

УДК 543.8 + 541.13

Истечение вязкой жидкости через круглые отверстия при малых числах Рейнольдса

Пильгунов В. Н.^{1,*}, Ефремова К. Д.¹

^{*}vnp41@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрена гидродинамика и исследован процесс истечения минерального масла через круглое отверстие диаметром 0,9 мм с острой входной кромкой, расположенное в удлиненной цилиндрической камере диаметром 20 мм. В процессе эксперимента обнаружен срыв ламинарного режима истечения вязкой жидкости при малом числе Рейнольдса $Re = 430$, обусловленный кавитацией на острой кромке отверстия. При числах Рейнольдса $Re > 500$ начинается интенсивное пенообразование в свободной струе, обусловленное кромочной кавитацией, и сопровождаемое интенсивным выделением парогазовых пузырьков с их последующим дроблением при ударе струи о торцевую стенку отводящей камеры. Определено численное значение «жизненного» периода существования двухфазной смеси, равное в условиях атмосферного давления окружающего воздуха не менее 30 минут. Установлено, что кавитация в свободной и затопленной струе обусловлена не увеличением скорости в сжатом сечении струи, а особенностями обтекания периферийными струйками острой входной кромки отверстия. Рассмотрена электродинамика процесса истечения вязкой диэлектрической жидкости через отверстие малого диаметра с острой кромкой и подтверждено наличие ранее обнаруженных авторами статьи значительных по размаху высокочастотных электрических сигналов сложной формы. Результаты выполненных исследований могут быть учтены разработчиками дросселирующих элементов гидравлических устройств автоматики.

Ключевые слова: истечение жидкости через отверстие малого диаметра, кавитация на острой кромке отверстия, электродинамика процесса истечения жидкости через отверстие с острой кромкой при больших числах Re , пенообразование

Введение

Значительное число элементов и устройств гидроавтоматики, системы подачи топлива в тепловых двигателях, сварочные технологии, технология производства продуктов питания, процессы и аппараты химического производства и целый ряд других областей техники сталкиваются с необходимостью учета особенностей истечения вязких жидкостей и газов через круглые и некруглые отверстия и насадки [1].

Экспериментальные исследования в этой области знаний обеспечили большой объем информации, подготовили многочисленные справочные материалы и рекомендации по

учету особенностей движения жидкости в узких каналах малой протяженности. Эти особенности движения связаны с существенной зависимостью коэффициентов истечения от характера движения жидкости, ее типа и физико-химических свойств.

Наиболее существенное влияние на процесс истечения жидкости через отверстия и насадки оказывает характер движения жидкости – будет ли он ламинарным, или турбулентным, при этом характер напорного движения вязкой жидкости наиболее часто оценивается критерием подобия по Рейнольдсу.

Величина числа Рейнольдса (Re) весьма существенно зависит от размеров отверстия, через которое истекает жидкость. Большие значения числа Рейнольдса реализуются даже при небольших скоростях истечения маловязкой жидкости, например воды, через отверстия средних и больших размеров. Малые числа Рейнольдса могут быть получены только при истечении вязкой жидкости, например минерального масла, через отверстия очень малых диаметров (долей миллиметра). Например, режим ламинарного истечения воды при средней скорости движения 10 м/сек и числе $Re = 100$ будет реализован, если диаметр круглого отверстия составит 0,01 мм. Характер истечения жидкости при малых числах Re имеет значение в элементах и устройствах гидроавтоматики, обеспечивающих дросселирование вязкого минерального масла через узкие проходные сечения и зазоры.

Целью экспериментального исследования является расширенное изучение особенностей истечения минерального масла – основной рабочей жидкости для гидроприводов – через круглые отверстия малого диаметра, уточнение справочных данных по коэффициентам истечения, а также определение вероятности появления электрических процессов и светозлучения, как это было установлено в ранее проведенных исследованиях [2 ... 5].

Гидродинамика процесса истечения вязкой жидкости через отверстия малого диаметра

Расчетная схема истечения вязкой жидкости (минерального масла) через отверстие малого диаметра с острой входной кромкой, установленное в цилиндрической камере большого диаметра, представлена на рис. 1.

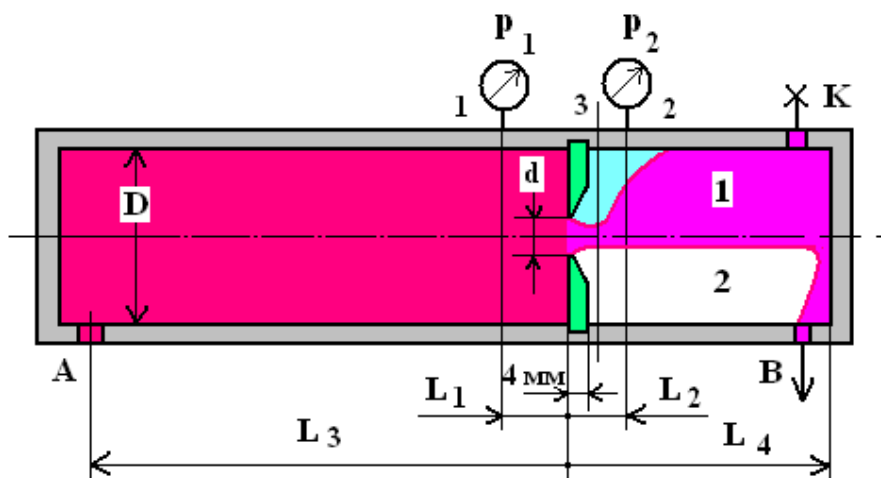


Рис. 1. Расчётная схема истечения вязкой жидкости через отверстие с острой кромкой.

Подвод А жидкости в камеру и ее отвод В из камеры, а также точки отбора давлений p_1 и p_2 расположены на достаточно большом удалении от входной острой кромки отверстия, что позволяет рассматривать потоки в соответствующих сечениях установившимися: $L_1 = 28d$; $L_2 = 10d$; $L_3 = 75d$ и $L_4 = 40d$, где $d = 0,9$ мм – диаметр отверстия с острой кромкой.

А. Свободная струя

Истечение жидкости через отверстие в газовую среду в режиме свободной струи происходит в случае, если пропускная способность отвода В значительно больше расхода струи, а выпускная камера соединена с атмосферой посредством крана К (нижняя половина рис.1).

Уравнение Бернулли, записанное для сечений 1 – 2 в избыточной системе единиц измерения давления, имеет вид

$$\frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = \alpha_2 \frac{V_{сж}^2}{2g} + \xi_{отв} \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

где ρ – плотность однофазной жидкости;

V_1 – осредненная скорость движения жидкости в подводящем канале диаметром $D = 22d$;

$V_{сж}$ – осредненная скорость движения жидкости в сжатом сечении струи;

V – осредненная скорость движения жидкости во входном сечении отверстия;

α_1, α_2 – коэффициенты неравномерности течения жидкости соответственно в сечениях 1 и 2;

$\xi_{отв}$ – коэффициент гидравлического сопротивления круглого отверстия с острой кромкой.

Примечание. В уравнении (1) и далее в размерности всех физических величин представлены в системе СИ.

Если истечение жидкости происходит с большим расходом, то наблюдается кавитация жидкости на острой кромке отверстия. Назовем ее условно *кромочной кавитацией* [2]. В жидкости в этом случае выделяются паровоздушные пузырьки, а содержимое струи будет представлять собой двухфазную смесь с плотностью $\rho_{см}$. Выражая в уравнении (1) скорости движения через массовый расход G и принимая ламинарным течение жидкости в подводящей камере ($\alpha_2 = 2$), получим

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{G^2}{g\rho^2 A^2} - \frac{G^2}{2g\rho_{см}^2 \epsilon^2 A_{отв}^2} - \frac{G^2 \xi_{отв}}{2g \rho_{см}^2 A_{отв}^2} = 0, \quad (2)$$

где A – площадь проходного сечения подводящего канала диаметром D ;

$A_{отв}$ – площадь проходного сечения отверстия диаметром d по входной кромке;

$\varepsilon = A_{\text{сж}}/A_{\text{отв}}$ – соотношение площадей сжатого сечения струи и отверстия, известный в литературе как **коэффициент сжатия струи** [2].

Преобразуем уравнение (2), приведя площади проходных сечений к площади проходного сечения отверстия:

$$G^2 \left(\frac{1}{\rho_{\text{см}}^2 A_{\text{отв}}^2 \varepsilon^2} + \frac{\xi_{\text{отв}}}{\rho_{\text{см}}^2 A_{\text{отв}}^2} - \frac{2}{\rho^2 A_{\text{отв}}^2 m^2} \right) = \frac{2p_1}{\rho}. \quad (3)$$

Здесь $m = A/A_{\text{отв}}$ – соотношение площадей проходных сечений подводящего канала и отверстия.

