возникающего электрического потенциала при протекании диэлектрической жидкости через тонкое проходное отверстие. Обнаружены многочисленные электрические импульсы, которые возникали задолго до появления свечения.

При увеличении давления перед дросселирующим устройством до 1,5 МПа у входа в проходное отверстие образовывался весьма тонкий слой микропузырьков, локализованных на внутренней поверхности проходного сечения. При дальнейшем увеличении давления перед дросселем до 2 МПа непосредственно у входа в проходное отверстие возникали кратковременные вспышки света, а затем при постепенном повышении давления в системе в узкой входной полосе 9 (см. рис. 1) проходного отверстия устанавливалась непрерывная ГЛ. Наблюдения при ускоренной видеосъемке показали, что непрерывная ГЛ состоит из серии многочисленных вспышек. При пропускании с большой скоростью (порядка 100 м/с) потока минерального масла через дросселирующее устройство в масле возникали гидродинамическая кавитация и электрические импульсы, а при повышении расхода — свечение в видимой области. Электрические импульсы возникали до начала эмиссии светового излучения при значительно меньших скоростях потока и не только при использовании пластмассового дросселя, но и при использовании металлического дросселирующего устройства, а также просто при прокачке жидкости без дросселя.

При пропускании потока масла через дросселирующее устройство происходила гидродинамическая кавитация, а при дальнейшем повышении давления — локализованное сине-фиолетовое свечение из жидкости (в видимой области спектра). Свечение из начальной зоны дроссельной щели — микроскопической тороидальной области общим объемом менее  $0,08 \text{ мм}^3$  — оказалось достаточно интенсивным, причем

его интенсивность сильно зависела от многих, часто не вполне ясных факторов. Можно отметить основные этапы происходящих процессов.

1. При пропускании через дросселирующее устройство потока масла под давлением до 1 МПа никаких видимых изменений не происходит и жидкость остается прозрачной. Однако еще до момента наступления кавитации регистрируются электрические импульсы небольшой амплитуды. Дальнейшее повышение давления сопровождается увеличением амплитуды электрических импульсов и повышением их частоты.

2. При повышении давления перед дросселирующим устройством до 1,5 МПа непосредственно у входа в проходное отверстие образуется весьма тонкий слой микропузырьков, локализованных на внутренней поверхности проходного сечения (присоединенная кавитация). Этот слой кавитационных пузырьков на фотографии в проходящем свете виден как тонкая черная полоска. Диаметр пузырьков не превышает 0,05 мм, а длина тороидального кольца пузырьков — не более 0,1 мм.

3. При повышении давления перед дросселирующим устройством до 2 МПа непосредственно у входа внутри проходного отверстия отмечены кратковременные (длительностью 1–2 с) вспышки синевато-фиолетового свечения ГЛ. Длина светящегося кольца ГЛ не более 0,15 мм, т.е. 30% от всей длины проходного отверстия. На выходе из отверстия развивается “факел” кавитационных пузырьков, постепенно заполняющий всю правую (выходную) камеру дросселирующего устройства (рис. 2), но эта часть кавитационных пузырьков никогда не инициировала ГЛ.

4. По мере повышения давления перед кюветой до 2,5 МПа частота вспышек ГЛ увеличивается, а при достижении давления 3...3,5 МПа



**Рис. 2.** Фотография дросселирующего устройства и развитие “факела” кавитационных пузырьков в приемной камере дросселирующего устройства



