НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА

НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Светоизлучение и электрические процессы в кавитирующем потоке минерального масла

03, март 2013

DOI: 10.7463/0313.0535547

Пильгунов В. Н., Ефремова К. Д.

УДК 543.8 + 541.13

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

e10@bmstu.ru

efremova.k.d.@gmail.com

Введение.

В гидравлических устройствах автоматики в качестве запорно–регулирующих элементов широко используются различные типы дросселей: в диафрагменных и цилиндрических дросселях поток рабочей жидкости имеет ярко выраженный турбулентный характер, а в сжатом сечении большая скорость вызывает *кавитацию* и связанное с ней активное выделение пузырьков нерастворённого воздуха и пара. В зоне повышенного давления пузырьки мгновенно замыкаются, что вызывает эрозионное разрушение материала стенок канала и активные акустические процессы. Быстрое замыкание паро-газовых каверн, в соответствии с законами термодинамики, может вызвать локальное повышение температуры, а при определённых условиях и свечение жидкости. В иностранной научно-технической литературе широко используются два термина, обозначающих свечение жидкости: «sonoluminescence» (сонолюминесценция) и «light emission» (светоизлучение). Первый термин непосредственно связан с ультразвуком как причиной, вызывающей свечение жидкости; второй - предусматривает более широкий круг причин, вызывающих свечение. Первыми о сонолюминесценции в потоке жидкости сообщили в 1933 году Маринеско и Триллат [1], а несколько позже (1934 г.) Френцель и Шультес обнаружили слабое свечение в жидкости, возникавшее под действием акустических колебаний [2]. В 1964 г. Джармен и Тэйлор [3, 4] зарегистрировали слабое люминесцентное свечение воды в зоне *замыкания* кавитационных каверн в трубе Вентури. В своей диссертации Петерсон [5] в 1966 г. также отметил светоизлучение в области *замыкания* пузырьков при гидродинамической

кавитации. В процессе исследования кавитационных процессов в прозрачной модели диафрагменного дросселя авторы настоящей работы обнаружили локализованное на *входной кромке* диафрагменного дросселя устойчивое светоизлучение в голубой части цветового спектра. Яркость светоизлучения возрастала по мере увеличения скорости потока. Поскольку на момент обнаружения светоизлучения в научно-технической литературе отсутствовали сведения о свечении жидкости в области *пониженного давления*, была поставлена задача проведения дополнительных исследований с целью выяснения причин и природы светоизлучения в гидродинамических кавитирующих потоках минерального масла в узких каналах.

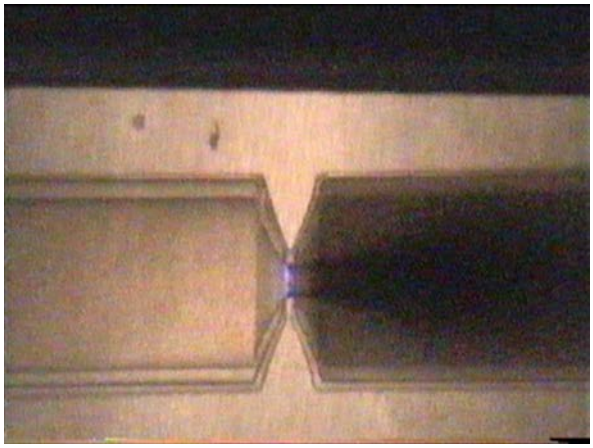
Цель исследования.

Знакомство с литературой в области теории сонолюминесценции показало, что активно рассматриваются электрическая и электрохимическая природы её появления и существования [6], поэтому выявление причин светоизлучения на входной кромке дросселя пошло в направлении определения и анализа электрических процессов в потоке диэлектрической жидкости.

В 70-х годах XX века Колдомасовым А.И. было обнаружено свечение дистиллированной воды, протекающей в узком канале [7]. Природа свечения была объяснена плазменными разрядами при кавитации воды, однако причина возникновения разрядов и источник образования плазмы были неясны. В 2004 году авторы статьи обнаружили интенсивное светоизлучение при прохождении минерального масла через диафрагменный дроссель [8]. Позднее (2007–2010 г.г.), похожие явления были обнаружены при исследовании кавитации в органических жидкостях, протекающих с высокой скоростью в узких диэлектрических каналах [9, 10, 11]. В «Центре Келдыша», начиная с 2004 года, проводились исследования кавитационных режимов скоростного течения высокоочищенной *деионизированной* воды в узких профилированных диэлектрических каналах [12]. Обнаруженное яркое свечение было локализовано в области наибольшего сужения канала диаметром 1-2 мм на удалении 2-3 мм от *входа в капилляр* трубы Вентури при движении потока со скоростью, превышающей 40 мс$^{-1}$. Свечение проявлялось в виде *искр*, проскакивающих вдоль по течению в центральной части канала. Выявление причин, вызывающих светоизлучение в кавитирующем потоке минерального масла на *входной кромке* диафрагменного дросселя, а также анализ электрических процессов в потоке диэлектрической жидкости явились целью настоящего экспериментального исследования.

Экспериментальное исследование светоизлучения и электрических процессов в кавитирующем потоке минерального масла.

В потоке минерального масла на *входной кромке* диафрагменного дросселя, изготовленного из прозрачного органического стекла, было обнаружено яркое светоизлучение в голубой части спектра (рис. 1). Фрагменты видеосъёмки этапов развития кавитационного процесса в диафрагменном дросселе, зарегистрированные цифровой камерой со скоростями съёмки 50 и 2000 кадров/с, представлены на фото рис. 2.



а) возникновение светоизлучения во входном сечении дросселя.

б) устойчивое светоизлучение во входном сечении дросселя.

Рис. 1. Светоизлучение в кавитирующем потоке минерального масла.

На рис. 2а наблюдается зарождение кавитационного тора на входной кромке дросселя, затем, по мере увеличения скорости движения жидкости, появляется кавитационный факел (рис. 2б), который, расширяясь (рис. 2в), смыкается с внутренней поверхностью отвода и определяет режим суперкавитации (рис. 2г). Необходимо отметить, что на оси канала в зоне повышенного давления сохраняется сплошность потока.

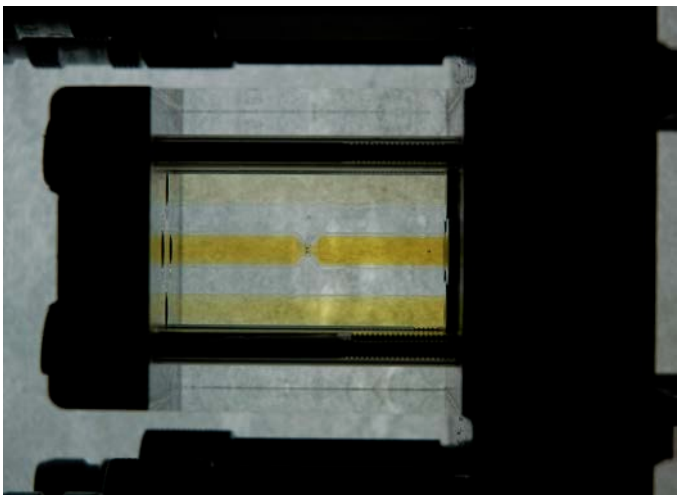


Рис .2а. Диафрагменный дроссель (зарождение кавитационного тора).

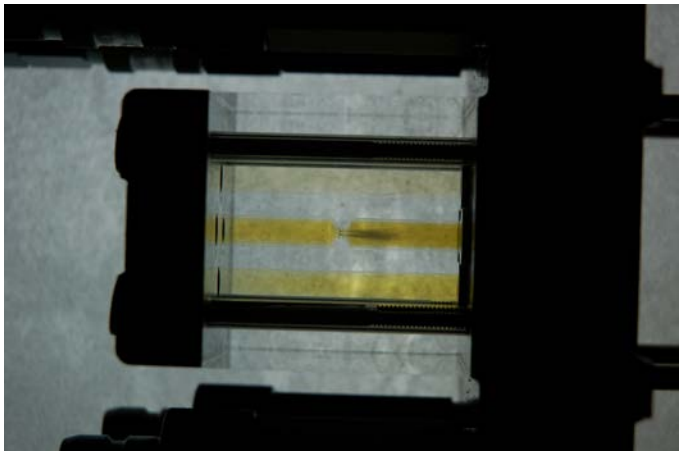


Рис. 2б. Появление кавитационного факела.

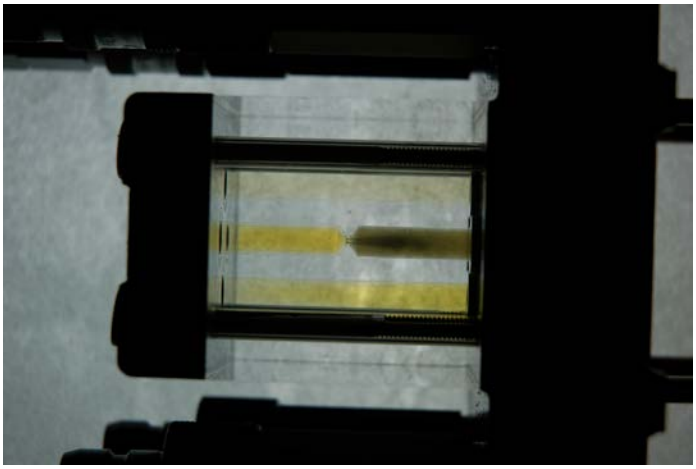


Рис. 2в. Распространение кавитационного факела в область отвода.

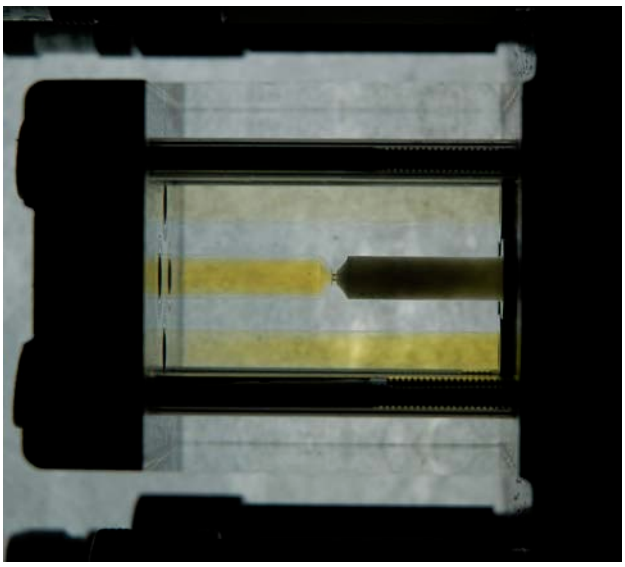


Рис. 2г. Режим суперкавитации.