Из уравнения (3) установим связь между массовым расходом G и давлением p_1 в сечении подводящей камеры (*давлением истечения*):

$$G = \mu_m A_{\text{отв}} \sqrt{\frac{2p_1}{\rho}}, \quad (4)$$

где μ_m – коэффициент массового расхода свободной струи, определяемый выражением

$$\mu_m = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\rho_{\text{см}}^2 \varepsilon^2} + \frac{\xi_{\text{отв}}}{\rho_{\text{см}}^2} - \frac{2}{\rho^2 m^2}}}. \quad (5)$$

Если жидкость истекает через отверстие с острой кромкой в бескавитационном режиме (без выделения парогазовых пузырьков), то смесь имеет плотность однофазной жидкости $\rho_{\text{см}} = \rho$ и коэффициент массового расхода (5) примет вид

$$\mu_m = \sqrt{\frac{\rho^2}{\frac{1}{\varepsilon^2} + \xi_{\text{отв}} - \frac{2}{m^2}}}. \quad (6)$$

Б. Затопленная струя

Жидкость истекает через отверстие в режиме затопленной струи, если пропускная способность отвода B меньше расхода струи, а выходная камера изолирована от атмосферы (верхняя половина рис. 1). В этом случае уравнение Бернулли, записанное для сечений 1 – 2 в избыточной системе единиц измерения давления, имеет вид

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\xi_{\text{отв}}}{2g} V^2 + \frac{\xi_p}{2g} (V_{\text{сж}} - V_2)^2, \quad (7)$$

где $V_2 = V_k$ – осредненная скорость движения жидкости в сечениях подводящего и отводящего каналов камеры;

$\xi_p \leq 1$ – коэффициент гидравлических потерь при расширении потока в формуле Борда.

Выражая, как и прежде, скорости в уравнении (7) через массовый расход G , получим

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = 0,5 \xi_{\text{отв}} \left(\frac{G}{\rho A_{\text{отв}}} \right)^2 + 0,5 \xi_p \left(\frac{G}{\rho_{\text{см}} \varepsilon A_{\text{отв}}} - \frac{G}{\rho A_{\text{отв}} m} \right)^2. \quad (8)$$

В этом случае массовый расход G будет связан с перепадом давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ на отверстии выражением

$$G = \mu_m A_{\text{отв}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (9)$$

где μ_m – коэффициент массового расхода затопленной струи, соответствующий равенству

$$\mu_m = \sqrt{\frac{1}{\frac{\xi_{\text{отв}}}{\rho^2} + \xi_p \left(\frac{1}{\rho_{\text{см}} \varepsilon} - \frac{1}{\rho m} \right)^2}}. \quad (10)$$

Экспериментальное исследование процесса истечения вязкой жидкости через круглое отверстие малого диаметра

Для экспериментального исследования процесса истечения вязкой жидкости через круглое отверстие малого диаметра с острой кромкой был изготовлен прозрачный модуль, представленный на фото рис. 2.

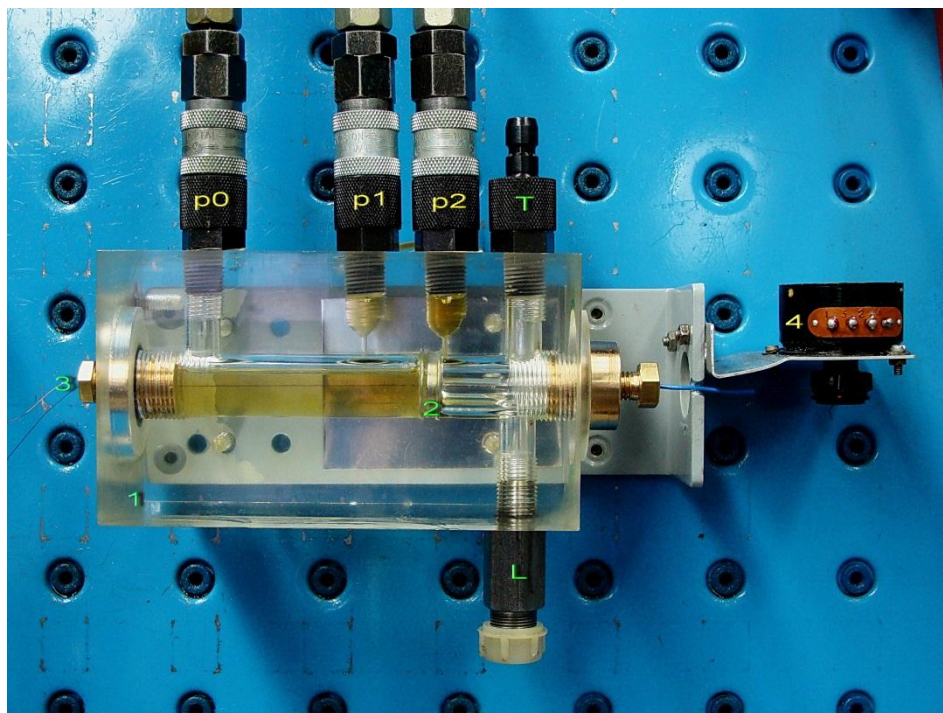


Рис. 2. Модуль для исследования процесса истечения жидкости через круглое отверстие малого диаметра с острой кромкой.

В прозрачном корпусе 1 из органического стекла выполнен канал диаметром $D = 20$ мм, в который встроена стальная шайба 2 с круглым отверстием диаметром $d = 0,9$ мм. Для исследования электрических процессов в потоке минерального масла вдоль оси канала натянута струна 3, выполненная из нихромовой эмалированной проволоки

диаметром $d_{пр} = 0,22$ мм. Струна проходит через уплотнения в корпусе модуля. На струне выполнена *метка* в виде зачистки эмаливой изоляции шириной

$\delta = 0,1$ мм, которая может протягиваться вдоль оси канала посредством натяжителя 4 с транспортом. Подвод минерального масла к камере производится через быстроразъемное соединение p_0 .

Для формирования свободной струи отвод жидкости из камеры модуля обеспечивается через дренажное быстроразъёмное соединение L при открытом в атмосферу сливе T (рис.2).

Затопленная струя образуется, когда отвод жидкости из камеры происходит через слив T при закрытом дренаже L.

Общий вид экспериментального стенда показан на фото рис. 3.

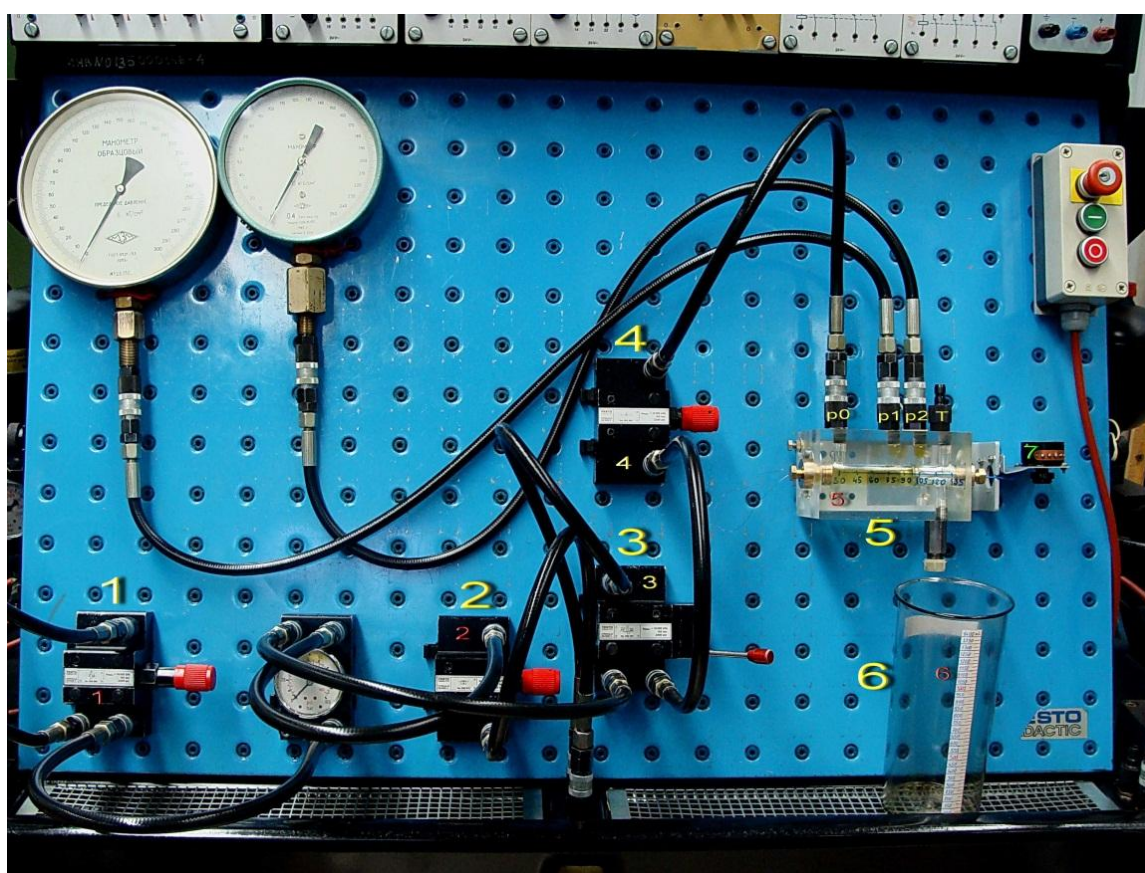


Рис. 3. Общий вид экспериментального стенда.

Питающая установка состоит из нерегулируемого объемного насоса с рабочей подачей $Q_n = 4$ л/мин, снабженного переливным клапаном 1. Тонкая настройка давления питания модуля при малых числах Рейнольдса $Re < 400$ обеспечивается регулируемым дросселем 2, включенным в линию байпаса насоса, и регулируемым дросселем 4, установленным на входе в модуль 5. Управление подачей минерального масла в модуль осуществляется гидравлическим распределителем 3. Для измерения массового и

объемного расходов минерального масла использовались мерный цилиндр 6, электронные весы и частотомер – хронометр. Уровни давлений p_1 и p_2 в подводящей и отводящей камерах модуля регистрировались образцовыми манометрами. Координаты расположения точек отбора давлений представлены на расчетной схеме рис. 1.