**Рис. 3. Фотография свечения ГЛ, возникающего в трансформаторном масле**

ГЛ свечение становится непрерывным, устойчивым, и дальнейшее повышение давления лишь ненамного увеличивает его интенсивность. При наблюдении процесса в замедленном режиме (изображений, полученных при скоростной видеосъемке) видно, что ГЛ не является непрерывным свечением, а осуществляется частыми несинхронизированными, случайными вспышками. Наблюдаемое свечение локализовано в узкой тороидальной области (рис. 3). После достижения давления 3 МПа наблюдается постепенное сближение присоединенной кавитации (в сужении дросселя) с “факелом” кавитационных пузырьков в выходной части дросселирующего устройства (развитие суперкавитации), причем присоединенная кавитация и “факел” пузырьков пространственно разделены. При установлении режима суперкавитации, когда “факел” кавитационных пузырьков заполняет всю выпускную область дроссельного устройства и смыкается с областью присоединенной кавитации, свечение по непонятным причинам внезапно прекращается, несмотря на высокое давление в системе. Существенно то, что даже при максимальном давлении (4... 5 МПа) поток масла в центральной области проходного сечения кюветы остается прозрачным и свободным от пузырьков.

5. При постепенном снижении давления до 2 МПа в левой входной камере дросселирующего устройства интенсивность свечения постепенно уменьшается, однако остается устойчивым даже при давлениях, при которых в начале работы возникали очень редкие вспышки свечения. Таким образом, при изучении ГЛ обнаруживается гистерезис процесса световых вспышек (рис. 4). Свечение начинается при более высоких перепадах давления в дросселирующем устройстве и остается стабильным до более низких давлений. Это можно объяснить

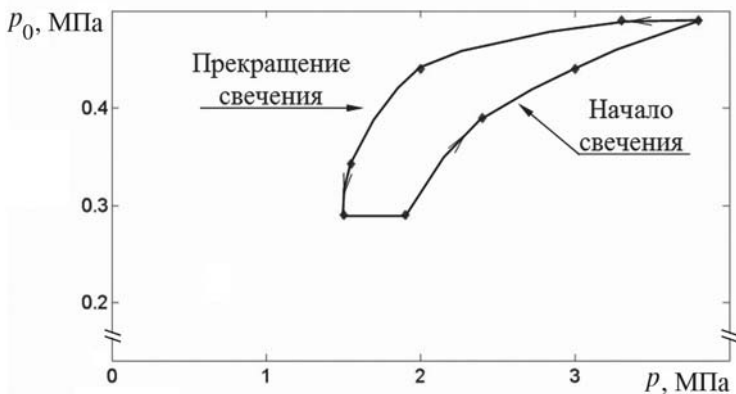
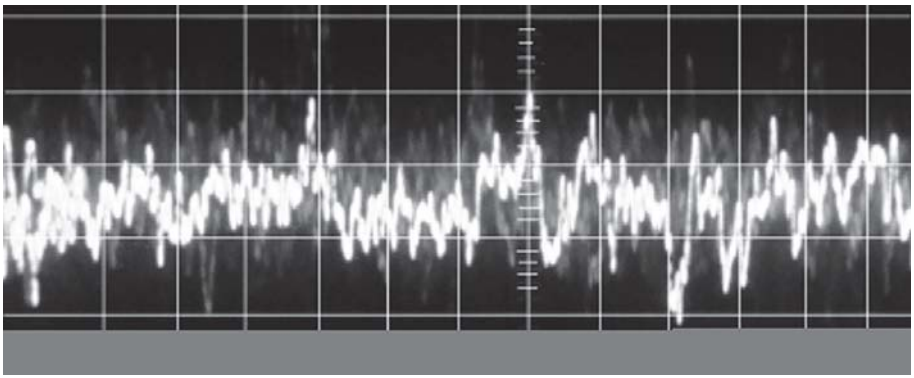


Рис. 4. Гистерезис свечения ГЛ (начало и прекращение эмиссии света соответствует различным давлениям в системе)

тем, что в процессе перекачки масла образовавшиеся в результате кавитации микропузырьки, которые являются зародышами кавитации, не успевают полностью удаляться из системы. Масло, содержащее большое число достаточно устойчивых микропузырьков, естественно характеризуется меньшей кавитационной прочностью. При циркуляции масла в результате его попадания на входное сечение проходного отверстия возникает гидродинамическая кавитация при меньших растягивающих напряжениях.