Светоизлучение возникает на *входной острой кромке* дросселя в момент появления кавитационного тора, продолжается до начала режима суперкавитации и прекращается при развитой суперкавитации. Начало и окончание процесса светоизлучения определяются уровнями давлений p_1 и p_3 в подводе и в отводе дросселя, определяющими перепад давлений на дросселе $p_{др} = p_1 - p_3$ и скорость в сжатом сечении (рис. 3). Совместное решение уравнений Бернулли, записанных для сечений 1-2 и 1-3 в условиях сплошности потока в режиме зарождения кавитационного тора и при выполнении условия $p_{2абс} = p_{нп}$, где $p_{нп}$ – давление насыщенных паров масла при заданной температуре, определило условие начала кавитации в сжатом сечении дросселя:

$$p_1 - 5{,}43p_3 = 4{,}43\ (p_{ат} - p_{нп}). \qquad (1)$$

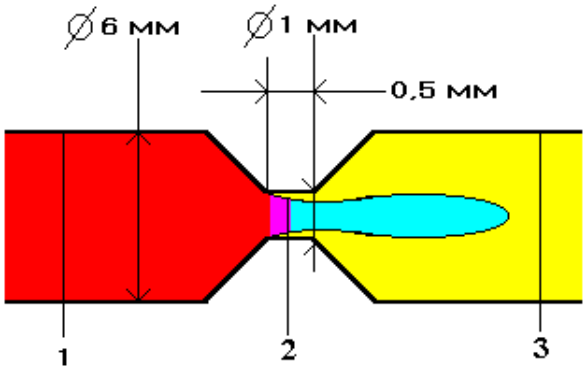


Рис. 3. Структура потока и геометрия диафрагменного дросселя

Коэффициенты уравнения (1), определяющего условие начала кавитации, получены для геометрии дросселя, представленной на рис.3, и коэффициента сжатия струи $\varepsilon = 0{,}75$.

В нагретом до 50 ^{0}С масле светоизлучение не наблюдалось. На графике рис. 4 представлена диаграмма возникновения и прекращения светоизлучения при изменении давления подпора p_3 в отводе дросселя и перепада давлений $p_{др}$ на дросселе.

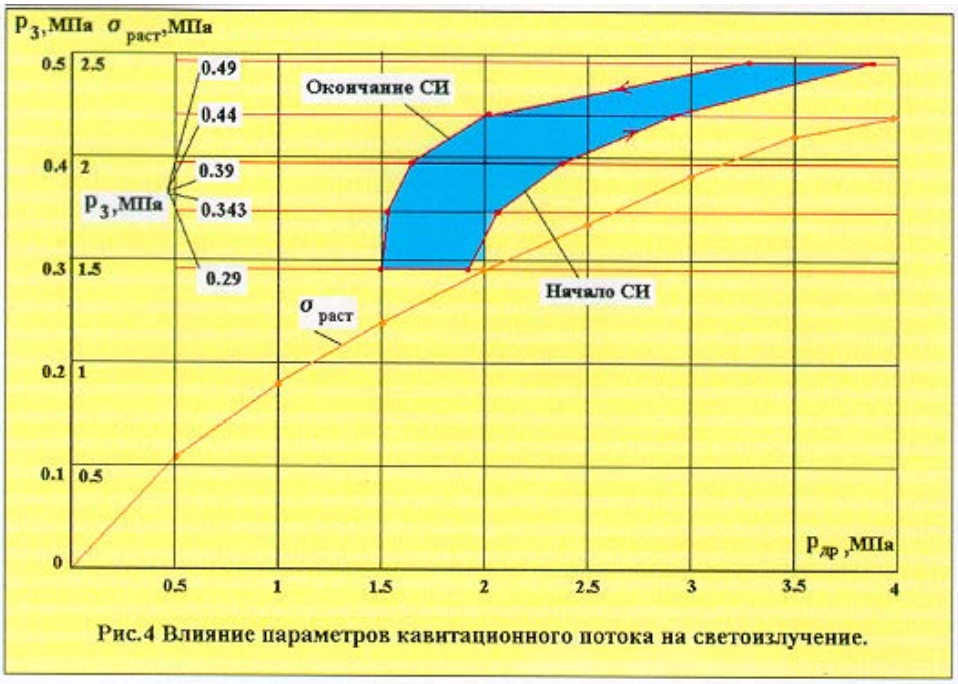


Рис. 4. Влияние параметров кавитационного потока на светоизлучение.

Горизонтальные сечения диаграммы, соответствующие заданному давлению подпора p_3 в отводе дросселя, позволяют определить уровни давления p_1 в подводе, при которых начинается и заканчивается светоизлучение: например, при давлении подпора в отводе p_3 = 0,44 МПа, светоизлучение возникает при перепаде давлений на дросселе $p_{др}$ = 2,80 МПа, что соответствует давлению в подводе p_1 = 2,36 МПа. Светоизлучение прекращается при перепаде давлений $p_{др}$ = 2,00 МПа. Из диаграммы следует, что в процессе светоизлучения присутствует гистерезис. Цифровое увеличение фотографии светящегося кольца (тора) до уровня пикселя показало, что в её условном центре симметрии цвет светоизлучения чисто белый, оставаясь ярко голубым на периферии. Первоначально исследовался кавитационный процесс в потоке свежего минерального масла фирмы «SHELL» вязкостью ν_{40} = 20 сСт. Кавитация в гидродинамическом потоке отечественного минерального масла МГЕ10 вязкостью ν_{40} = 10 сСт была более интенсивной, при этом светоизлучение не наблюдалось. Можно предположить наличие зависимости светоизлучения от свойств основы минерального масла, давления его насыщенных паров и структуры пакета корректирующих присадок. В процессе

продолжительных исследований кавитирующего потока в прозрачной модели диафрагменного дросселя интенсивность светоизлучения уменьшалась и по прошествии определённого времени светоизлучение полностью прекратилось. Замена отработавшего минерального масла на свежее не привела к возобновлению светоизлучения. В новом экземпляре модели дросселя прежней геометрии светоизлучение возобновилось в прежнем качестве и на прежних режимах потока. Это позволяет сделать заключение о зависимости интенсивности светоизлучения от остроты входной кромки дросселя, подверженной притуплению из-за абразивного износа материала стенок. Фрагмент экспериментального стенда для исследования гидродинамических процессов в дросселе представлен на рис. 5.

Рис. 5. Экспериментальный стенд для снятия характеристик дросселей.

Перепад давлений на дросселе $\Delta p = p_1 - p_2$ оценивался с учётом гидравлических потерь в быстродействующих разъёмах гибких рукавов и в подводящем и отводящем каналах дросселя. Параметры потока в диафрагменном дросселе представлены на рис. 6. При наибольшем значении перепада давлений на дросселе $\Delta p = 4$ МПа число Рейнольдса во входном сечении дросселя достигало значения $Re = 3{,}5\times10^3$, что соответствовало турбулентному режиму движения жидкости, при этом в подводе и отводе режим течения соответствовал ламинарному при числе Рейнольдса $Re = 500$. Скорости движения жидкости в подводе, в сечении дросселя и в сжатом сечении потока приняли, соответственно, значения $V_1 = 1{,}9$ м/с; $V_2 = 65$ м/с; $V_{сж} = 100$ м/с.

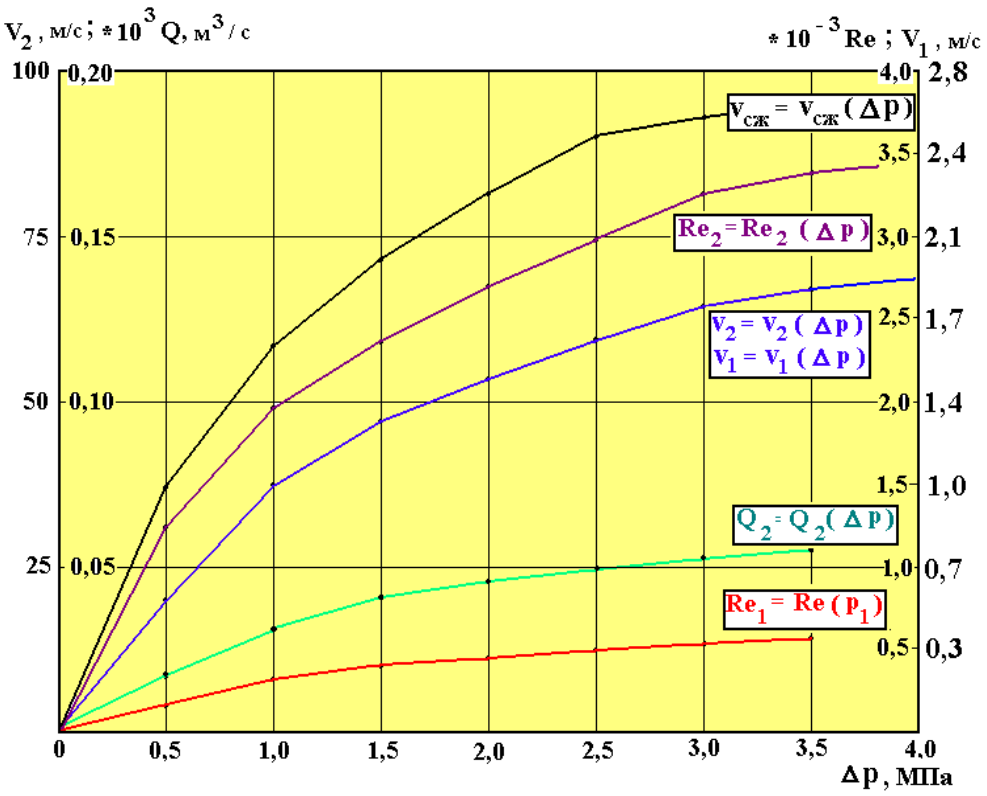


Рис. 6. Параметры потока в диафрагменном дросселе.

Сопоставление графиков рис. 4 и рис. 6 показывает, что светоизлучение возникает при скоростях потока в сжатом сечении $V_{сж} \geq 75$ м/с. Для количественной оценки электрических процессов в потоке минерального масла, вдоль оси дросселя была натянута струна, выполненная из нихромовой проволоки в эмалевой изоляции диаметром 0,05 мм (рис. 7).

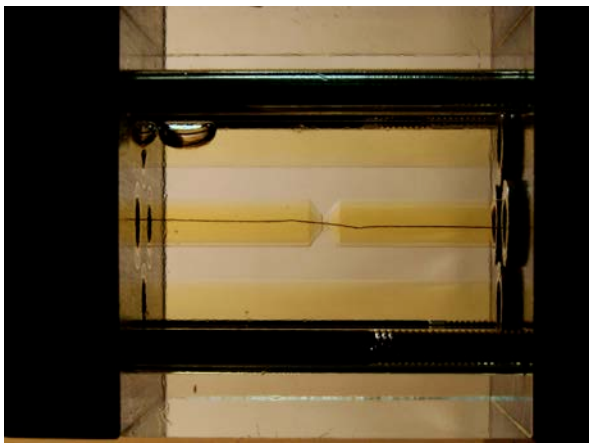


Рис. 7. Диафрагменный дроссель со струной (струна не натянута).

На струне была произведена зачистка эмалевой изоляции и получена *метка* шириной $\delta = 0{,}1$ мм, которая обеспечила зондирование электрического потенциала в

выбранном сечении потока. Натянутая струна с меткой протягивалась вдоль оси канала посредством натяжителя (рис. 8). Позиция метки на оси потока регистрировалась потенциометрическим преобразователем с разрешающей способностью 0,1 мм (рис. 8).

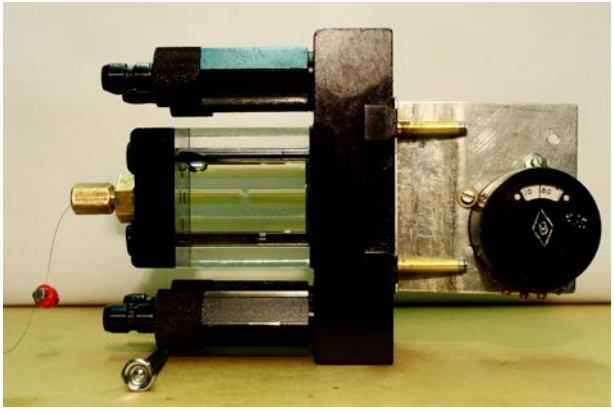


Рис. 8. Натяжитель струны и измеритель позиции метки.