Исследование процесса истечения вязкой жидкости через круглое отверстие малого диаметра проводилось на минеральных маслах МГЕ10 и «Shell Tellus–20» с кинематической вязкостью $\nu_{25} = 30$ сСт. На графиках рис. 4 представлены экспериментально полученные значения коэффициентов массового μ_m и объемного $\mu_{об}$ расходов, где $\mu_{об} = \mu_m/\rho$, для свободной и затопленной струй.

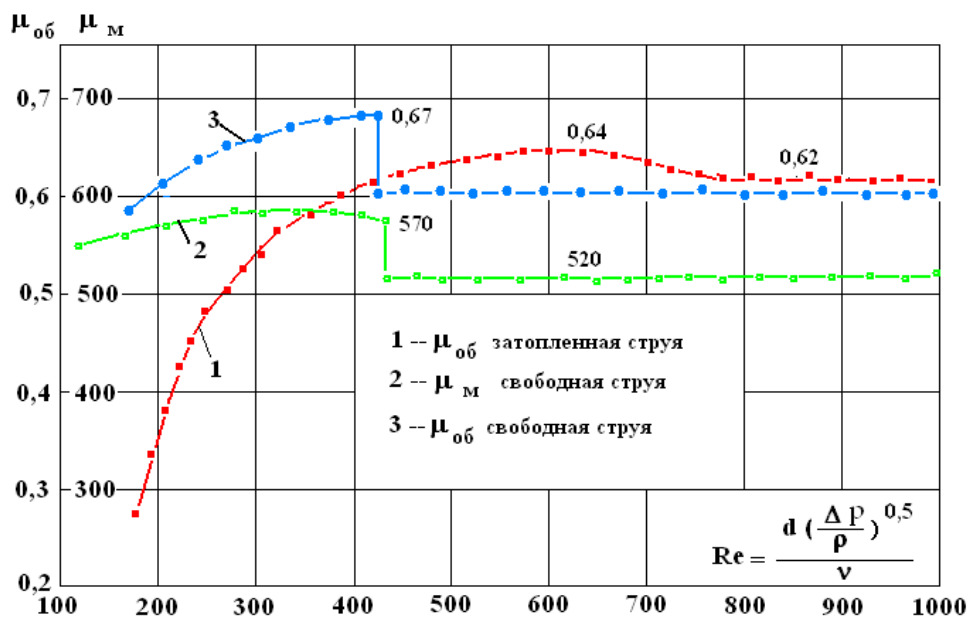


Рис. 4. Зависимость коэффициентов расхода μ_m и $\mu_{об}$ от числа Рейнольдса.

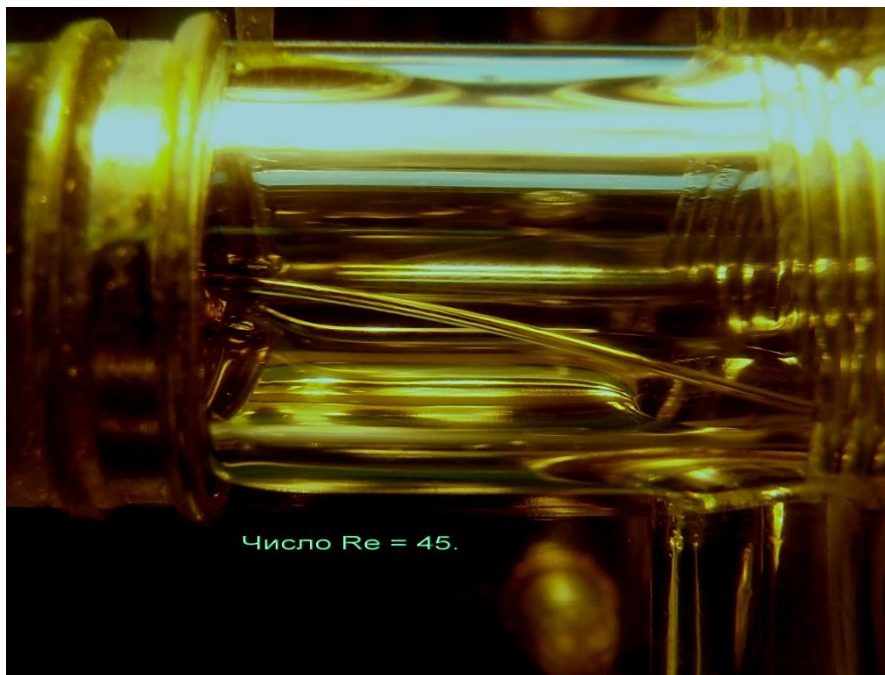
Значения числа Рейнольдса определялись через скорость истечения идеальной жидкости, определяемой по формуле Торичелли

$$V_{ид} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (11)$$

В процессе эксперимента был обнаружен срыв режима ламинарного процесса истечения при $Re \geq 430$, обусловленный началом кавитации на острой кромке отверстия. При дальнейшем увеличении скорости истечения начинается интенсивное пенообразование, причиной которого можно считать процесс кавитации с интенсивным выделением парогазовых пузырьков и их последующим дроблением при ударе свободной струи о торцевую стенку отводящей камеры.

На рис. 5. представлены фото свободной ламинарной (рис. 5а) и турбулентной струи (рис. 5б).

Покадровое фотографирование развития процесса пенообразования в короткой отводящей камере ($L_4 = 40d$, рис.1) показало, что после начала образования пены дальнейшее повышение давления истечения p_1 при недостаточной пропускной способности дренажа L приводит к интенсивному развитию «пенного кокона», обволакивающего свободную струю и вызывающего, впоследствии, ее затопление (рис. 6).



а) свободная ламинарная струя;



б) свободная турбулентная струя.

Рис. 5. Фото ламинарной и турбулентной струи в отводящей камере.



Рис.6. Турбулентная свободная струя в «пенном коконе».

На графике 3 рис. 4 видно, что после срыва ламинарного характера истечения свободной струи, увеличение размеров «пенного кокона» приводит к полному обволакиванию струи и ее затоплению. Это, в свою очередь, приводит к частичному выравниванию значений коэффициентов объемного расхода $\mu_{об}$ для свободной и условно затопленной струй.

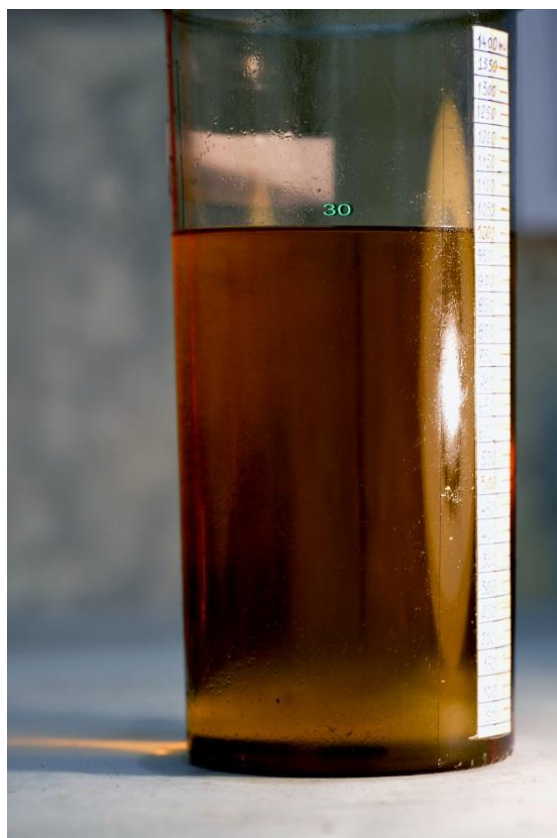
На фото рис. 7 показан «жизненный» период двухфазной смеси: естественная флотация пузырьков отсутствует (рис.7а), растворение пузырьков начинается в донной части мерного цилиндра (рис.7б), где весовое давление наибольшее. Через 30 минут (рис.7в) весь выделившийся воздух переходит в растворенное состояние, а пары минерального масла конденсируются.



а) исходное состояние двухфазной смеси;



б) растворение воздушных пузырьков в донной части мерного цилиндра через 10 минут после заполнения сосуда смесью;



в) полное растворение воздушных пузырьков через 30 минут после заполнения сосуда смесью.

Рис.7. «Жизненный» период двухфазной смеси.

При высокой скорости движения струи, увеличение длины отводящего канала до значения $L_4 = 240$ мм, путем установки дополнительного круглого патрубка не уменьшило интенсивность дробления струи при ее ударе о торцевую стенку отводящей камеры и пенообразование сохранилось.

Процесс пенообразования стал более интенсивным, когда при закрытом сливе Т (рис. 2) отводящая камера соединялась с атмосферой только через дренаж L.

Пена представляет собой двухфазную систему, в которой газ, являющийся диспергированной фазой, составляет достаточно большую часть объема системы. В работе [7] отмечено, что «углеводороды каждого класса, присутствующие в минеральном масле, мало склонны к образованию пен, но уже смеси этих углеводородов способны к вспениванию...», при этом чем выше вязкость, тем более стабильные пены они образуют. Стабильность пены зависит от прочности поверхностных пленок, образуемых вязкими маслами вокруг мельчайших пузырьков воздуха. При этом, к усилению пенообразования и повышению стабильности пены приводит наличие в минеральном масле поверхностно-активных веществ, к которым можно отнести антикоррозионные, противоизносные и моющие присадки.