При движении жидкости с большой скоростью через впускную камеру перед входным сечением проходного отверстия дросселирующего устройства в соответствии с уравнением Бернулли происходит локальное понижение давления, осуществляется отрыв потока [9] от входной кромки проходного отверстия и под некоторым углом к проходному отверстию возникает поверхность раздела и так называемая присоединенная кавитация. Твердая поверхность, ограничивающая поток, хорошо смачивается жидкостью, надежно удерживает микропузырьки в начальной зоне кавитации непосредственно на поверхности и обеспечивает их постепенный рост до критического размера. После этого они отрываются от поверхности и уносятся потоком жидкости. Проведенные эксперименты показали, что по мере повышения температуры до 30...35°C или при повышении давления в приемной камере (давления подпора) поток ГЛ, как и следовало ожидать, уменьшался. При 50°C зарегистрировать свечение не удалось. Это показывает, что многие закономерности, характерные для исследуемых процессов, во многом аналогичны соответствующим зависимостям для сонолюминесценции [1].

Электрические импульсы возникают уже при сравнительно небольших скоростях течения жидкости, при которых заведомо отсутствует ГЛ. По мере увеличения расхода масла амплитуда и частота сигнала



**Рис. 5. Осциллограммы электрических импульсов, возникающих при течении минерального масла в тонком канале при давлении 4,8 МПа (чувствительность по шкале  $x$  — 1 мс/деление, по шкале  $y$  — 20 мВ/деление)**

возрастают. Согласно полученным осциллограммам (рис. 5), электрический сигнал — высокочастотный. Контрольные эксперименты показали, что при остановке потока жидкости при постоянном давлении около 0,1 МПа потенциал сразу же уменьшается до нуля. Спектр частот электродинамических процессов, вызванных движением жидкости через малое отверстие, имеет нижнюю границу частот на уровне 3 кГц с размахом сигнала (удвоенной амплитудой) от 10 до 1000 мВ.

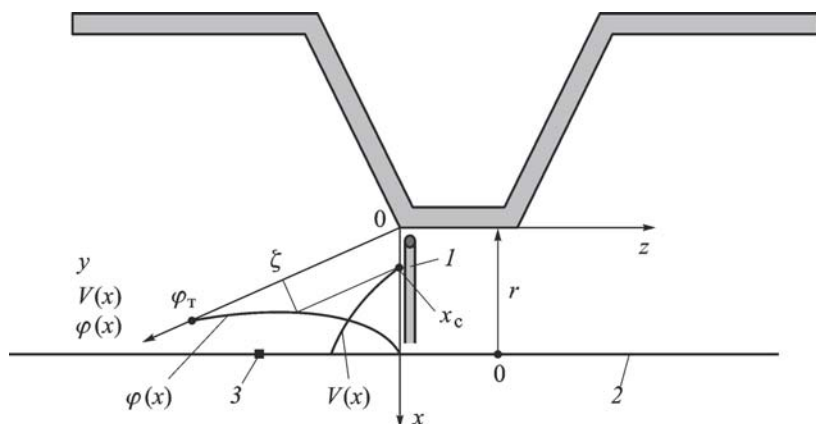
Попробуем объяснить наблюдаемое излучение света и возникновение электрических импульсов. Свечение наблюдается в области максимальной скорости потока и, следовательно, пониженного давления, но не в области, куда перемещаются и где сжимаются (или даже схлопываются) кавитационные пузырьки (рис. 2). Поэтому невозможно объяснить полученные экспериментальные результаты в рамках тепловой теории кавитации [10] или каких-либо ее модификаций. Как известно, согласно тепловой теории, свечение возникает в результате нагревания парогазовой смеси в кавитационном пузырьке при его схлопывании. Так как “факел” является областью возможного схлопывания пузырьков и он пространственно отделен от области свечения (ГЛ никогда не наблюдалась в области факела), наблюдаемые эффекты не связаны с возможными термическими процессами, обусловленными гидродинамической кавитацией. Для объяснения всего объема наблюдаемых экспериментальных фактов необходимо привлекать иные представления, связанные, по нашему мнению, со значительной ролью электрокинетических явлений [1, 11]. Электрический потенциал возникает при сравнительно небольших скоростях течения жидкости, при которых заведомо отсутствует кавитация и ГЛ.