Для оценки формы и размаха электрических сигналов в сечениях потока использовался электронный осциллограф С1-83 с входными сопротивлением $R_{вх}$ = 1 МОм и ёмкостью $C_{вх}$ = 35 пФ. Эксперименты показали наличие в потоке диэлектрической жидкости значительных по размаху электрических сигналов сложной формы. Изображения на экране осциллографа регистрировались цифровой фотокамерой с разрешающей способностью 8×10^6 пикселов. Формы электрических сигналов в диафрагменном дросселе, зарегистрированные осциллографом *без делителя* на его входе, представлены на рис. 9(а-с). Сечения потока, давление в подводящем канале и режимы осциллографирования на приведённых ниже фотографиях представлены в Таблице 1 (порядок нумерации осциллограмм - алфавитный по столбцам сверху вниз).

Таблица 1. Расшифровка осциллограмм.

№ рисунка	Сечение потока	Давление в подводе, МПа	Развёртка (мсек/дел)	Чувствительность (мВольт/дел)
9а	фон земли	0	1	10
9б	подвод	1,0	1	10
9в	подвод	2,0	1	20
9г	подвод	3,0	1	20
9д	подвод	4,0	1	20
9е	светоизлучение	1,0	1	10
9ж	светоизлучение	2,0	1	20
9з	светоизлучение	3,0	1	20
9и	светоизлучение	4,0	1	20
9к	ядро потока	1,0	1	10
9л	ядро потока	2,0	1	10
9м	ядро потока	3,0	1	10
9н	ядро потока	4,0	1	10
9о	факел	1,0	1	10
9п	факел	2,0	1	10
9р	факел	3,0	1	10
9с	факел	4,0	1	10

Необходимо отметить, что предварительные замеры размаха сигналов показали существенную зависимость результатов измерения от величины входных сопротивлений осциллографа: подключение сигнала через делитель 1:10 увеличило омическое сопротивление входа осциллографа до значения $R_{вх} = 10$ МОм, с одновременным уменьшением его ёмкостного сопротивления до уровня $C_{вх} = 12$ пФ. Увеличение уровня омического сопротивления входа способствовало уменьшению нагрузки со стороны измерительной цепи и повышению точности измерений. Колебания струны, при ослаблении её натяжения, существенно увеличили размах сигнала и вызвали появление высоких частот, подобных «дребезгу» контактов реле.

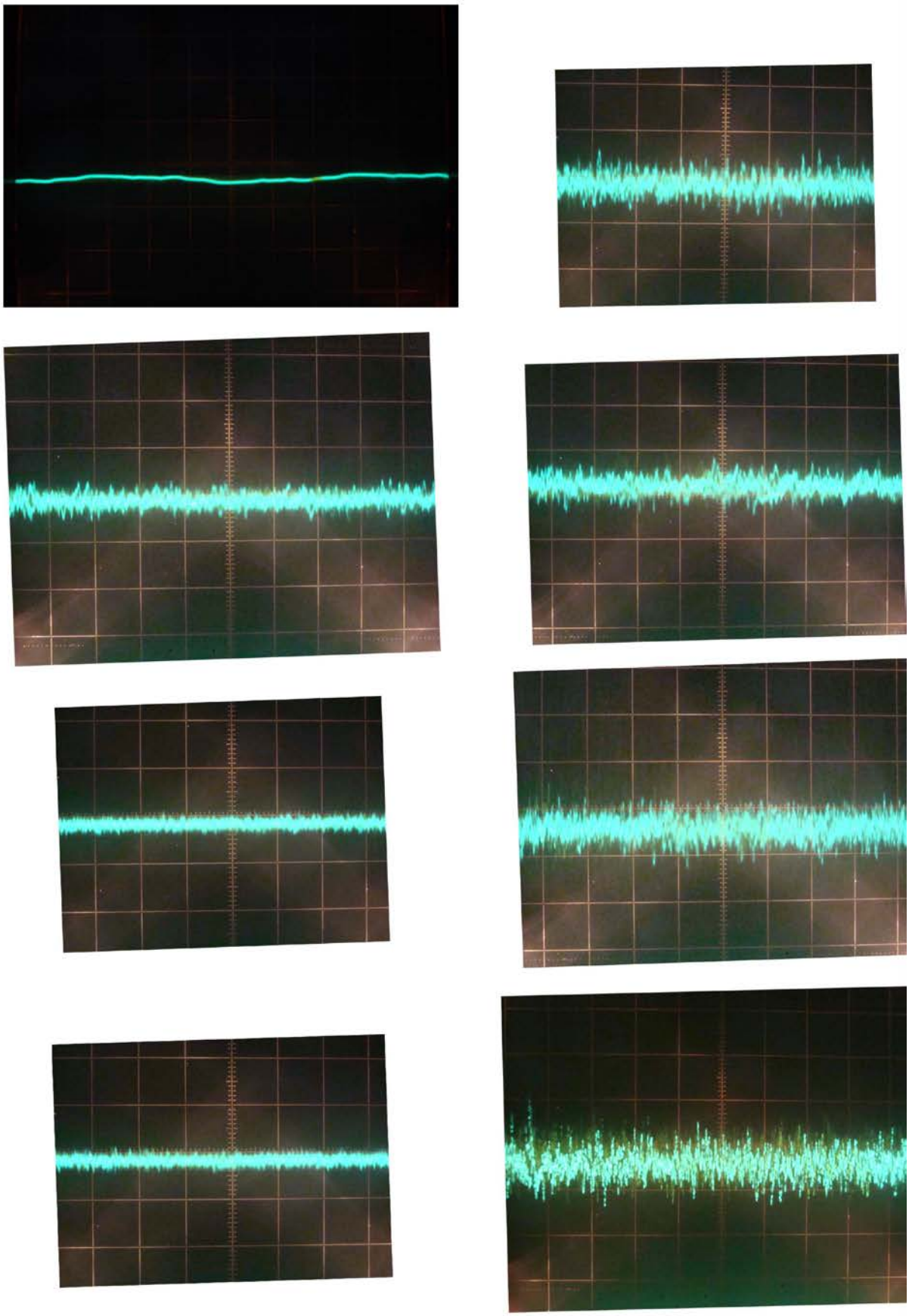


Рис. 9(а–з). Форма сигналов в диафрагменном дросселе без делителя на входе осциллографа (буквенные индексы указаны сверху вниз и слева направо).

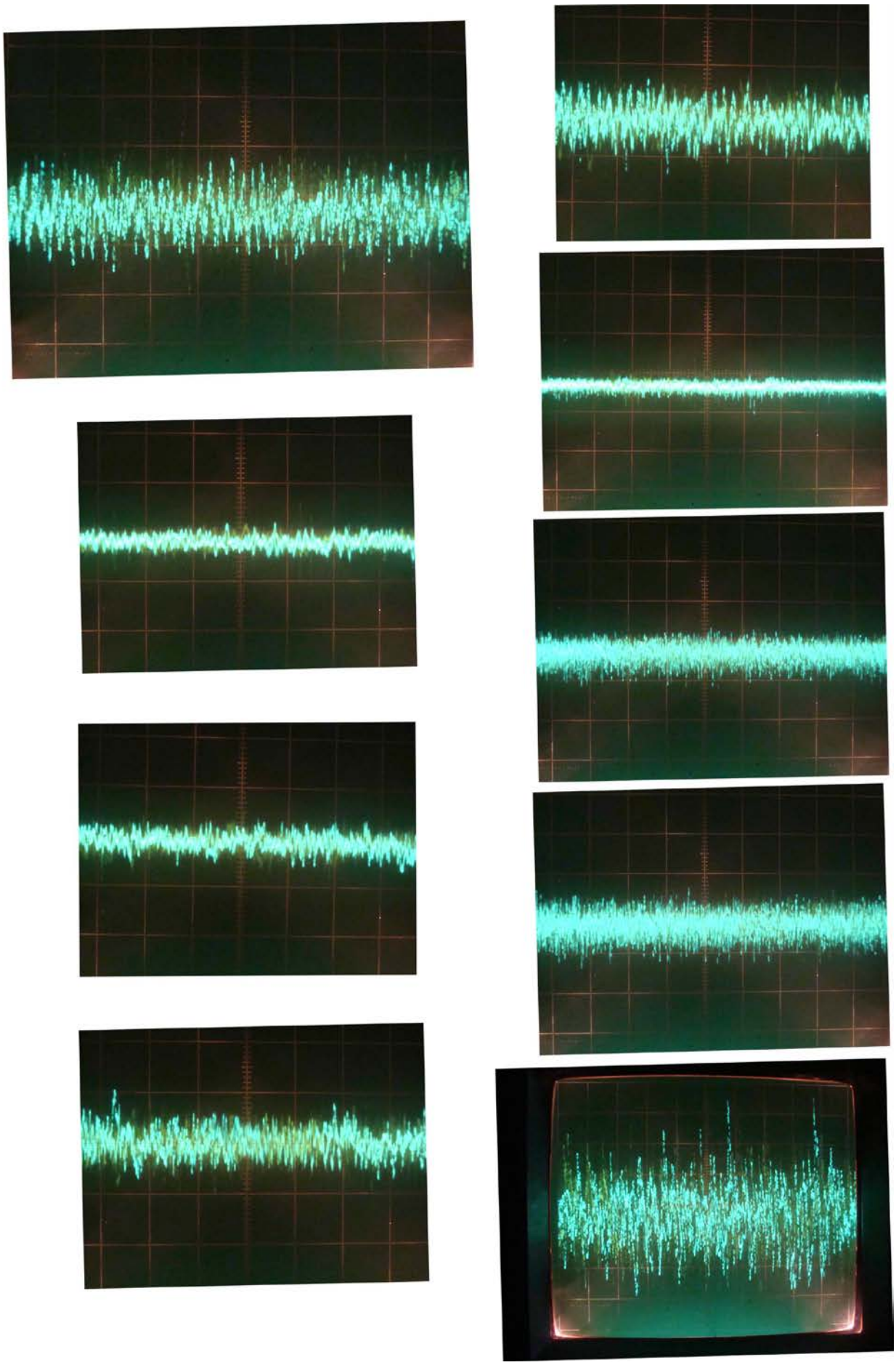


Рис. 9. (и-с) Форма сигналов в диафрагменном дросселе без делителя

Результаты осциллографирования электрических сигналов в сечениях потока представлены на сводной диаграмме рис. 10. Позиции метки 1, 2, 3. 4, 5 соответствуют сечениям «подвод», «светоизлучение», «ядро», «факел» и «отвод».