Пенообразование определяется условиями, которые могут возникнуть при энергичном перемешивании минерального масла с воздухом, когда растворенный и

взвешенный в жидкости воздух, а также низкокипящие фракции многокомпонентной смеси выделяются из жидкости. Если предположить, что объем газа, находящийся в ограниченном объеме двухфазной смеси (минерального масла с нерастворенным воздухом), полностью перейдет в растворенное и мелкодисперсное нерастворенное состояние, то можно оценить процент газосодержания жидкости в ее исходном состоянии при атмосферном давлении, путем анализа соотношения объемов:

$$\Gamma = \left(\frac{W_{\text{см}} - W}{W} \right) \cdot 100\% . \quad (12)$$

Здесь $W_{\text{см}}$ – первоначальный объем смеси, измеряемый в течение 10 сек после наполнения мерного цилиндра; W – объем минерального масла после полного растворения мелкодисперсных пузырьков воздуха и конденсации паров (определяется через 30 минут после замера первоначального объема двухфазной смеси).

Результаты анализа показали, что при величине давления истечения $p_1 \leq 1800$ кПа можно принять $\Gamma = 6\% = 0,06$, а при $p_1 > 2000$ кПа, $\Gamma = 7,5\% = 0,075$. Таким образом, объем минерального масла W после полного растворения мелкодисперсных воздушных пузырьков и конденсации паров можно оперативно и с малыми затратами времени определять через первоначальный объем смеси $W_{\text{см}}$ с учетом соотношения

$$W = \frac{W_{\text{см}}}{1 + \Gamma} . \quad (13)$$

В соответствии с законом сохранения массы, плотность двухфазной смеси $\rho_{\text{см}}$ связана с объемом минерального масла W , его плотностью ρ , объемом двухфазной смеси $W_{\text{см}}$ и ее плотностью $\rho_{\text{см}}$, а также с объемом выделившегося из жидкости воздуха $W_{\text{возд}}$ и его плотностью $\rho_{\text{возд}}$ соотношением

$$\rho W + \rho_{\text{возд}} W_{\text{возд}} = \rho_{\text{см}} W_{\text{см}} ,$$

или с учетом равенства (13) – соотношением

$$\rho_{\text{см}} = \frac{\rho + \rho_{\text{возд}} \Gamma}{1 + \Gamma} . \quad (14)$$

Измеренная исходная плотность минерального масла при температуре $t = 24^{\circ}\text{C}$ составила $\rho = 845$ кг/м³. Если принять плотность воздуха при атмосферном давлении $p_{\text{атм}} = 745$ мм рт.ст., $\rho_{\text{возд}} = 1,3$ кг/м³, то для значения $\Gamma = 0,06$ плотность двухфазной смеси в соответствии с равенством (14) составит $\rho_{\text{см}} = 800$ кг/м³. Измеренная весовым способом плотность двухфазной смеси дала значение $\rho_{\text{см}} = 805$ кг/м³. Таким образом, экспериментальное и рассчитанное значение плотности через величину газосодержания Γ получились близкими.

Приведенные на рис. 4 графики зависимости коэффициентов расхода от числа Рейнольдса получены на минеральном масле МГЕ10. Замена этого масла минеральным маслом «Shell-Tellus 20» дала такие же значения, однако кавитация и процесс пенообразования начались при значении числа Рейнольдса $Re = 1000$, что в 2,5 раза превысило значение Re при аналогичных испытаниях минерального масла МГЕ10.

Интенсивность пенообразования и стабильность пены остались при этом практически неизменными.

В процессе обработки экспериментальных данных были построены графики (рис. 8) соотношения осредненной скорости движения жидкости во входном сечении отверстия, которую можно представить как пропускную способность отверстия

$$V = \frac{Q}{A_{\text{отв}}} = \mu_{\text{об}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (15)$$

и осредненной скорости струи в сжатом сечении

$$V_{\text{сж}} = \frac{V}{\varepsilon} = \frac{\mu_{\text{об}}}{\varepsilon} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (16)$$

где $\varphi = \mu_{\text{об}}/\varepsilon$ – коэффициент скорости.

Для оценки значения коэффициента объемного расхода графическим путем, представлена величина скорости истечения идеальной жидкости, определяемая по формуле (11). При подсчете значений скорости жидкости в сжатом сечении струи $V_{\text{сж}}$ была использована зависимость коэффициента сжатия струи от числа Рейнольдса $\varepsilon = \varepsilon(\text{Re})$, приведенная в работе [8].

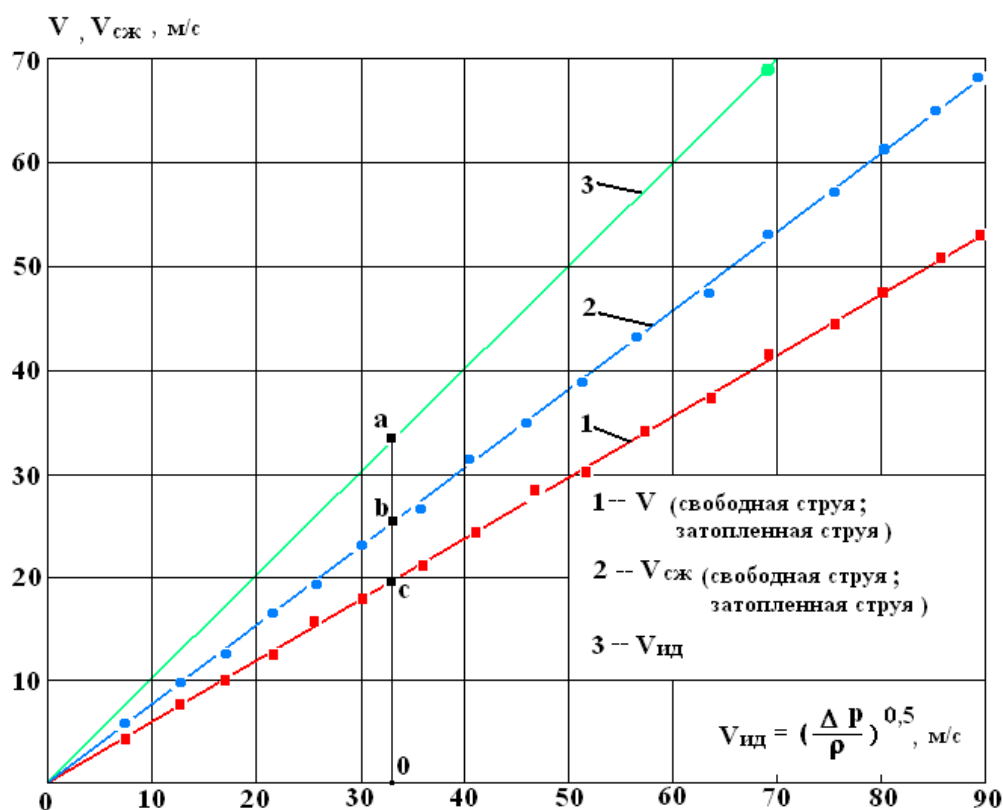


Рис.8. Значения скоростей движения жидкости в сечениях потока при истечении жидкости через круглое отверстие.

В соответствии с равенством (15) имеем

$$\mu_{об} = \frac{V}{\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}} = \frac{V}{V_{ид}}.$$

Таким образом, коэффициент объемного расхода $\mu_{об}$ можно рассматривать как отношение отрезков oc/oa (рис. 8), или как безразмерную осредненную скорость жидкости в сечении отверстия по острой кромке, отнесенную к скорости истечения идеальной жидкости, а коэффициент скорости φ - как отношение отрезков ob/oa или как безразмерную осредненную скорость жидкости в сжатом сечении струи, отнесенную к скорости истечения идеальной жидкости.

В качестве примера воспользуемся графиками рис. 8 для определения коэффициентов истечения затопленной струи:

– для $V_{ид} = 22$ м/сек, что соответствует числу $Re = 600$, соотношения отрезков дают $\mu_{об} = 0,634$ и $\varphi = 0,77$;

– в соответствии с графиком рис. 4, при том же значении $Re = 600$, имеем $\mu_{об} = 0,64$.

Экспериментально полученное значение коэффициента скорости $\varphi = 0,77$ несколько меньше величины, приведенной в работе [7] величины $\varphi = 0,81$.

Принимая нижеследующие исходные данные

$Re = 400$; $\rho = 845$ кг/м³; $\rho_{см} = 800$ кг/м³; $m = 22,2$; $m^2 = 494$; $\xi = 0,06$; $\varepsilon = 0,80$,
оценим адекватность зависимости (5) для свободной турбулентной струи с интенсивным пенообразованием.

Рассчитанное по формуле (5) значение коэффициента массового расхода $\mu_m = 620$ близко к экспериментальному значению $\mu_m = 580$, полученному из графика рис. 4 для $Re = 400$.

Используя формулу (10), определим значение коэффициента массового расхода μ_m для затопленной струи, добавив к исходным данным значение коэффициента расширения потока в формуле Борда $\xi_p = 1$: полученное расчетное значение $\mu_m = 630$ близко к экспериментальному значению $\mu_m = 620$ для свободной струи, что подтверждает равенство параметров истечения через круглое отверстие с острой кромкой для свободной и затопленной струй.