При движении жидкости с большой скоростью через впускную камеру диаметром 6 мм перед входным сечением проходного отверстия



дрессельного устройства диаметром 1 мм на внутренней поверхности проходного отверстия в жидкости образуется двойной электрический слой вследствие двух эффектов — ориентационного и примесного. При ориентационном механизме молекулы, имеющие ненулевой дипольный момент, располагаются на поверхности раздела фаз преимущественно одним концом в сторону жидкой фазы. Примесный механизм обусловлен тем, что некоторые ионы примеси адсорбируются преимущественно вблизи поверхности раздела. Ионы примесей могут присутствовать в столь ничтожном количестве (порядка  $10^8 \text{ см}^{-3}$ ), что практически не влияют на физико-химические свойства растворителя, но тем не менее они активно участвуют в образовании двойного электрического слоя и, следовательно, в формировании поверхностного заряда [11]. Как известно, образование двойного электрического слоя у поверхности раздела фаз является общим свойством жидкостей.

Твердая поверхность раздела имеет электрический потенциал, равный термодинамическому  $\varphi_T$  (рис. 6). Можно условно выделить близкую к поверхности плотную часть двойного электрического слоя толщиной порядка нескольких диаметров молекулы жидкости и более удаленную диффузную часть [12], где адсорбционными силами можно пренебречь, а ионы могут свободно перемещаться в жидкости (см. рис. 6). Рассмотрим движение жидкости в системе координат, в которой ось  $x$  направлена нормально к поверхности проходного сечения в сторону жидкости, ось  $z$  — в направлении движения жидкости,  $y$  — по направлению касательной к проходному сечению дроссельного устройства. При  $x < x_c$  ( $x_c$  — граница скольжения) заряды могут перемещаться только вместе с поверхностным слоем; именно они образуют на поверхности раздела жидкости с твердым телом (после “смывания”



**Рис. 6. Схема дроссельного устройства в разрезе, поясняющая возникновение свечения, а также образование поверхностного потенциала и распределение скоростей потока в проходном сечении:**

*1* — светящийся тор; *2* — струна в изолирующей оболочке; *3* — сканирующая метка

диффузного слоя) нескомпенсированный электрический заряд на внутренней поверхности проходного отверстия. Такой же нескомпенсированный заряд противоположного знака, естественно, присутствует в жидкости. Потенциал в жидкости на расстоянии  $x_c$  от поверхности раздела фаз (см. рис. 6) обычно называется электрокинетическим  $\zeta$ -потенциалом.

Учитывая, что координата границы скольжения  $x_c \ll r$ , поверхность раздела фаз можно рассматривать как плоскую и распределение плотности заряда  $\rho_{el}$  в жидкости с высокой точностью описывать одномерным уравнением Пуассона

$$\rho_{el} = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — электрический потенциал;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость жидкости;  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная. Распределение скорости потока в ньютоновской жидкости у внутренней поверхности проходного отверстия описывается формулой

$$v(x) = F_N(x - x_c) / (2\pi r l \mu), \quad (2)$$

где  $F_N(x)$  — ньютоновская сила, возникающая вследствие движения слоев вязкой жидкости со скоростью  $v(x)$ ;  $r$  и  $l$  — радиус и длина проходного отверстия соответственно;  $\mu$  — вязкость. Вблизи твердой поверхности при  $x \approx x_c$  поток жидкости можно рассматривать как ламинарный; при этом  $dv/dx = \text{const}$  и сила  $F_N$  постоянна.