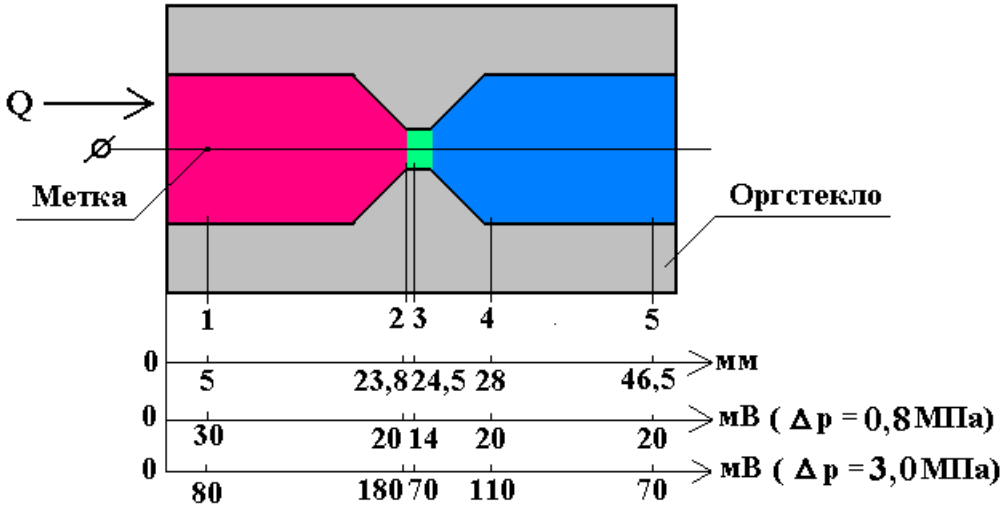


Рис. 10. Размах электрических сигналов в сечениях потока.

Точное положение метки на оси потока определяется осью «мм» диаграммы. Размах сигнала в выбранном сечении при перепадах давлений Δp = 0,8 МПа и Δp = 3,0 МПа показан на осях «мВ». В сечении 2 (светоизлучение) размах сигнала наибольший и равен 180 мВ, в ядре потока за областью светоизлучения (сечение 3) размах сигнала меньше, чем в области светоизлучения. В факеле (сечение 4) интенсивность сигнала увеличивается по сравнению с сечением ядра потока. В отводе (сечение 5) размах сигнала такой же, как в подводе. Наличие электрических сигналов в подводе (сечение 1) послужило поводом для последующих исследований электрических процессов в ламинарном потоке. Интегральная спектральная характеристика электрических сигналов исследовалась с использованием анализатора спектра Я 40-0830 (рис. 11).

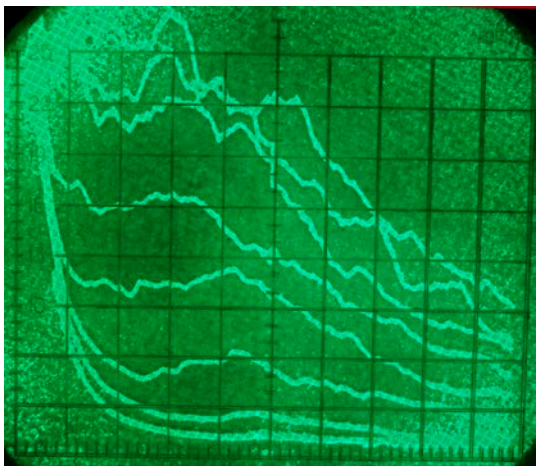


Рис. 11. Спектрограмма электрического сигнала в сечении светоизлучения.

На центральной вертикальной оси экрана анализатора спектра располагается базовая частота f_0 =10 кГц; цена деления горизонтальной оси экрана составляет Δf = 2 кГц. Спектрограммы снимались при различных значениях давления в подводе p_1 = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: нижние линии на спектрограммах соответствуют минимальным значениям давления, верхние линии – максимальным. Результаты обработки спектрограмм электрических сигналов в зоне светоизлучения представлены в виде зависимостей интегральных значений размаха электрического сигнала от скорости потока при фиксированных значениях частоты (рис. 12).

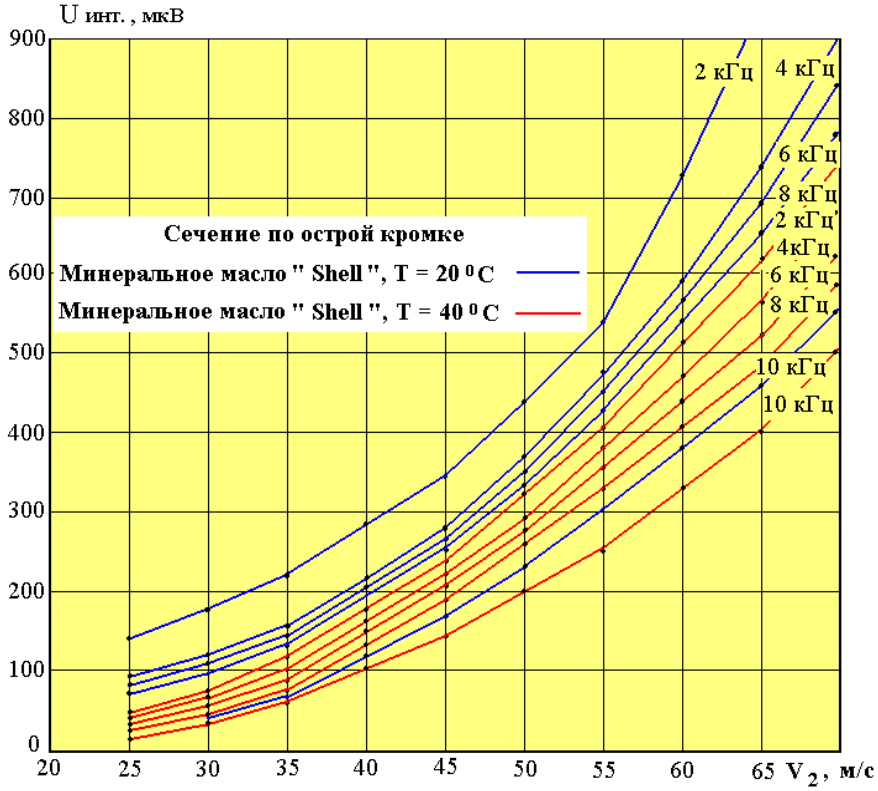


Рис. 12. Спектральные характеристики электрических сигналов в зоне светоизлучения.

Частотный спектр сигналов лежит в диапазоне $D_f = 2 \div 10$ кГц. В сечении по входной кромке дросселя интегральное значение напряжения на частоте 2 кГц достигало на холодном масле значения $U_{2кГц} = 1{,}1$ мВ. Нагрев масла до $t^0C = +50\ ^0C$ вызвал снижение интегрального значения напряжения на этой частоте в 1,5 раза. В подводе и отводе, где скорости потока в 30 раз меньше, чем в сжатом сечении потока, интегральные значения напряжения уменьшились в 2 раза. Значительные по размаху электрические сигналы, обнаруженные в подводе и отводе диафрагменного дросселя, обусловили необходимость исследования бескавитационного потока в капиллярном дросселе (диаметр подвода $d_п = 6$ мм, диаметр капилляра $d_к = 2$ мм, рис. 13). Параметры потока в капиллярном дросселе представлены на рис.14: при перепаде давлений на дросселе $\Delta p = 4{,}0$ МПа средняя скорость движения жидкости в подводе V_1 была значительно больше средней скорости движения жидкости в подводе *диафрагменного дросселя* (7,5 м/с и 1,9 м/с соответственно); средние скорости имели значения $V_2 = 70$ м/с, а средняя скорость в сжатом сечении $V_{сж}$ диафрагменного дросселя значительно превышала скорость V_2 в капилляре (100 м/с и 70 м/с соответственно).

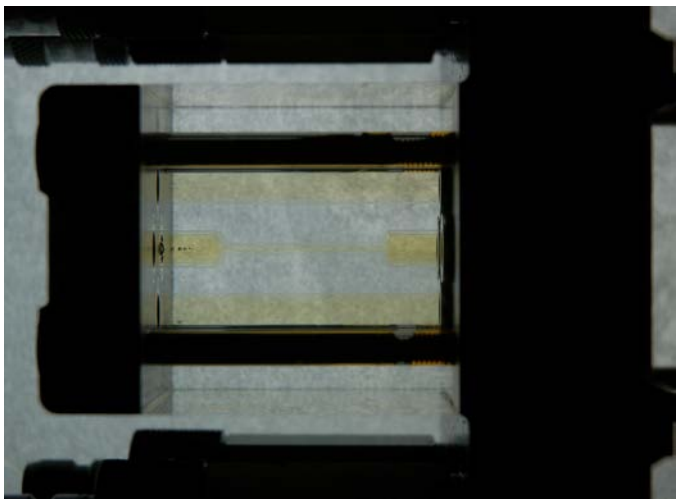


Рис. 13. Капиллярный дроссель

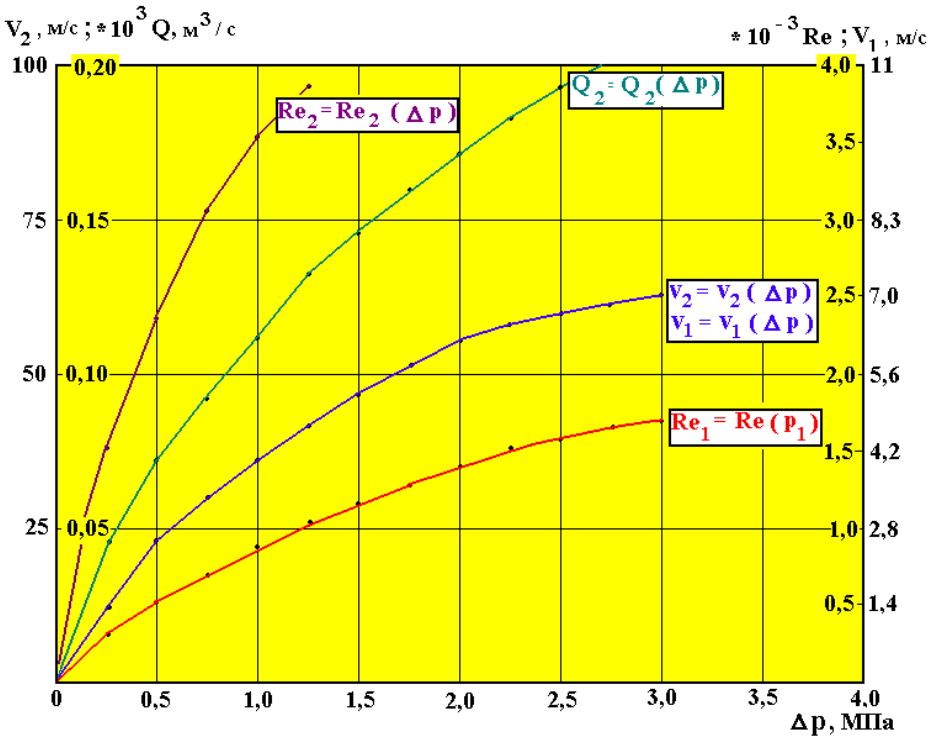


Рис. 14. Параметры потока в капиллярном дросселе.

Форма электрических сигналов в капиллярном дросселе, зарегистрированных осциллографом без делителя 1:10 на входе, представлены на рис. 15(а-л). Расшифровка осциллограмм представлена в Таблице 2. Сечения потока соответствуют данным рис. 16.

Таблица 2. Расшифровка осциллограмм.

№ рисунка	Сечение	Давление в подводе, МПа	Развёртка (мсек/дел)	Чувствительность (мВольт/дел)
15а	фон земли	0	1	10
15б	подвод (1)	1,2	1	10
15в	подвод (1)	2,0	1	20
15г	вход (2)	1,0	1	10
15д	вход (2)	2,0	1	20
15е	середина (3)	1,0	1	10
15ж	середина (3)	2,0	1	20
15з	выход (4)	1,0	1	10
15и	выход (4)	2,0	1	20
15к	отвод (5)	1,0	1	10
15л	отвод (5)	2,0	1	20

Скорректированные значения размаха сигнала представлены на сводной диаграмме рис. 16. Из диаграммы следует, что сигнал имеет наибольший размах на входе в капилляр и сохраняется по всей его длине, достигая значения 640 мВ при давлении в подводе,

равном $\Delta p = 1{,}9$ МПа. Как и прежде, ось «мм» определяет позицию метки по длине канала.