Установим возможную причину кавитации жидкости [9] в затопленной струе, для чего запишем систему уравнений Бернулли для сечений 1 – 3 и 3 – 2 (рис. 1), причем сечение 3 соответствует сжатому сечению струи на расстоянии $L = (2...3)d$ от плоскости входной кромки отверстия, тогда получим

$$\begin{cases} \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_3}{\rho_{см} g} + \alpha_3 \frac{V_{сж}^2}{2g} + \xi_{отв} \frac{V^2}{2g}, \\ \frac{p_3}{\rho_{см} g} + \alpha_3 \frac{V_{сж}^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \frac{\xi_p}{g} (V_{сж} - V_2)^2, \end{cases} \quad (17)$$

где, как и прежде, $V_1 = V_2$; $V_{сж}$ и V – соответственно осредненные скорости движения жидкости в подводящем и отводящем каналах, в сжатом сечении струи и во входном сечении отверстия.

Вычтем второе уравнение системы (17) из первого и запишем уравнение (18) относительно давления p_3 в сжатом сечении струи. Принимая $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$ (ламинарный поток в подводящем и отводящем каналах) и $\alpha_3 = 1$ (турбулентная струя), выражаем скорости через массовый расход G и получаем

$$p_3 = \frac{0,5 (p_1 + p_2) \rho_{см}}{\rho} + \frac{0,5 G^2 \rho_{см}}{A_{отв}^2} \left[\frac{2}{\rho^2 m^2} - \frac{1}{\rho_{см}^2 \varepsilon^2} - \frac{0,5 \xi_{отв}}{\rho_{см}^2} + 0,5 \xi_p \left(\frac{1}{\rho_{см} \varepsilon} - \frac{1}{\rho m} \right)^2 \right]. \quad (18)$$

В соответствии с экспериментальными данными, кавитация в *затопленной* струе начинается при следующих значениях, входящих в уравнение (18) величин:

$$p_1 = 590 \text{ кПа}; p_2 = 98,1 \text{ кПа}; G = 0,0114 \text{ кг/сек}; Re \ 1022 \text{ и } \varepsilon = 0,82.$$

Принимая значение площади отверстия $A_{отв} = 0,636 \text{ мм}^2$; $m = 22,2$; $\xi_{отв} = 0,06$; $\xi_p = 1$; $\rho = 845 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{см} = 800 \text{ кг/м}^3$, получим в соответствии с уравнением (18), $p_3 = 203 \text{ кПа}$.

Таким образом, в сжатом сечении устанавливается *избыточное* давление, и вынос в струю кавитационных паровоздушных пузырьков определяется только особенностями процесса огибания периферийными струйками острой входной кромки отверстия.

Свободная струя вытекает в отводящий канал с атмосферным давлением, следовательно, и в этом случае причиной кавитации является процесс огибания периферийными струйками острой входной кромки отверстия.

В работе [2] приводится одна из версий зарождения кавитационного тора при огибании периферийными струйками условно острой входной кромки диафрагменного дросселя. Если предположить равномерность движения жидкой частицы на участке огибания периферийной струйкой острой входной кромки отверстия 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 (рис. 9).

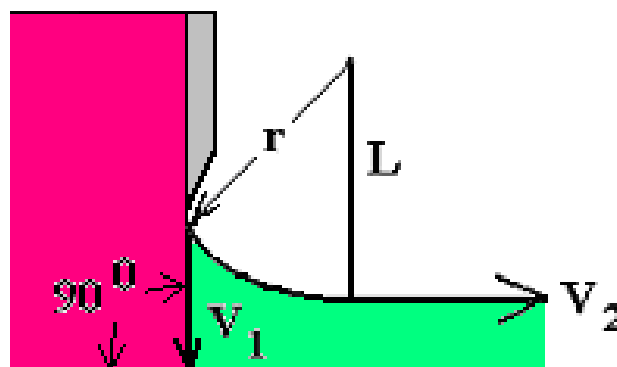


Рис. 9. Схема огибания периферийной струйкой острой входной кромки.

В этом случае ускорение направлено к центру окружности радиуса r перпендикулярно вектору скорости и рассматривается как нормальное центростремительное ускорение переносного движения

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{r}. \quad (19)$$

На частицу жидкости массой Δm , расположенную на периферийной струйке и огибающую острую кромку, в центре ее массы действует центробежная сила $F_{\text{цб}}$, направленная от центра окружности

$$F_{\text{цб}} = \frac{\Delta m v^2}{r}. \quad (20)$$

Удерживает частицу на траектории ее движения уравнивающая центростремительная сила $F_{\text{цс}}$, 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 (притягивающее усилие). Можно предположить, что при несмачиваемости стенки жидкостью, притягивающее усилие будет отсутствовать.

Объем частицы каплевой жидкости сферической формы радиусом R связан с ее массой и плотностью равенством

$$\Delta W = \frac{\Delta m}{\rho} = \frac{4}{3} \pi R^3. \quad (21)$$

В этом случае радиус R определяется выражением

$$R = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \Delta W} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi\rho} \Delta m}. \quad (22)$$

Если предположить равенство по модулю подпирающего и притягивающего усилий, то результирующая поверхностная сила, действующая на плоское диаметрально сечение сферы площадью

$$\Delta S = \pi R^2 = \pi \sqrt[3]{\left(\frac{3}{4\pi\rho} \Delta m\right)^2}, \quad (23)$$

будет определяться равенством

$$\frac{\Delta m v^2}{r} = 2\pi\rho \sqrt[3]{\left(\frac{3}{4\pi\rho} \Delta m\right)^2}. \quad (24)$$

Выражая из уравнения (24) величину давления p , которая в механике жидкости рассматривается как *интенсивность поверхностной силы*, получим

$$p = \frac{\Delta m v^2}{2\pi r \sqrt[3]{\left(\frac{3}{4\pi\rho} \Delta m\right)^2}}. \quad (25)$$

Подстановка в уравнение (25) среднего значения плотности минерального масла $\rho = 845 \text{ кг/м}^3$ определяет выражение для численной оценки интенсивности поверхностной силы

$$p = \frac{37 V^2 \sqrt[3]{\Delta m}}{r}. \quad (26)$$

В выражении (26) величина массы Δm не определена, поэтому целесообразно оценивать интенсивность поверхностной силы, приведенной к массе $\sqrt[3]{\Delta m}$:

$$\frac{p}{\sqrt[3]{\Delta m}} = \frac{37 V^2}{r}. \quad (27)$$

В табл.1 представлены величины интенсивности приведенной поверхностной силы, подсчитанные в соответствии с равенством (27) для конкретных значений r и V .

Таблица 1. Интенсивность приведенной поверхностной силы.

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

Данные табл. 1 показывают, что на частицу минерального масла, расположенную на периферийной струйке и огибающую острую входную кромку отверстия, может действовать достаточно большое по величине растягивающее усилие, которое может стать причиной, вызывающей *кромочную кавитацию*.

В соответствии с равенством (27) и табл.1, величина растягивающего усилия существенно зависит от остроты входной кромки, определяющей степень сжатия струи и радиус кривизны траектории. Например, уменьшение радиуса притупления кромки от 1 мм до 0,05 мм увеличивает интенсивность приведенной поверхностной силы в 20 раз.

Количественная оценка интенсивности растягивающего усилия дала следующие результаты:

1) $R = 0,1 \text{ мм}$; $\Delta W = 4,2 \times 10^{-12} \text{ м}^3$; $\rho = 860 \text{ кг/м}^3$; $\nabla m = 0,36 \times 10^{-8} \text{ кг}$; $\nabla m^{0,33} = 0,0016 \text{ кг}^{0,33}/\text{м}$. Для $r = 1 \text{ мм}$ и $V = 50 \text{ м/с}$: $p = 152 \text{ кПа}$; для $r = 0,5 \text{ мм}$ и $V = 50 \text{ м/с}$: $p = 304 \text{ кПа}$.

2) $R = 0,05 \text{ мм}$; $\Delta W = 0,52 \times 10^{-12} \text{ м}^3$; $\rho = 860 \text{ кг/м}^3$; $\nabla m = 0,045 \times 10^{-8} \text{ кг}$; $\nabla m^{0,33} = 0,00079 \text{ кг}^{0,33}/\text{м}$. Для $r = 1 \text{ мм}$ и $V = 50 \text{ м/с}$: $p = 75 \text{ кПа}$; для $r = 0,5 \text{ мм}$ и $V = 50 \text{ м/с}$: $p = 150 \text{ кПа}$.

Как было отмечено выше, для исследования электрических процессов в кавитирующем потоке минерального масла, вдоль оси прозрачного модуля была натянута струна из эмалированной проволоки диаметром $d_{\text{стр}} = 0,22 \text{ мм}$ с точечной зачисткой эмалевой изоляции для формирования метки.

Струна и шайба образуют кольцевое отверстие, истекая через которое струя подвергается *одностороннему сжатию*, поскольку со стороны струны жидкость граничит с цилиндрической поверхностью струны, а с другой стороны огибает острую кромку круглого отверстия диаметром $d = 0,9 \text{ мм}$. В этом случае площадь проходного сечения отверстия будет определяться равенством

$$A_{\text{отв}} = 0,785 (d^2 - d_{\text{стр}}^2), \quad (28)$$

а площадь сжатого сечения струи будет учитывать соотношение площадей сжатого сечения струи и отверстия ε :

$$A_{\text{сж}} = 0,785 (d^2 \varepsilon - d_{\text{стр}}^2). \quad (29)$$

Необходимо напомнить, что коэффициент сжатия струи является функцией числа Рейнольдса $\varepsilon = \varepsilon(\text{Re})$ [8]. Подсчитанные значения $A_{\text{сж}}$ и ε для кольцевого отверстия представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры сжатия струи в кольцевом отверстии.