*Ток заряджения* (количество электричества, переносимое в единицу времени через поверхность раздела фаз) можно представить в виде

$$I = \iint_S v(x) \rho_{el}(x) dx dy, \quad (3)$$

где  $S$  — площадь сечения потока жидкости. Подставляя выражения (1) и (2) в формулу (3), получаем выражение для тока заряджения внутренней стенки проходного отверстия в виде [11]

$$I = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0 F_N}{2\pi r l \mu} \int_{0 \dots 2\pi r} dy \int_{x_c}^{\infty} x \frac{d^2 \varphi}{dx^2} dx = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 F_N \zeta}{\mu l}. \quad (4)$$

При последнем преобразовании учтено, что интеграл в пределах от  $x_c$  до  $\infty$  соответствует электрокинетическому  $\zeta$ -потенциалу (в данном случае верхний предел интегрирования — радиус проходного отверстия  $r$ ). В условиях проводимых экспериментов для потока жидкости, “смывающего” диффузную часть двойного электрического слоя, мож-

но записать следующее условие баланса сил

$$F_N = \frac{2\pi r l \mu v(x)}{x - x_c} = -\pi r^2 p,$$

где  $p$  — давление, приложенное к входному сечению дросселирующего устройства. Для многих систем  $\zeta$ -потенциал отрицателен ( $\zeta < 0$ ) и, кроме того, он может менять знак. Поэтому для простоты опустим знаки перед множителями  $\pi r^2 p$  и  $\zeta$ . Таким образом, после подстановки  $F_N$  в формулу (4) получаем выражение для тока заряжения

$$I = \frac{\pi \varepsilon \varepsilon_0 r^2 p \zeta}{\mu l}. \quad (5)$$

Баланс нескомпенсированного заряда в проходном сечении дросселирующего устройства описывается уравнением

$$dQ/dt = I - i, \quad (6)$$

где  $i$  — ток проводимости. Заметим, что в (6) и последующих уравнениях не используются каких-либо кавитационные параметры потока жидкости в дросселе. Поэтому их можно применять как в докавитационном, так и в кавитационном режимах. Считая электрический потенциал на внутренней поверхности стенки равным [11]

$$U = \frac{\sigma}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0} \int_0^l \frac{2\pi r dl}{r} = \frac{\sigma 2\pi r l}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 r} = \frac{Q}{2\pi \varepsilon \varepsilon_0 r}, \quad (7)$$

а электропроводность  $R_3 = \frac{\lambda_0}{2\pi r}$ , в соответствии с законом Ома получаем формулу для тока проводимости

$$i = \frac{Q}{\varepsilon \varepsilon_0 \lambda_0}, \quad (8)$$

где  $\lambda_0$  — коэффициент электрического сопротивления жидкости;  $\sigma$  — плотность заряда на стенке проходного сечения кюветы. Пренебрегая пульсациями потока и считая, что скорость потока жидкости через дросселирующее устройство постоянна, (т.е. от времени  $t$  зависит только заряд  $Q$ ), можно составить следующее дифференциальное уравнение баланса электрического заряда  $Q(t)$ , возникающего при течении жидкости через узкий канал:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\pi \varepsilon \varepsilon_0 r^2 p \zeta}{\mu l} - \frac{Q}{\varepsilon \varepsilon_0 \lambda_0}. \quad (9)$$

Формулу, описывающую накопление заряда, получаем в результате

интегрирования соотношения (9):

$$Q = \frac{\pi \varepsilon^2 \varepsilon_0^2 r^2 p \lambda_0 \zeta}{\mu l} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0 \lambda_0} t \right) \right]. \quad (10)$$

Для стационарных условий решение уравнения (10), когда  $t \rightarrow \infty$  и  $dQ(t)/dt \rightarrow 0$ , получаем следующую формулу для накапливаемого стационарного заряда:

$$Q(\infty) = \frac{\pi \varepsilon^2 \varepsilon_0^2 r^2 p \lambda_0 \zeta}{\mu l}. \quad (11)$$