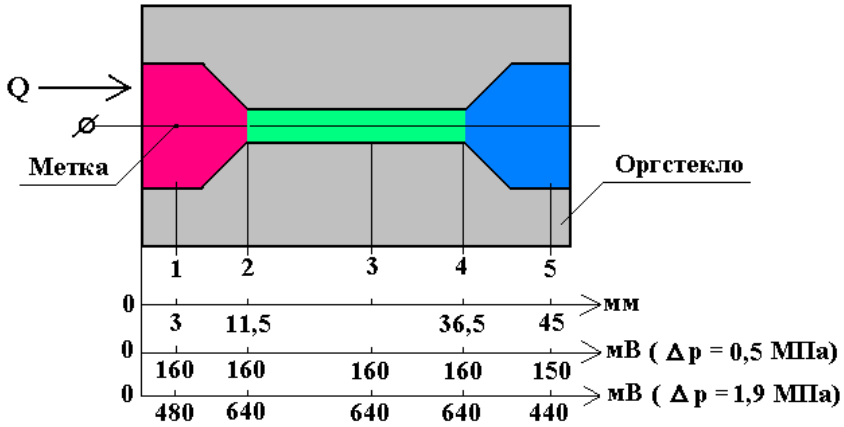


Рис. 16. Размах сигнала в сечениях капиллярного дросселя.

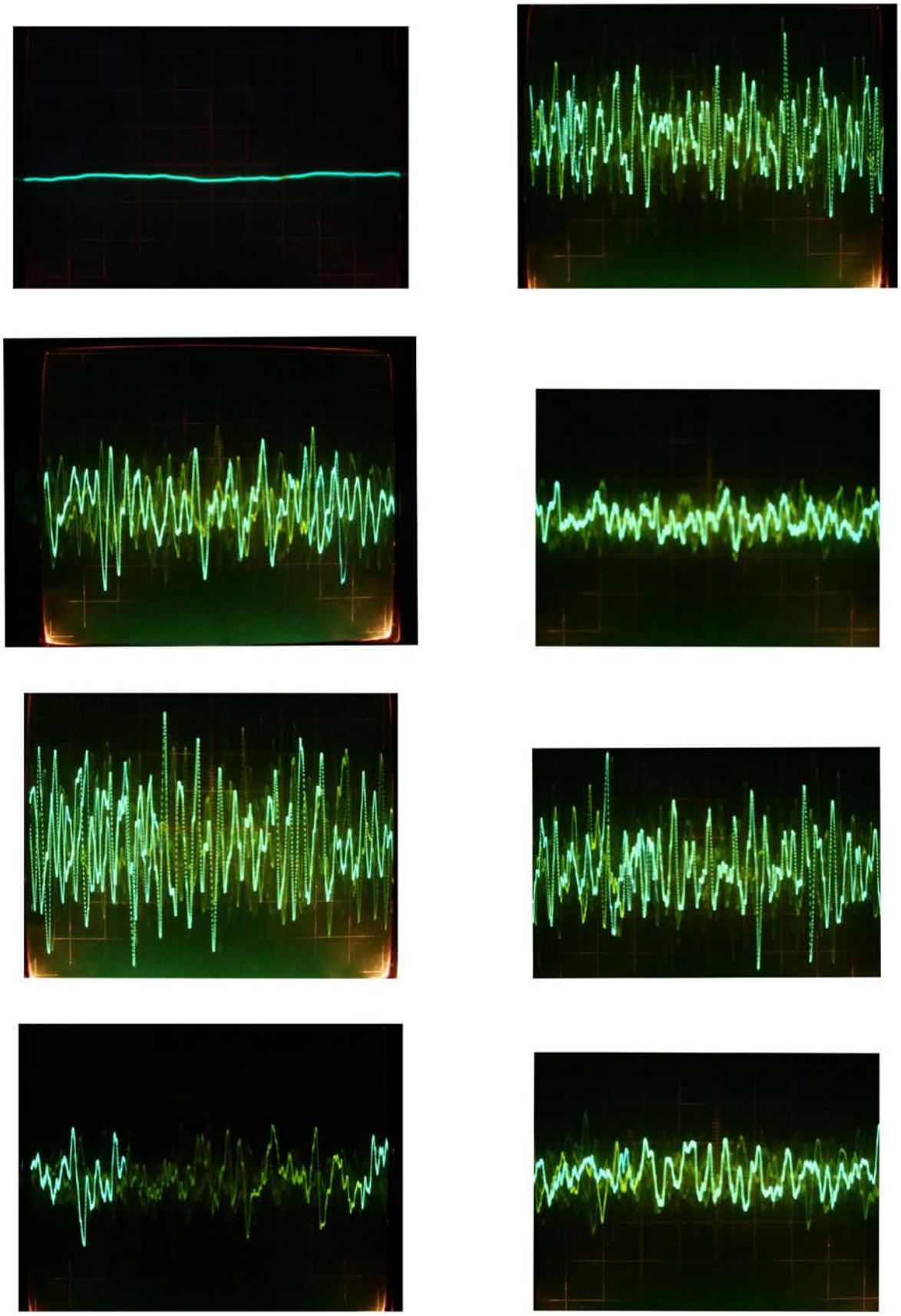


Рис. 15 (а-з). Размах сигналов в капиллярном дросселе. (буквенные индексы указаны сверху вниз и слева направо)

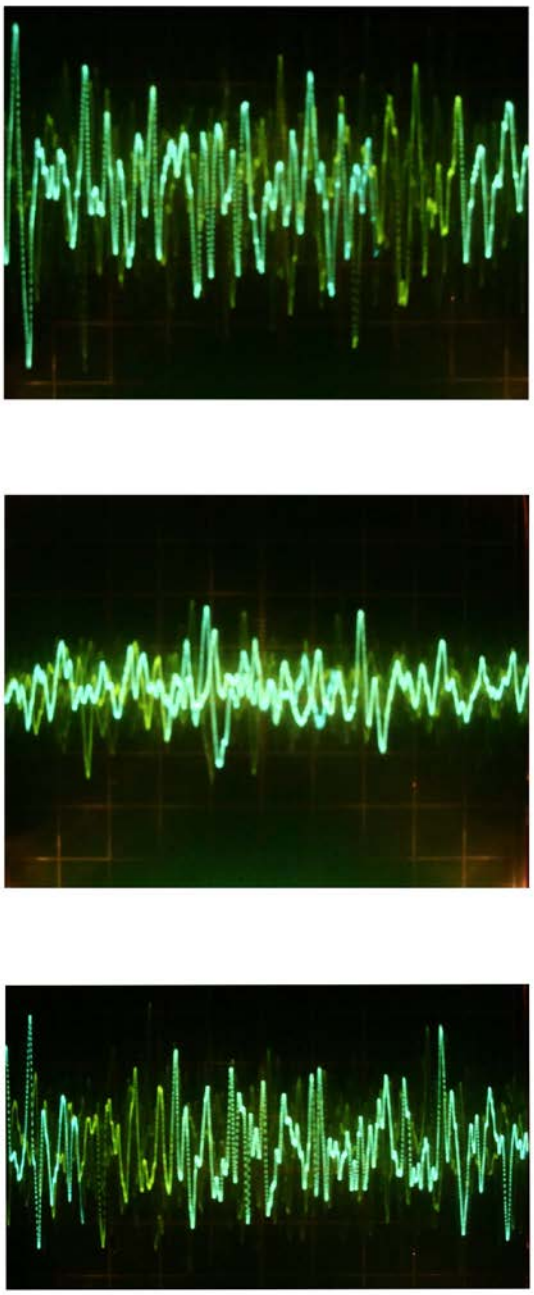


Рис. 15 (и-л). Размах сигналов в капиллярном дросселе.

Спектральные характеристики электрических сигналов в «подводе-отводе» капиллярного дросселя и в его сечениях представлены на графиках рис. 17 и рис. 18 в виде зависимостей интегральных значений напряжения от скорости потока на фиксированных частотах.

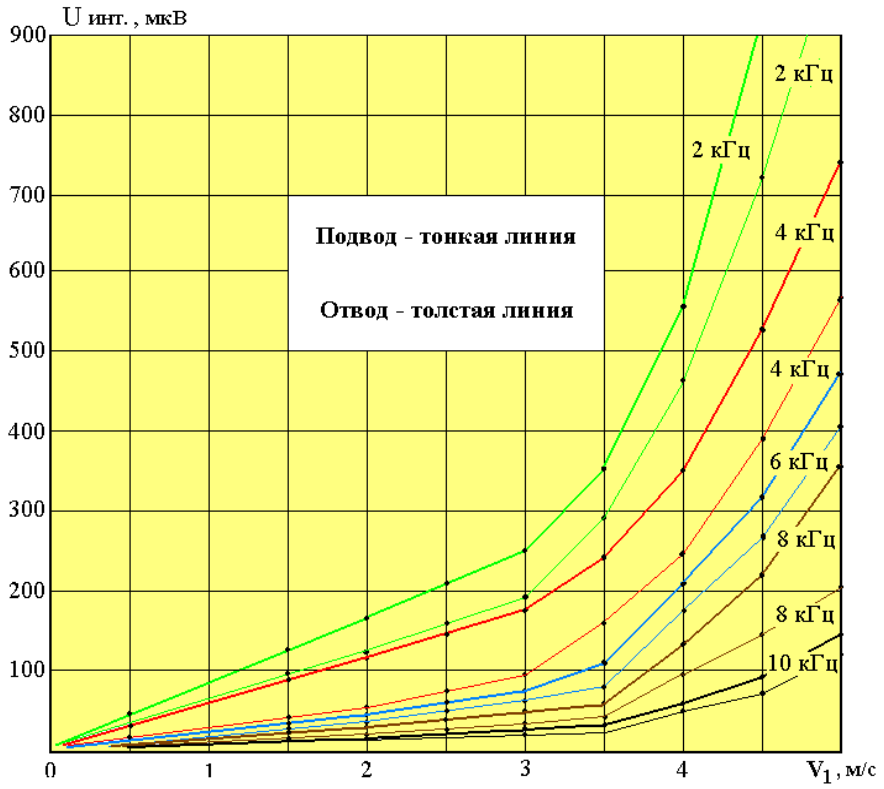


Рис. 17. Спектральная характеристика сигнала в подводе и отводе.