Re	100	200	300	400	500	600	700	800	900
ε	0,95	0,91	0,895	0,88	0,865	0,85	0,84	0,83	0,82
$A_{\text{сж}}, \text{мм}^2$	0,566	0,541	0,531	0,521	0,512	0,502	0,496	0,489	0,483

Экспериментально полученные графики зависимости коэффициентов массового и объемного расходов минерального масла фирмы «Shell-Tellus 20» от числа Re представлены на рис. 10.

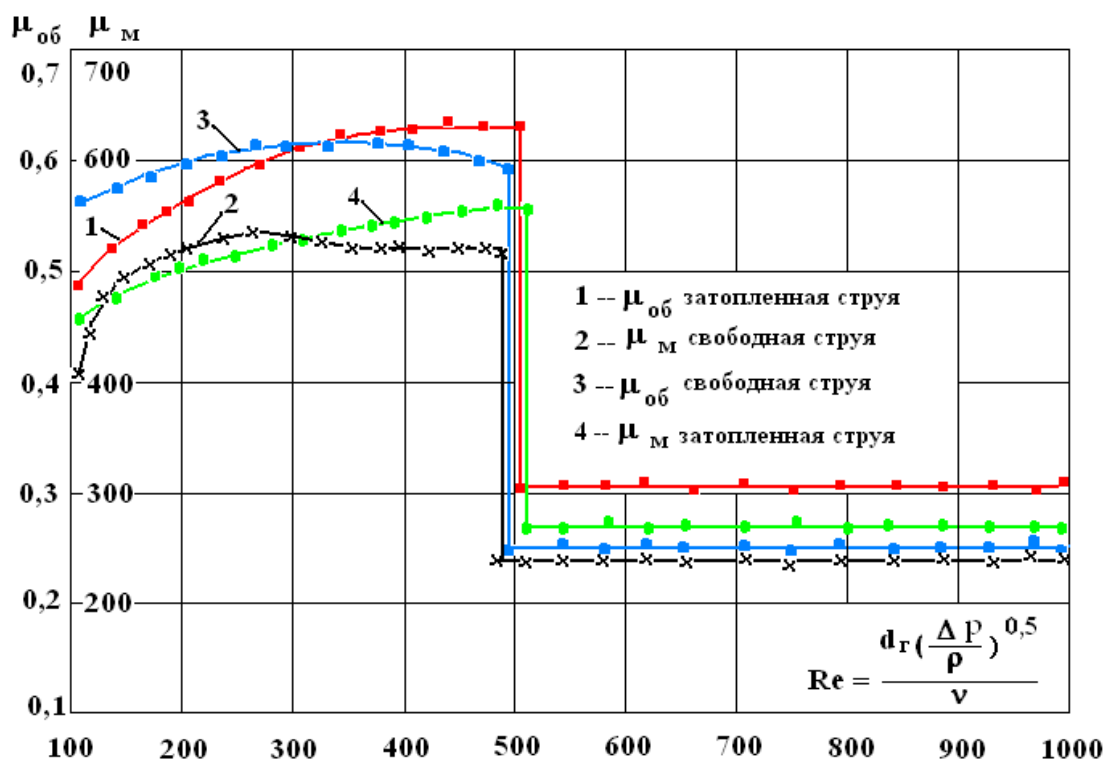


Рис. 10. Зависимость коэффициентов расхода от числа Рейнольдса.

Сравнительный анализ графиков рис. 10 и рис. 4 показывает, что срыв ламинарного характера истечения жидкости через круглое отверстие и через кольцевое отверстия с односторонним поджимом струи наступает при равных числах $\text{Re} = 450 \div 500$.

До срыва ламинарного характера истечения коэффициенты объемного и массового расхода *свободной* струи, истекающей через круглое отверстие, существенно превышают аналогичные коэффициент расхода кольцевого отверстия ($\mu_{об} = 0,67$; $\mu_{об} = 0,59$ и $\mu_m = 570$; $\mu_m = 520$ соответственно).

После срыва характера истечения при $Re \geq Re_{кр}$ уменьшение коэффициента объемного расхода *свободной* струи, истекающей через кольцевое отверстие, весьма существенно и принимает значение $\mu_{об} = 0,25$, по сравнению с уменьшением коэффициента объемного расхода круглого отверстия $\mu_{об} = 0,52$.

Логично предположить, что такие несоответствия значений коэффициентов расхода могут быть связаны с различием физико-химических свойств минеральных масел МГЕ-10 и «Shell- Tellus 20».

Графики соотношения осредненной скорости движения жидкости во входном сечении кольцевого отверстия $V = Q/A_{отв}$, осредненной скорости струи в ее сжатом сечении $V_{сж} = Q/A_{сж}$ и скорости истечения идеальной жидкости, рассчитанной по формуле (11), представлены на рис. 11.

Скорости истечения идеальной жидкости $V_{ид} = 22$ м/сек соответствует критическое значение числа $Re_{кр} = 500$. Полученные путем анализа отрезков из графиков рис.11, значения коэффициента объемного расхода $\mu_{об} = V/V_{ид}$, полностью соответствуют значениям $\mu_{об}$, полученным из графика рис.10.

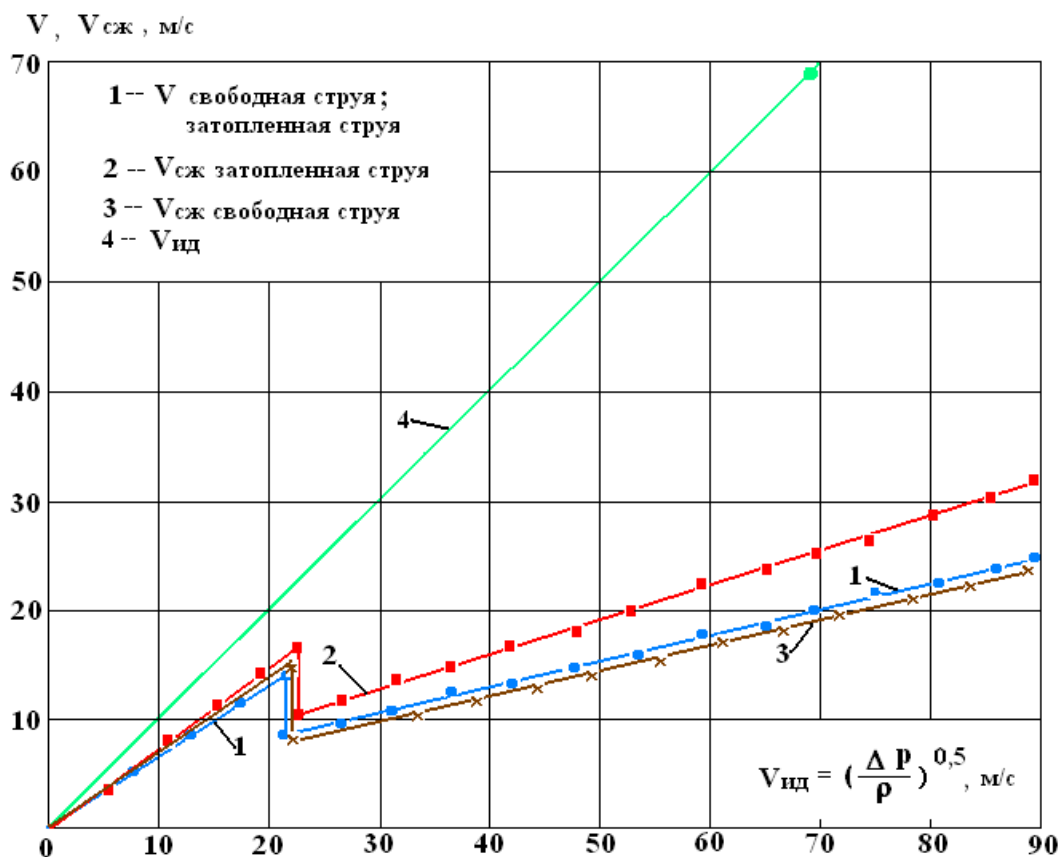


Рис. 11. Значения скоростей движения жидкости в сечениях по тока при истечении жидкости через кольцевое отверстие.

Электродинамика истечения вязкой жидкости через отверстие малого диаметра

В работах [2 ... 5] отмечается, что процесс движения диэлектрической жидкости в узких каналах дросселирующих устройств сопровождается значительными по размаху высокочастотными электрическими сигналами сложной формы.

В настоящей работе в целях исследования этих электрических процессов вдоль оси потока в прозрачном модуле было натянута струна из нихромовой эмалированной проволоки с выполненной на ней меткой, путем зачистки эмалевой изоляции шириной

$\delta = 0,1$ мм (рис. 2). Протяжка метки вдоль оси потока с фиксацией координаты метки с погрешностью не выше 0,1 мм позволила зондировать электрический потенциал в выбранном сечении потока. Для анализа формы, частоты и размаха электрических сигналов использовались электронно-лучевой осциллограф С1-83 и анализатор спектра Я40-0830.