Полученное решение позволяет определить основные зависимости для накапливаемого электрического заряда и, соответственно, интенсивности гидродинамической люминесценции, согласно предлагаемой модели процесса, от основных экспериментальных параметров. Нормальная напряженность электрического поля непосредственно вблизи стенки проходного отверстия равна

$$E_n = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r l}. \quad (12)$$

Рассчитаем стационарный заряд, накапливающийся на внутренней поверхности проходного отверстия при следующих параметрах эксперимента:  $r = 5 \cdot 10^{-4}$  м;  $l = 5 \cdot 10^{-4}$  м;  $p = 4$  МПа = 40 бар;  $\lambda_0 = 10^{10}$  Ом·м;  $\zeta = 1$  В;  $\mu = 200$  Н·с/м<sup>2</sup>. После подстановки их в формулу (11) получим  $Q(\infty) = 2,1 \cdot 10^{-10}$  Кл. Этот стационарный заряд достаточно велик. Ему соответствует высокая стационарная плотность заряда  $\sigma = 2,5 \cdot 10^{-2}$  Кл·м<sup>-2</sup>.

Экспериментальные результаты подтверждают полученную зависимость значений интенсивности свечения и локального электрического заряда от основных параметров: они повышаются при увеличении давления  $p$ , электрического сопротивления  $\lambda_0$  и  $\zeta$ -потенциала, а также при уменьшении вязкости, длины проходного отверстия  $l$  и т.д. Кроме того, можно учесть, что заряд преимущественно располагается на начальном участке проходного отверстия дроссельного устройства. При указанных параметрах коэффициент затухания в квадратных скобках формулы (10) равен  $0,37 \text{ с}^{-1}$ . Поэтому за время  $\approx 2,7$  с вследствие стекания образующегося электрического заряда за счет электропроводности, в соответствии с формулой (10), заряд уменьшается в  $e$  раз. За это время с высокой долей вероятности осуществляется электрический пробой кавитационного пузырька и соответственно наблюдается свечение в видимой области.

Время развития электрического пробоя можно оценить из уравнения движения электрона массой  $m_e$  под действием постоянной электрической силы ( $-eE_{кр}$ ), причем его скорость изменяется на длине

свободного пробега  $\lambda$  от 0 до  $eE\tau/m_e$ , где  $\tau$  — время между соударениями электронов. Таким образом, характерное время для возникновения электрического пробоя [13] равно

$$\tau_{пр} \sim 10\tau \approx 10 \sqrt{\frac{2m_e\lambda}{eE_{кр}}}.$$

При  $\lambda = 10^{-7}$  м и  $E_{кр} = 3 \cdot 10^6$  В·м<sup>-1</sup> получим  $\tau_{пр} \sim 10^{-11}$  с. Согласно формуле (13), при уменьшении электропроводности  $\lambda_0$  уменьшается заряд  $Q$  и время релаксации заряда вследствие возрастания тока проводимости. Характерное время электрического пробоя оказывается значительно меньше времени релаксации заряда в результате электропроводности даже при малом удельном сопротивлении жидкости. Поэтому электропроводность может вызывать релаксацию заряда  $Q$  только в случае, если электрический пробой по какой-либо причине не произойдет. Полученный результат (формулы (11), (12)) позволяет понять причину образования и оценить величину локальных электрических зарядов в жидкости, даже без возникновения кавитации, электрических пробоев и свечения.

*Нормальную напряженность* электрического поля непосредственно вблизи стенки проходного отверстия можно рассчитать по формуле (12) — получим  $E_n = 1,5 \cdot 10^7$  В·м<sup>-1</sup>. Это значение меньше критической напряженности для использованного в наших экспериментах трансформаторного масла ( $E_{кр} = 2,5 \cdot 10^7$  В·м<sup>-1</sup>). Развивающаяся внутри канала напряженность электрического поля, создаваемая высокоскоростным потоком жидкости при указанных параметрах, не может обеспечить пробой однородной жидкости. Однако при возникновении кавитации возможен пробой “слабых” участков жидкости — кавитационных пузырьков, большое число которых образуется в минеральном масле. При создании кавитации в проходном сечении дросселя образуются микропузырьки, заполненные паровоздушной смесью [1], и их пробивная напряженность  $E_{кр}$  значительно ниже, чем критическая напряженность для чистого трансформаторного масла.