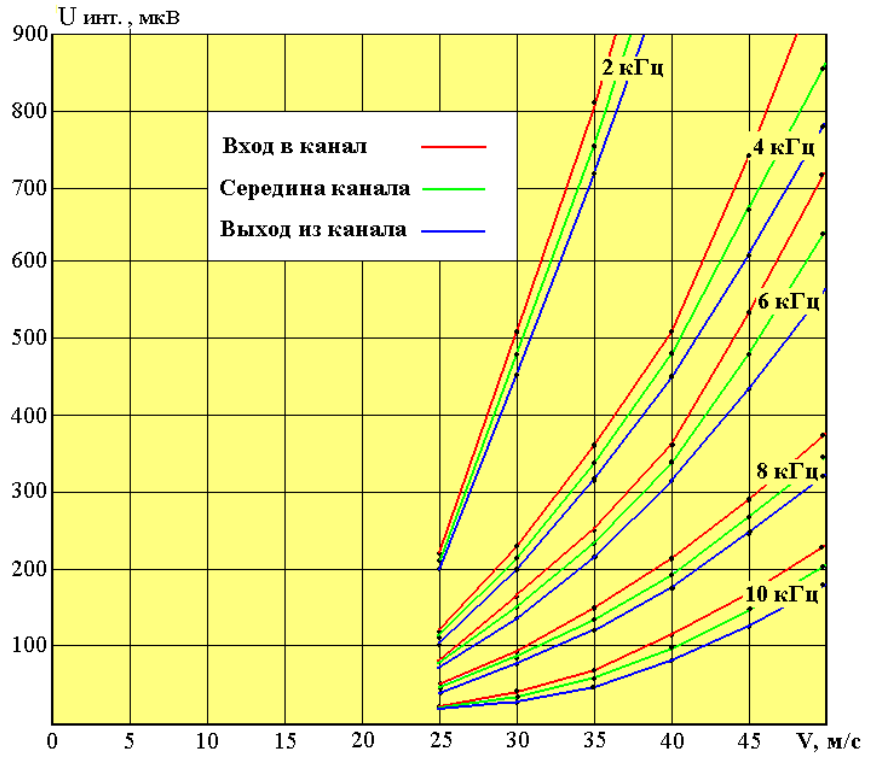


Рис. 18. Спектральная характеристика сигнала в сечениях капиллярного дросселя.

Частотный спектр сигналов лежит в диапазоне $D_f = 2 \div 10$ кГц. В подводе значение интегрального напряжения несколько выше, чем в отводе, что обусловлено падением

напряжения по длине канала. В целях выявления причин появления электрических процессов в потоке минерального масла и роли материала стенок канала в этих процессах, был изготовлен *комбинированный дроссель*, в котором подвод (диаметром 5,5 мм) и внешний цилиндрический насадок (диаметром 1,5 мм) были выполнены из *металла* (латуни) и *заземлены.* Приёмный капилляр (диаметром 2 мм) и отвод (диаметром 6 мм) были выполнены из прозрачного органического стекла. Фотографии комбинированного дросселя и потоков в его прозрачной части представлены на рис. 19, 20, 21, 22, 23.

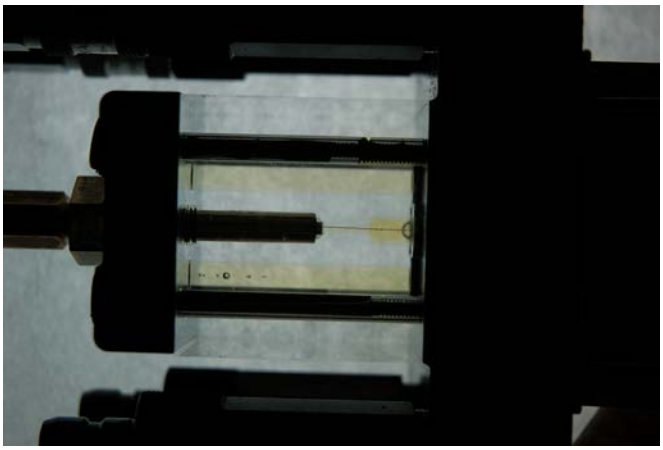


Рис. 19. Комбинированный дроссель (безотрывный режим работы насадка)

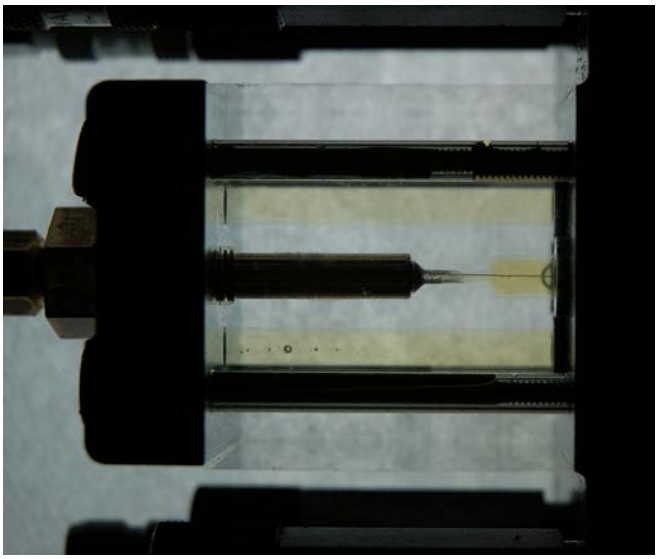


Рис. 20. Комбинированный дроссель (срыв работы насадка)

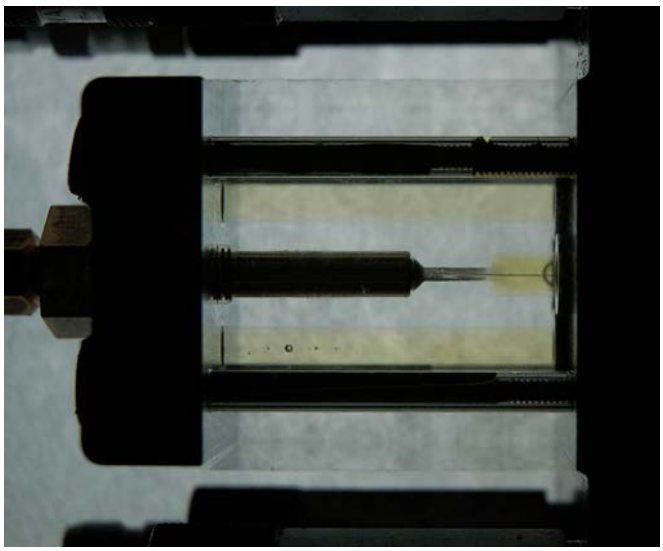


Рис. 21. Комбинированный дроссель (распространение факела внутрь капилляра)

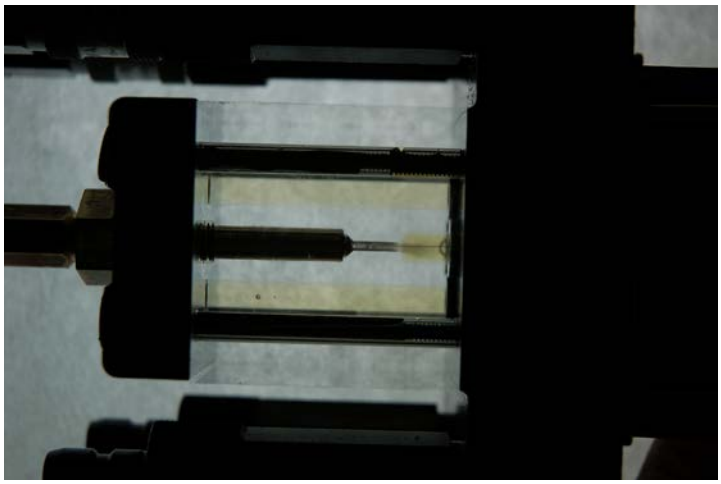


Рис. 22. Комбинированный дроссель (выход факела в отвод)

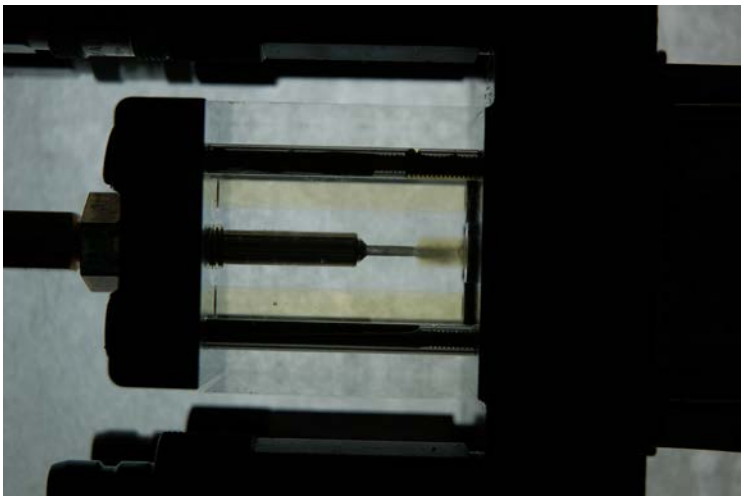


Рис. 23. Комбинированный дроссель (режим суперкавитации)

Параметры потока в комбинированном дросселе представлены на рис. 24: при наибольшем перепаде давлений на дросселе $\Delta p = 4$ МПа число Рейнольдса на входе в

цилиндрический дроссель достигало значения Re = 7,5x10^3, что соответствовало началу турбулентного режима движения жидкости, при этом в подводе оно имело значение Re = 2,3x10^3 (ламинарный режим). Скорости движения жидкости в подводе (отводе) и в проходном сечении цилиндрического дросселя приняли значения V_1 = 5,6 м/с и V_2 = 95 м/с соответственно. Срыв работы внешнего цилиндрического насадка (участок 2-3) произошёл при давлении p_1 = 3,0 МПа.

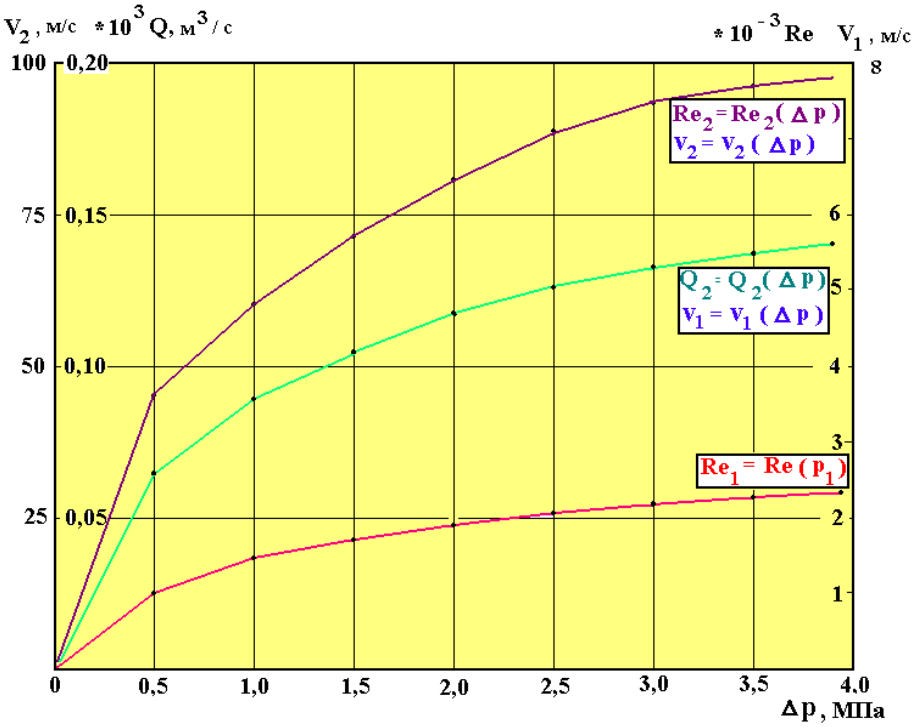


Рис. 24. Параметры потока в комбинированном дросселе

Скорректированные значения размаха сигнала представлены на сводной диаграмме рис. 25.