В исследованиях [2, 3] показано наличие в кавитирующем потоке минерального масла интенсивного светозлучения в голубой части спектра. При истечении жидкости через круглое отверстие малого диаметра, выполненное в стальной пластине, светозлучение на острой кромке не наблюдалось.

Одной из возможных причин отсутствия светозлучения при наличии активных электрических процессов в сжатом сечении струи можно считать интенсивное пенообразование, изменившее условия, приводящие к светозлучению.

В упомянутых выше работах [2...5] диафрагменный дроссель с условно острой кромкой (90°) был выполнен из диэлектрика, поэтому на кромке мог накапливаться электрический потенциал, который инициировал светозлучение.

На металлической шайбе электрический потенциал может быть рассредоточен в объеме металла. Однако, это только предположения – вполне вероятно, что при более высоких скоростях движения жидкости через отверстие и, соответственно, при большей плотности заряда на острие кромки, светозлучение возникнет.

Спектральная характеристика электрических сигналов в одном из сечений модуля в режиме затопленной струи, наблюдаемая на экране анализатора спектра, представлена на фотографии рис. 12.

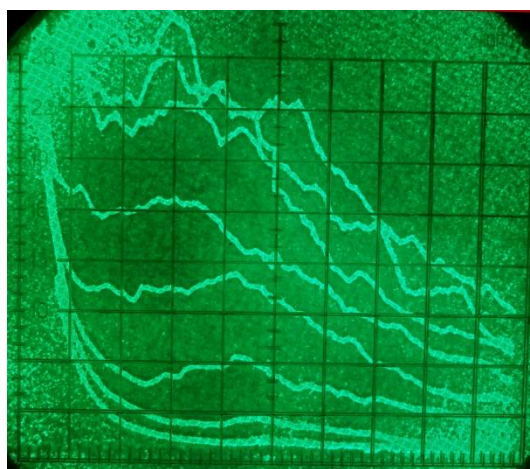
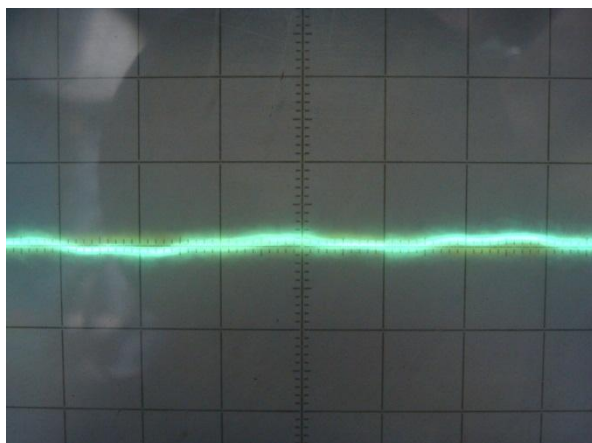


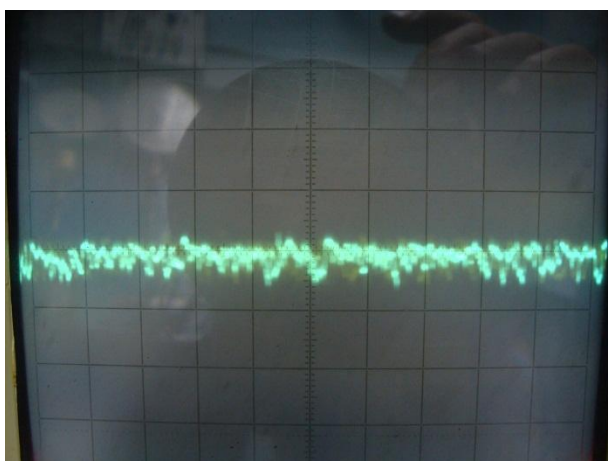
Рис. 12. Спектральная характеристика электрического сигнала.

Частотный спектр электрических сигналов лежит в диапазоне $D_f = 1,5 \dots 12$ кГц. На величину размаха электрического сигнала и его частотный спектр существенно влияет осредненная скорость движения жидкости в сечении потока и ее физико-химические свойства, в частности, корректирующие присадки.

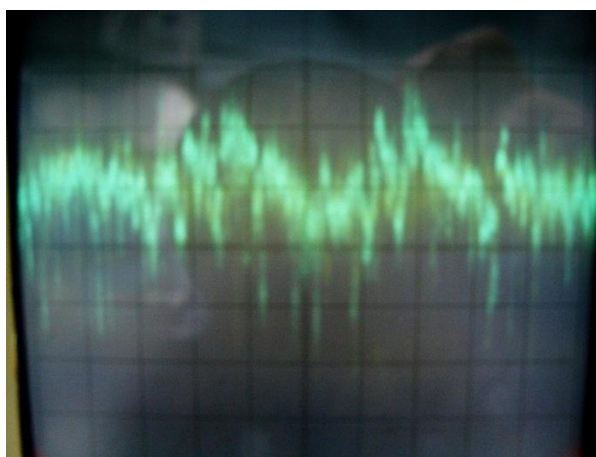
На фото рис. 13 представлена форма электрических сигналов в сечениях прозрачного модуля (номера сечений соответствуют рис. 1) .



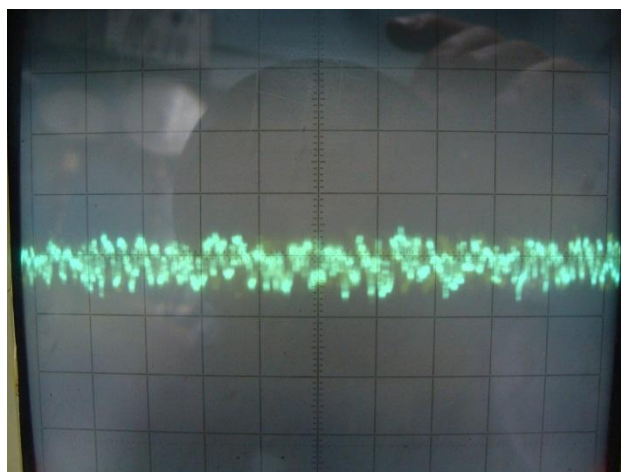
а) исходный фон электрического сигнала;



б) электрический сигнал в сечении №1;



в) электрический сигнал в сечении по острой кромке;



г) электрический сигнал в сечении №2.

Рис. 12. Формы электрических сигналов в сечениях прозрачного модуля.

Численные результаты осциллографирования электрических сигналов в сечениях турбулентного потока представлены на сводной диаграмме рис. 13.

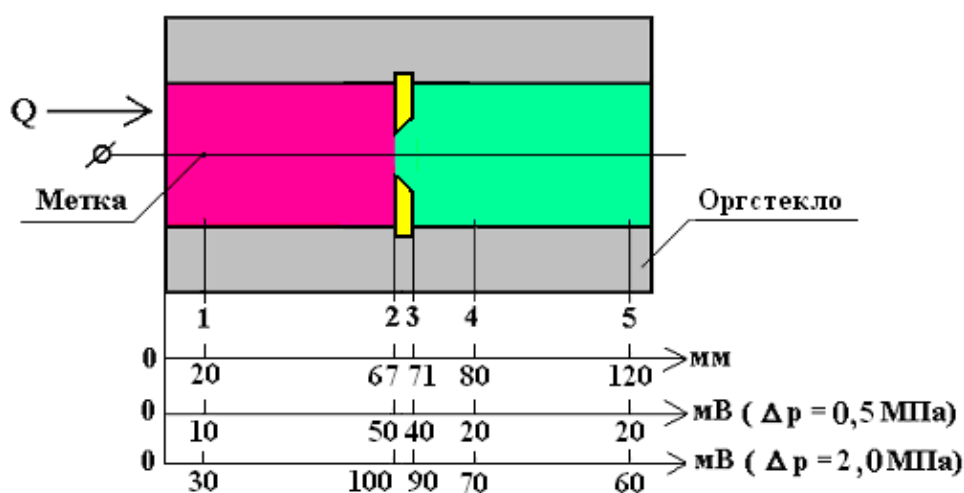


Рис. 13 Сводная диаграмма размаха электрических сигналов в сечениях потока.

Местонахождение метки в сечении потока определяется осью «мм». Размах электрического сигнала в заданном сечении при перепадах давлений $\Delta p = 0,5$ МПа и $\Delta p = 2,0$ МПа показан на осях «мВ».

Наибольший размах сигнала обнаружен в сечении по острой входной кромке отверстия, где образуется кавитационный тор [2] и зарождаются каверны. Наличие электрических сигналов в ламинарных потоках подводящего и отводящего каналов обнаружено также и в работе [1], что может быть обусловлено электризацией диэлектрической жидкости при ее движении по пластиковому рукаву от питающей

установки, несмотря на то, что быстроразъемные соединения p_0 и T были заземлены (рис. 2).

Электрокинетические свойства потока минерального масла в узких каналах и рабочая версия природы, наблюдаемых электрических процессов, подробно изложены в работах [4,5]. Суть происходящего в рассматриваемом случае заключается в следующем.

При движении вязкой диэлектрической жидкости с большой скоростью в узких каналах, при ее огибании острой кромки, образуется двойной электрический слой, обусловленный двумя физико-химическими механизмами – ориентационным и примесным.

При ориентационном механизме молекулы жидкости, имеющие ненулевой дипольный момент, располагаются на поверхности раздела твердой и жидкой сред, преимущественно одним концом в сторону жидкой фазы. Одновременно, при наличии кавитации на острой входной кромке отверстия, образуется двухфазная среда «нерастворенный воздух (с парами жидкости) – жидкость».