*Критическая напряженность* электрического поля в парогазовом кавитационном пузырьке  $E_{кр}$  зависит от природы газа, давления в пузырьке  $p = p_g + p_v$ , температуры в газовой фазе  $T_r$ , влажности  $\delta_0$  (или  $p_s$ ) и т.д. Согласно общим соотношениям [11, 14], эту зависимость можно выразить формулой

$$E_{кр} = E_{кр}^0 \frac{(p/p_H)^m (T_r/T_H)^n}{K_\delta}, \quad (13)$$

где  $p_g$  и  $p_v$  — парциальные давления газа и паров жидкости.

В рассматриваемых условиях  $K_\delta \sim 0,9$ ; коэффициенты  $m = n = 1$ ,  $E_{кр}^0$  соответствует “нормальным” условиям проведения эксперимента:

давлению  $p_n = 1$  атм, температуре  $T_n \sim 293$  К и абсолютной влажности воздуха  $\delta_0 = 11 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$  (при этом  $E_{\text{кр}}^0 \sim 3 \cdot 10^6 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$ , а длина свободного пробега  $\lambda = 8 \cdot 10^{-8}$  м). Величина  $E_{\text{кр}}$  пропорциональна давлению, и при 2...5 МПа она достаточно велика. Для возникновения пробоя необходимо соблюдение условия  $E_n > E_{\text{кр}}$ . Длина свободного пробега электрона  $\lambda$  должна быть много меньше радиусов пузырьков и при этом выполняется еще одно условие для возникновения лавинной ионизации внутри пузырька:

$$\lambda \ll r_i, \quad (14)$$

где  $r_i$  — радиус  $i$ -го кавитационного микропузырька.

Согласно полученным экспериментальным результатам, электрический заряд образуется не только при возникновении гидродинамической кавитации, но и при работе ламинарного дросселирующего устройства, когда длина сужения достигает 20 мм и в жидкости вообще не развивается кавитация. В этом случае также применимы электрокинетический механизм и, соответственно, полученные уравнения и решения. Согласно экспериментальным и теоретическим результатам, полученным в данной работе, вклад электрических явлений значительно превосходит влияние возможных тепловых механизмов.

Учитывая, что на внутренней поверхности проходного отверстия образуется большое число мелких пузырьков, которые достаточно прочно связаны с твердой поверхностью, при возникновении свечения электрический пробой в проведенных экспериментах должен осуществляться именно внутри этих пузырьков малого размера, прочность которых при электрическом пробое значительно меньше, чем прочность на пробой однородной жидкости.

Таким образом, дросселирующее устройство оказалась первым объектом, в котором удалось зарегистрировать не только вспышечное свечение в видимой области спектра, но и сопровождающее его образование электрических зарядов, и поэтому оно оказалось первой доступной и воспроизводимой моделью расщепляющегося кавитационного пузырька и, соответственно, сонолюминесценции. Проведенный анализ показал, что ГЛ имеет много общих черт с сонолюминесценцией [1] и механизм этих явлений при определенных условиях обусловлен сходными электрокинетическими эффектами. Поэтому основные элементы теории ГЛ, возникающей в узких каналах, во многом сходны с теорией локальной электризации кавитационных пузырьков [1, 11], и эксперименты по ГЛ могут быть использованы для дополнительного обоснования основных положений этой теории. В отличие от сонолюминесценции свечение в видимой области и параметры электрических импульсов, которые получаются при течении

жидкостей через тонкие каналы, достаточно велики и могут быть измерены с высокой точностью. Существенно, что регистрация обнаруженных электрических импульсов не осложняется весьма высокой скоростью процессов и микроскопическими размерами кавитационных пузырьков в ультразвуковом поле, электрическими наводками и т.д., как при исследовании сонолюминесценции. Поэтому использованная методика может применяться для определения ряда фундаментальных параметров, характеризующих электрокинетические явления, кавитацию, сонолюминесценцию.

**Выводы.** 1. Обнаружены достаточно интенсивное сине-фиолетовое свечение и электрические импульсы в минеральном масле, возникающие при его прокачке через узкий канал.