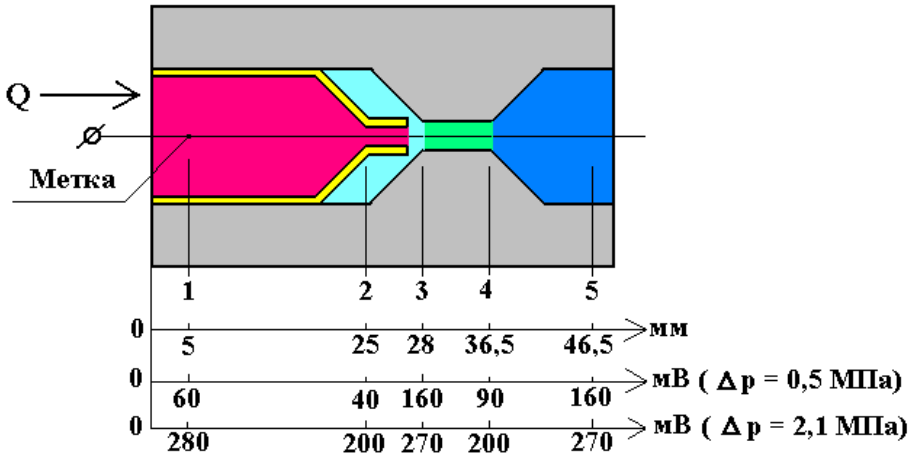


Рис. 25. Размах сигнала в сечениях комбинированного дросселя.

Из данных диаграммы следует, что сигнал достигает наибольшего значения (270 мВ) на входе в капилляр (сечение 3) и на выходе из отвода. Как и прежде, ось «мм» определяет позицию метки по длине канала.

Физико-механическое обоснование результатов экспериментального исследования.

Результаты исследования гидродинамического потока минерального масла (среды, обладающей диэлектрическими свойствами) в узких каналах показали, что внутри потока формируются электрические заряды и связанные с ними сложные электрические процессы, вызывающие, при наличии дополнительных условий, светоизлучение в *сжатом сечении* потока, при его прохождении через острую входную кромку диафрагменного дросселя.

Величина размаха электрических сигналов и их частотный спектр определяются осреднёнными скоростями движения жидкости в сечениях потока, её физическими свойствами и формой канала, ограничивающего поток. При определённых условиях в потоке может возникнуть светоизлучение**,** природа которого, наиболее вероятно, определяется электрическими, а не теплофизическими процессами. Отсутствие *оплавления* острой входной кромки модели диафрагменного дросселя, выполненной из органического стекла, не согласуется с высказанными версиями о «плазменных разрядах» [7] и «искровых разрядах» и «плазменном пробое» [12]. Локализация светоизлучения на входной острой кромке диафрагменного дросселя в сжатом сечении потока, его отсутствие в других сечениях турбулизованного потока и в капиллярном дросселе, а также зависимость возникновения светоизлучения от степени остроты входной кромки, обусловили необходимость анализа динамики процесса огибания периферийными струйками потока условно острой входной кромки диафрагменного дросселя (рис. 26)..

Если допустить равномерность движения жидкой частицы на участке огибания периферийной струйкой острой входной кромки дросселя по криволинейной траектории с постоянным радиусом r, такое движение можно рассматривать как равноускоренное, с нулевым локальным ускорением $\partial V/\partial t = 0$ и конечными значениями конвективных ускорений $\partial V/\partial S \neq 0$, обусловленных изменением направления вектора скорости. В этом случае ускорение направлено к центру окружности перпендикулярно вектору скорости и рассматривается как нормальное центростремительное ускорение переносного движения $a_{цс} = V^2/r$. На частицу жидкости массой Δm, расположенной на периферийной струйке и огибающей острую кромку, в центре её массы действует центробежная сила $F_{цб} = \Delta m V^2/r$, направленная от центра окружности. Удерживает частицу на траектории её

движения уравновешивающая центростремительная сила $F_{цс}$, определяемая силами давления со стороны соседствующих с ней частиц с внешней стороны траектории (подпирающее усилие), и силами растяжения со стороны частиц с внутренней стороны траектории, прилипших к твердой стенке (притягиваюшее усилие). Можно предположить, что в случае несмачиваемости стенки жидкостью, притягивающее усилие будет отсутствовать.

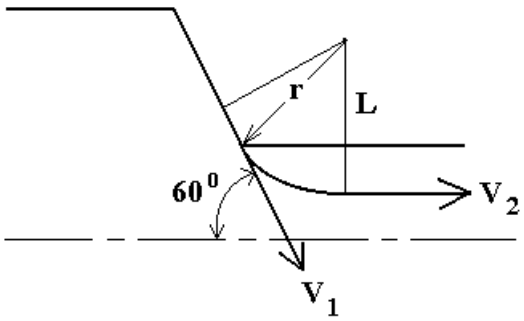


Рис. 26. Схема огибания периферийной струйкой острой входной кромки дросселя.

Объём частицы капельной жидкости сферической формы радиусом **R** связан с её массой и плотностью равенством $\Delta W = \Delta m/\rho = 4\pi R^3/3$. В этом случае радиус R определяется выражением

$$R = (3\Delta W/4\pi)^{1/3} = (3\Delta m/4\pi\rho)^{1/3}. \qquad (2)$$

Если допустить равенство по модулю подпирающего и притягивающего усилий, результирующая поверхностная сила, действующая на плоское диаметральное сечение сферы площадью

$$\Delta S = \pi R^2 = \pi(3\Delta m/4\pi\rho)^{2/3}, \qquad (3)$$

будет определяться равенством

$$\Delta m V^2/r = 2\pi p(3\Delta m/4\pi\rho)^{2/3}. \qquad (4)$$

Выражая из уравнения (4)) величину p, которая в «Механике жидкости» рассматривается как *интенсивность поверхностной силы*, получим

$$p = \Delta m V^2/2\pi r(3\Delta m/4\pi\rho)^{2/3}. \qquad (5)$$

Подстановка среднего значения плотности минерального масла $\rho = 860$ кг/м^3, определяет выражение для численной оценки интенсивности поверхностной силы

$$p = 37\Delta m^{0,33}V^2/r\,. \qquad (6)$$

В выражении (6) величина массы Δm не определена, поэтому целесообразно оценивать интенсивность поверхностной силы, приведённой к массе $\Delta m^{0,33}$:

$$p/\Delta m^{0,33} = 37V^2/r\ . \qquad (7)$$

В Таблице 3 представлены величины интенсивности приведённой поверхностной силы, подсчитанные в соответствии с равенством (7) для конкретных значений r и V.

Таблица 3. Интенсивность приведённой поверхностной силы.

r = 1 мм		**r = 0,5 мм**		**r = 0,1 мм**	
V, м/с	**$p/\Delta m^{0,33}$, м/с^2**	**V, м/с**	**$p/\Delta m^{0,33}$, м/с^2**	**V, м/с**	**$p/\Delta m^{0,33}$, м/с^2**
0,5	9×10^3	0,5	18×10^3	0,5	90×10^3
1	$3,7\times10^4$	1	$7,4\times10^3$	1	37×10^3
2	$1,48\times10^5$	2	$2,96\times10^5$	2	$14,8\times10^5$
5	$9,25\times10^5$	5	$18,5\times10^5$	5	$92,5\times10^5$
10	$3,7\times10^6$	10	$7,40\times10^6$	10	37×10^6
50	$9,25\times10^7$	50	$18,5\times10^7$	50	$92,5\times10^7$

Данные Таблицы 3 показывают, что на частицу минерального масла, расположенную на периферийной струйке, огибающей острую входную кромку дросселя, может действовать достаточно большое по величине растягивающее усилие, которое может стать причиной, вызывающей светоизлучение. В силу быстроты протекающих процессов жидкая частица не успевает превратиться в пар, что объясняет локализацию светоизлучения в предкавитационной зоне. В соответствии с равенством (7) и Таблицей 3, величина растягивающего усилия существенно зависит от остроты входной кромки, определяющей степень сжатия струи и радиус кривизны траектории. Например, уменьшение радиуса скругления кромки от 1 мм до 0,05 мм увеличивает интенсивность приведённой поверхностной силы в 20 раз. Это, в некоторой степени, раскрывает причину отсутствия светоизлучения в диафрагменном дросселе, в котором в процессе длительной эксплуатации произошло притуплении его острой входной кромки из-за абразивного износа. Количественная оценка интенсивности растягивающего усилия дала следующие результаты:

1) R = 0,1 мм; $\Delta W = 4,2\times10^{-12}$ м^3; ρ = 860 кг/м^3; $\nabla m = 0,36\times10^{-8}$кг; $\nabla m^{0,33}$ = 0,0016. Для r = 1 мм и V = 50м/с: **p = 152 кПа**; для r = 0,5 мм и V =50м/с: **p = 304 кПа**.

2) R = 0,05 мм; $\Delta W = 0,52\times10^{-12}$ м^3; ρ = 860 кг/м^3; $\nabla m = 0,045\times10^{-8}$кг;$\nabla m^{0,33}$ = 0,00079. Для r = 1мм и V = 50м/с: **p = 75 кПа**; для r = 0,5 мм и V =50 м/с: **p = 150 кПа**.

Приведённые выше характеристики потока в диафрагменном дросселе позволяют расчётным путём оценить осреднённую скорость движения жидкости в сжатом сечении и

интенсивность растягивающего усилия. Уравнение Д. Бернулли, записанное для входного сечения дросселирующего канала и сжатого сечения потока (его *предкавитационная зона*) в условиях сохранения сплошности среды $V_i \times A_i = inv$, (где V_i – осреднённая по A_i - му сечению потока скорость), определяет среднее значение давления в сжатом сечении потока

$$p_2 = p_1 + \rho V_1^2 / 2 - (1 + \zeta_{вх}) \times \rho V_2^2 / 2, \qquad (8)$$

где $\varsigma_{вх} = 0{,}05$ – коэффициент гидравлического сопротивления входной острой кромки дросселя; $\rho = 860$ кг/м^3 – плотность минерального масла. После подстановки значения коэффициента несовершенного сжатия струи $\varepsilon = 0{,}65 \div 0{,}70$, уравнение (8) примет вид

$$p_2 = p_1 - 451\ V_2^2. \qquad (9)$$

Полученные по результатам эксперимента осреднённые по сечению потока *алгебраические* значения давления p_2 имели *отрицательное* значение, что свидетельствует о наличии в сечении напряжений растяжения $\sigma_{раст} = -p_2$. Подсчитанные по результатам испытаний значения осреднённых скоростей $V_2 = V_2(\Delta p)$ и осреднённых по сечению потока напряжений растяжения $\sigma_{раст} = \sigma_{раст}(\Delta p)$, где $\Delta p = p_1 - p_3 = p_{др}$ – перепад давлений на диафрагменном дросселе; p_3 – давление в отводе дросселя, представлены на графиках рис. 4. Из графика рис. 6 следует, что осреднённая скорость движения жидкости в сжатом сечении достигала значений $V_{2max} = 100$ м/с, а осреднённое значение интенсивности растягивающего усилия (напряжения растяжения) $\sigma_{раст.max} = 2{,}2$ МПа. Напряжение растяжения, соответствующее началу светоизлучения во входном сечении дросселя лежит в пределах $\sigma_{раст} = 1{,}4 \div 2{,}2$ МПа и зависит от величины давления подпора в отводе дросселя. Светоизлучение прекращается при меньших значениях напряжения растяжения $\sigma_{раст} = 1{,}1 \div 2{,}0$ МПа, что свидетельствует о наличии в процессе эффекта гистерезиса. С учётом того, что входное сечение потока взято на левой кромке кавитационного тора, поле давления по сечению потока неоднородно и подсчитанное по уравнению Д. Бернулли напряжение растяжения $\sigma_{раст}$ следует рассматривать как осреднение эпюры давления. Тем же фактором можно объяснить влияние давления подпора p_3 на интенсивность и устойчивость светоизлучения**:** прекращение светоизлучения в режиме интенсивной суперкавитации обусловлено уменьшением $\sigma_{раст}$ в условиях смыкания областей присоединённой и перемещающейся кавитаций. Время, необходимое для

зарождения и замыкания перемещающейся каверны в случае, когда главную роль играют силы инерции, составляет несколько миллисекунд, что хорошо коррелируется с частотным спектром зарегистрированных электрических процессов. Также достаточно хорошо коррелируются и оценки интенсивности растягивающего усилия, выполненные на основе решения уравнения Д. Бернулли и анализа динамики процесса огибания жидкой частицей острой входной кромки дросселя.