2. Разработано устройство, позволяющее непрерывно сканировать электрический потенциал вдоль оси потока без его возмущения.

3. Показано, что электрический сигнал является высокочастотным, он не может быть синхронизирован, а отдельные импульсы могут иметь амплитуду 1000 мВ и более.

4. Показано, что при повышении температуры жидкости до 30...35°C или при повышении давления подпора поток светового излучения уменьшается.

5. Обнаружен гистерезис процесса излучения света при ГЛ.

6. Предложен механизм обнаруженных явлений, основанный на значительной роли электрокинетических процессов.

7. Получены уравнения для тока заряжения и тока проводимости. Рассчитаны стационарный электрический заряд, потенциал и напряженность на внутренней поверхности проходного сечения. Предложенный механизм и основные расчетные параметры согласуются с экспериментальными данными.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Margulis M. A. Sonochemistry and cavitation. Gordon & Breach, London, 1995. – 543 p.
2. Константинов В. А. // Докл. АН СССР. – 1947. – Т. 14. – С. 259.
3. Peterson F. B., Anderson T. P. / Phys. Fluids. – 1967. – V. 10. – P. 4.
4. Демин С. А., Вербанов В. С., Маргулис М. А. // Ж. физ. хим. – 1990. – Т. 64. – С. 3357.
5. Gaitan D. F., Crum L. A., Church C. C., Roy R. A. / J. Acoust. Soc. Amer. – 1992. – V. 91. – P. 3166.
6. Колдамасов А. И. // Материалы 4 Российской конф. по холодной трансмутации ядер. Дагомыс, Сочи, 1996. – М., 1997. – С. 225.
7. Пильгунов В. Н., Ефремова К. Д. // Сб. докл. 6 Всероссийского совещания “Инженерно-физические проблемы новой техники”. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.

8. Андреев А. П., Баранов Д. С., Молодов А. К., Покровский А. К., Суховаткин Н. Н. // Материалы 8 Российской конф. по холодной трансмутации ядер. Дагомыс, Сочи, 2001.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. – М.: ГИТТЛ, 1953.
10. N e r p i r a s E. A., N o l t i n g k B. E. / Proc. Phys. Soc. – 1950. – V. 63B. – P. 74.
11. M a r g u l i s M. A. // Успехи физич. наук. – 2000. – Т. 170, № 3. – С. 263.
12. В о ю ц к и й С. С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1964. – С. 574.
13. M a r g u l i s M. A., M a r g u l i s I. M. Ultrasonics–Sonochemistry. – 2002. – V. 9. – P. 1.
14. Б о р т н и к И. М., В е р е щ а г и н И. П., В е р ш и н и н Ю. Н. Электрофизические основы техники высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – С. 438.

Статья поступила в редакцию 27.04.2009

Миля Аркадьевич Маргулис родился в 1937 г., окончил Московский химико-технологический институт им. Д.И. Менделеева. Д-р хим. наук, главный научный сотрудник Акустического института, профессор кафедры “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 350 научных работ, 3 монографий, 50 патентов и авторских свидетельств в области химии высоких энергий, кавитации, сонолюминесценции, звукохимии, реакций радикалов и строения вещества.



M.A. Margulis (b. 1937) graduated from the Moscow Chemical and Technological Institute n. a. D.A. Mendeleev. D. Sc. (Chem.) leading senior of Acoustic Institute, professor of "Chemistry" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 350 publications, 3 monographs, 50 patents, and author's certificates in the field of high energy chemistry, cavitation, sonoluminescence, acoustochemistry, reactions of radicals and substance structure.

Владимир Николаевич Пильгунов родился в 1941 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1964 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Гидромеханика, гидравлические машины и гидропневмоавтоматика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области гидроавтоматики.



V.N. Pil'gunov (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1964. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of "Hydromechanics, Hydraulic Machines, and Pneumatic Automatics" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications, 3 monographs, 50 patents and author's certificates in the field of hydro-automatics.