Электрокинетические свойства потока минерального масла в узких каналах и рабочая версия природы наблюдаемых электрических процессов в гидродинамическом кавитирующем потоке и причины светоизлучения изложены в работах [13, 14, 15].

Заключение: Основные выводы по результатам экспериментальной части исследования.

1. В объёме гидродинамического кавитирующего потока минерального масла в узких каналах формируются электрические заряды, определяющие сложные электрические процессы.
2. Электрические процессы происходят как в турбулентных, так и в ламинарных потоках, ограниченных твёрдыми стенками из *металлических* и *неметаллических* материалов.
3. Частотный спектр электрических процессов лежит в диапазоне $D_f = 2 \div 10$кГц, при этом спектр частот с наибольшими значениями интегральных напряжений сдвинут в область низких частот.
4. Размах электрических сигналов, зарегистрированный осциллографом С1-83 с входным омическим сопротивлением R =1 МОм, достигает значений $U_{разм} = 650 \div 700$ мВ.
5. Интенсивность электрических сигналов возрастает с увеличением скорости потока.
6. Кавитация вызывает существенное увеличение размаха сигнала и появление в нём высоких частот, по сравнению с сигналами в бескавитационном потоке.
7. Условия совместного существования в потоке минерального масла электрических зарядов и больших растягивающих напряжений могут стать причиной возникновения светоизлучения достаточной интенсивности в голубой части цветового спектра.
8. Светоизлучение возникает и локализуется в зоне *зарождения* кавитационных каверн на острой кромке диафрагменного дросселя, где абсолютное давление понижено, а не в зоне *замыкания* кавитационных каверн, где абсолютное давление намного больше.

9. Интенсивность светоизлучения существенно зависит от абсолютного давления в зоне образования парогазовых каверн из ядер кавитации, скорости потока, определяющей величину центростремительных сил, действующих на частицы жидкости, расположенные на периферийных струях потока, огибающих острую кромку, а также от основы минерального масла и наличия в нём пакета корректирующих присадок.
10. В процессе возникновения и развития светоизлучения присутствует гистерезис.

Можно предположить, что электрические процессы в потоке минерального масла в узких щелях могут стать причиной электроэрозии основы масла и ограничивающих поток стенок канала, выполненных из материалов, обладающих кр*исталлической структурой*, а также «выжигания» корректирующих присадок. Электрозрозия стенок канала, выполненного из аморфного материала (органического стекла), *не обнаружена*.

Список литературы

1. Marinesco M., Trillat J. Action des ultrasons sur les plaques photographiques // Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris). 1933. Vol. 196. P. 858-860.
2. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация: пер. с англ. М.: Мир, 1974. 687 с.
3. Jarman P., Tailor K. Light emission from cavitation water // British Journal of Applied Physics. 1964. Vol. 15, no. 3. P. 321-322. http://dx.doi.org/10.1088/0508-3443/15/3/412
4. Jarman P. Sonoluminescence: A discussion // Journ. Acoust. Soc. Am. 1960. Vol. 32, no. 11. P. 1459-1462. http://dx.doi.org/10.1121/1.1907940
5. Peterson F. *Light emission from hydrodynamic cavitation. Ph. D. Thesis*. Northwestern University, 1966.
6. Маргулис М.А. Сонолюминесценция // Успехи физических наук. 2000. Т. 170, № 3. С. 263-287.
7. Колдомасов А.И. Плазменное образование в кавитирующей диэлектрической жидкости // Журнал технической физики. 1991. Т. 61, № 2. С. 188-190.
8. Ефремова К.Д., Пильгунов В.Н. Световое излучение потока минерального масла в диафрагменном дросселе // Международная научно-техническая конференция «Гидромашины. Настоящее и будущее» : сб. докл. М., 2004. С. 41-45.
9. Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2009. № 3. С.114-119.
10. Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Колдамасов А.И., Hyun Ik Yang, Десятов А.В. Генерация интенсивного направленного излучения при быстром движении струи

жидкости сквозь узкие диэлектрические каналы // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. № 3. С. 55-60.

11. Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Сысоев Н.Н., Десятов А.В. Генерация рентгеновского излучения при пузырьковой кавитации быстрой струи жидкости в диэлектрических каналах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 4. С. 17-26.

12. Багров В.В., Десятов А.В., Казанцева Н.Н., Камруков А.С., Козлов Н.П., Корнилова А.А., Ксенофонтов Б.С., Кубышкин А.П., Кужекин И.П., Кулешов Н.В., Нагель Ю.А., Черкасов С.Г. Вода: эффекты и технологии. М.: ООО НИЦ «Инженер»; ООО «Онико-М», 2010. 488 с.

13. Маргулис М.А., Пильгунов В.Н. Свечение и электризация при течении диэлектрических жидкостей в узком канале // Журнал физической химии. 2009. Т. 83, № 8. С. 1585-1590.

14. Маргулис М.А., Пильгунов В.Н. О механизме возникновения свечения и электризации при течении жидкостей в узком канале // Журнал физической химии. 2009. Т. 83, № 10. С. 1975-1979.

15. Маргулис М.А., Пильгунов В.Н. Механизм свечения и электризации жидкостей при течении в узких каналах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2010. № 1. С. 64-79.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Light emission and electrical process in the cavitating flow of mineral oil

03, March 2013

DOI: 10.7463/0313.0535547

Pil'gunov V.N., Efremova K.D.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

e10@bmstu.ru

efremova.k.d.@gmail.com

During the research of cavitation processes in the mineral oil flow inside a transparent model of an orifice restrictor steady light emission in the blue range of the visible colour spectrum was revealed. Intensity of light emission grew as the flow velocity increased. Upon reaching the threshold value of the flow velocity, light emission became pulsatile; and when velocity continued to grow, emission stopped. Experiments revealed the presence of mineral oil of intensive electrical processes in the cavitating flow. The created experimental setup allowed to make a quantitative assessment of electric processes and to record the dynamics of light emission. Hypothesis that explains the physics of discovered effects was proposed along with assumptions about possible influence on the working liquid for hydraulic drives and wall materials of narrow channels of hydro automatic equipment elements and devices.

Publications with keywords: light emission in the flow, cavitation flow, diaphragm choke

Publications with words: light emission in the flow, cavitation flow, diaphragm choke

References

1. Marinesco M., Trillat J. Action des ultrasons sur les plaques photographiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), 1933, vol. 196, pp. 858-860. (In French)

2. Knapp R.T., Daily J.W., Hammit F.G. *Cavitation*. NY, McGraw-Hill Book Company, 1970. 687 p. (Russ. ed.: Knepp R., Deili Dzh., Khemmit F. *Kavitatsiia*. Moscow, Mir, 1974. 687 p.).

3. Jarman P., Tailor K. Light emission from cavitation water. *British Journal of Applied Physics*, 1964, vol. 15, no. 3, pp. 321-322. http://dx.doi.org/10.1088/0508-3443/15/3/412

4. Jarman P. Sonoluminescence: A discussion. *Journ. Acoust. Soc. Am.*, 1960, vol. 32, pp. 1459-1462. http://dx.doi.org/10.1121/1.1907940

5. Peterson F. *Light emission from hydrodynamic cavitation. Ph. D. Thesis*. Northwestern University, 1966.

6. Margulis M.A. Sonoliuminestsentsiia [Sonoluminescence]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2000, vol. 170, no. 3, pp. 263-287. (Trans. version: *Physics-Uspekhi*, 2000, vol. 43, no. 3, pp. 259-282. DOI: 10.1070/PU2000v043n03ABEH000455)

7. Koldomasov A.I. Plazmennoe obrazovanie v kavitiruiushchei dielektricheskoi zhidkosti [Plasma formation in cavitating dielectric liquid]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1991, vol. 61, no 2, pp. 188-190.

8. Efremova K.D., Pil'gunov V.N. Svetovoe izluchenie potoka mineral'nogo masla v diafragmennom drossele [Light radiation of flow of mineral oil in diaphragm-type throttle]. *Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskoi konferentsiia «Gidromashiny. Nastoiashchee i budushchee» : sb. dokl*. [International Scientific and Technical Conference "Hydraulic machine. Present and Future ": proc.], Moscow, 2004, pp. 41-45.

9. Gertsenshtein S.Ia., Monakhov A.A. Elektrizatsiia i svechenie zhidkosti v koaksial'nom kanale s dielektricheskimi stenkami [Electrization and luminescence liquid in coaxial channel with dielectric walls]. *Izvestiya. RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2009, no. 3, pp.114-119.

10. Kornilova A.A., Vysotskii V.I., Koldamasov A.I., Hyun Ik Yang, Desiatov A.V. Generatsiia intensivnogo napravlennogo izlucheniia pri bystrom dvizhenii strui zhidkosti skvoz' uzkie dielektricheskie kanaly [Generation of intense directional radiation at fast motion of the jet of fluid through the narrow dielectric channels]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniia*, 2007, no. 3, pp. 55-60.

11. Kornilova A.A., Vysotskii V.I., Sysoev N.N., Desiatov A.V. Generatsiia rentgenovskogo izlucheniia pri puzyr'kovoi kavitatsii bystroi strui zhidkosti v dielektricheskikh kanalakh [Generation of x-ray radiation at the bubble cavitation of fast jet of fluid in the dielectric channels]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniia*, 2009, no. 4, pp. 17-26

12. Bagrov V.V., Desiatov A.V., Kazantseva N.N., Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Kornilova A.A., Ksenofontov B.S., Kubyshkin A.P., Kuzhekin I.P., Kuleshov N.V., Nagel' Iu.A., Cherkasov S.G. *Voda: effekty i tekhnologii* [Water: effects and technology]. Moscow, «Inzhener» Publ.; «Oniko-M» Publ., 2010. 488 p.

13. Margulis M.A., Pil'gunov V.N. Svechenie i elektrizatsiia pri techenii dielektricheskikh zhidkostei v uzkom kanale [Luminescence and electrification in a flow of dielectric liquids through narrow channels]. *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 2009, vol. 83, no. 8, pp. 1585-1590. (Trans. version: *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2009, vol. 83, no. 8, pp. 1414-1418. http://dx.doi.org/10.1134/S0036024409080287).

14. Margulis M.A., Pil'gunov V.N. O mekhanizme vozniknoveniia svecheniia i elektrizatsii pri techenii zhidkostei v uzkom kanale [The mechanism of the appearance of luminescence and electrification in liquid flows through narrow channels]. *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 2009, vol. 83, no. 10, pp. 1975-1979. (Trans. version: *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2009, vol. 83, no. 10, pp. 1789-1793. http://dx.doi.org/10.1134/S0036024409100288).

15. Margulis M.A., Pil'gunov V.N. Mekhanizm svecheniia i elektrizatsii zhidkostei pri techenii v uzkikh kanalakh [Mechanism of luminescence and electrification of liquids flowing through narrow channels]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Estestvennye nauki»* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Natural science], 2010, no. 1, pp. 64-79.