Примесный механизм обусловлен тем, что некоторые ионы примеси адсорбируются преимущественно вблизи поверхностей раздела двух сред «твердая стенка – жидкость» и «жидкость – газовая фаза».

На острой входной кромке отверстия в результате кавитации образуется постоянно обновляющийся тонкий слой паро-воздушных микропузырьков, локализованных на острие кромки. До момента наступления кавитационного разрыва сплошности жидкой среды были зарегистрированы электрические сигналы сравнительно небольшого размаха. Увеличение скорости потока на острой кромке вызвало возрастание амплитуды электрического сигнала и увеличение их частоты. Под влиянием потока в движение относительно поверхности раздела вовлекается не весь двойной ионный слой, а лишь некоторая его небольшая часть с координатой $X > X_c$, причем $X_c > d_0$ (здесь X_c – граница скольжения; d_0 – кинетический диаметр молекулы жидкости).

При условии $X < X_c$ заряды могут перемещаться только вместе с поверхностным слоем: именно они и образуют на поверхности раздела «жидкость – твердая стенка» (в данном случае на острой кромке) после «смывания» диффузного слоя нескомпенсированный электрический заряд, уносимый потоком жидкости. Электрический потенциал в сечении жидкости на расстоянии X_c от поверхности обычно называют ξ - потенциалом, величина которого мало зависит от материала твердой стенки, но очень сильно зависит от физико-химических свойств диэлектрической жидкости. Ослабление потенциала по мере удаления сечения потока от плоскости острой кромки обусловлено размыванием этих электрических зарядов в расширяющемся потоке жидкости.

Основные выводы по результатам исследования

- 1) Получены значения коэффициентов массового и объемного расходов вязкой многокомпонентной жидкости (минерального масла) при ее истечении через отверстия круглой формы при малых (до 100) значениях числа Рейнольдса.

- 2) Установлено наличие интенсивных кавитационных процессов на острой кромке отверстия (кромочная кавитация) с активным пенообразованием и выносом пены на большое удаление от зоны кавитации.
- 3) Обнаружен срыв режима процесса истечения жидкости через отверстие с острой кромкой в газовую среду с атмосферным давлением, в форме свободной струи и превращение ламинарной струи в турбулентную с интенсивным образованием вихревых шнуров.
- 4) Значение коэффициента объёмного расхода *круглого* отверстия с острой кромкой несколько превышает значение коэффициента расхода кольцевого отверстия с односторонним сжатием струи: уменьшение коэффициента объёмного расхода при срыве режима истечения через кольцевое отверстие более существенно.
- 5) «Жизненный» период двухфазной среды «жидкость – мелкодисперсный нерастворенный воздух» после интенсивного пенообразования достаточно длителен и составляет при атмосферном давлении не менее 30 минут.
- 6) Объёмное газосодержание двухфазной смеси после интенсивного пенообразования может достигать величины $\Gamma = 8\%$.
- 7) При этом практически весь объём мелкодисперсного нерастворенного воздуха
- 8) переходит в растворенное состояние и не выделяется в атмосферу.
- 9) Интенсивность пенообразования существенно возрастает при дроблении пузырьков кавитирующей струи о стенку-преграду.
- 10) Подтверждено наличие высокочастотных электрических процессов сложной формы и большой интенсивности при истечении диэлектрической жидкости через отверстие с острой кромкой в условиях кромочной кавитации.
- 11) Светоизлучение в сечении острой кромки стальной шайбы в условиях проведенных экспериментов не обнаружено.
- 12) Результаты проведенных исследований могут быть учтены разработчиками при проектировании дросселирующих элементов гидравлических устройств автоматики.

Список литературы

1. Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д. Особенности истечения жидкостей через отверстия некруглой формы // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 2. С. 1-23. DOI: [10.7463/0215.0758817](https://doi.org/10.7463/0215.0758817)
2. Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д. Светоизлучение и электрические процессы в кавитирующем потоке минерального масла // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 3. С. 31-62. DOI: [10.7463/0313.0535547](https://doi.org/10.7463/0313.0535547)
3. 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.

4. 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.
5. 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. Режим доступа:
<http://vestniken.bmstu.ru/catalog/phys/hidden/129.html> (дата обращения 01.12.2014).
6. Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Колдомасов А.И., Yang H.I., McConnell D.B., 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.
7. Папок К.К., Семенидо Е.Г. Моторные и реактивные масла и жидкости. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1963. 704 с.
8. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1982. 224 с.
9. Пильгунов В.Н. Исследование разрывной прочности минерального масла // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 5. С. 1-17. DOI:
[10.7463/0512.0370692](https://doi.org/10.7463/0512.0370692)
10. Deo R.C. Comparative Analysis of Turbulent Plane Jets from a Sharp-Edged Orifice, a Beveled-Edge Orifice and a Radially Contoured Nozzle // Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering. 2013. Vol. 7, no. 12. P. 1496-1505.
11. De Giorgi M.G., Ficarella A., Tarantino M. Evaluating cavitation regimes in an internal orifice at different temperatures using frequency analysis and visualization // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2013. Vol. 39. P. 160-172. DOI:
[10.1016/j.ijheatfluidflow.2012.11.002](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2012.11.002)

High Viscosity Liquid Flow through the Round Orifices at Small Reynold's Numbers

V.N. Pil'gunov^{1,*}, K.D. Efremova¹

* vnp41@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: flow process through small round orifice, cavitation on the sharp inlet edge, electrodynamic properties of the dielectric liquid stream through orifice, foaming

The paper presents research results of the mineral oil flow process with viscosity of 30 cSt through a round orifice with the sharp inlet edge of 0.9 mm in diameter. Pilot studies were conducted using a module from the transparent plexiglas that allowed to visualize hydrodynamic processes. The intake and off-take channels of the module with their sufficient extension had diameter of 20 mm (24 diameters of an orifice) that allows us to consider compression of a stream as perfect. Drawing the enameled nichrome wire with a mark as a stripping isolation of 0.1 mm width enabled sounding of electric processes in the stream sections. Intensive high-frequency electric processes were revealed in cavitation stream. The paper gives experimental values of coefficients of volumetric and mass flow at low ($150 < Re < 800$) Reynolds numbers in conditions of free jet and submerged orifice. Free jet at a speed exceeding 50 m/s strikes a wall, barrier, installed at a distance of 100 diameters of the orifice: the reflection from walls, barriers shot blast, which caused intense foaming and conversion of oil into the two-phase mixture "fluid- combined air." We investigate the "life cycle" of a two-phase mixture: flotation bubbles in a viscous medium, and there was no air passes completely evolved in the dissolved state in a time not exceeding 30 minutes. Volumetric analysis of the foam allowed us to estimate the percentage of volumetric gas content of oil, which was 9% at 24°C and atmospheric pressure of 97.5 kPa. An explanation of the possible cause cavitation edge at the end of a viscous fluid through an orifice with a sharp edge - appearance in fluid large tensile forces due to the centrifugal force on the particles of the fluid streams in passing peripheral sharp edge. Experimental research data flow of a viscous fluid in the annular orifice formed sharp edge and the surface of the string. Detected failure mode expiration free jet and conversion shareware transparent laminar jet in the turbulized intensive vortex formation cords. At a differential pressure of 0.5 MPa at the opening swing of the electrical signals reaching 100 mV and a width of the frequency range 1.2 ... 12 kHz. The publication refers to a number of fundamental works of "fluid mechanics", given in the bibliography for this article. The results can be taken into account in the design of throttling elements hydro devices.

References

1. Pil'gunov V.N., Efremova K.D. Features of the Viscous Fluids Effluent Through Non-round Shape Edge Orifices. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Educa-*

- tion of the Bauman MSTU, 2015, no. 2, pp. 1-23. DOI: [10.7463/0215.0758817](https://doi.org/10.7463/0215.0758817) (in Russian).
2. Pil'gunov V.N., Efremova K.D. Light emission and electrical process in the cavitating flow of mineral oil. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 3, pp. 31-62. DOI: [10.7463/0313.0535547](https://doi.org/10.7463/0313.0535547) (in Russian).
 3. Margulis M.A., Pil'gunov V.N. Luminescence and electrification in a flow of dielectric liquids through narrow channels. *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 2009, vol. 83, no. 8, pp. 1585-1590. (English version of journal: *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2009, vol. 83, no. 8, pp. 1414-1418. DOI: [10.1134/S0036024409080287](https://doi.org/10.1134/S0036024409080287)).
 4. Margulis M.A., Pil'gunov V.N. 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. (English version of journal: *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2009, vol. 83, no. 10, pp. 1789-1793. DOI: [10.1134/S0036024409100288](https://doi.org/10.1134/S0036024409100288)).
 5. Margulis M.A., Pil'gunov V.N. Mechanism of Luminescence and Electrification of Liquids Flowing Through Narrow Channels. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural science*, 2010, no. 1, pp. 64-79. Available at: <http://vestniken.bmstu.ru/catalog/phys/hidden/129.html>, accessed 01.12.2014. (in Russian).
 6. Kornilova A.A., Vysotskii V.I., Koldamasov A.I., Hyun Ik Yang, Desiatov A.V. Generation of intense directional radiation during the fast motion of a liquid jet through a narrow dielectric channel. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniia*, 2007, no. 3, pp. 55-60. (English version of journal: *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2007, vol. 1, iss. 2, pp. 167-171. DOI: [10.1134/S1027451007020103](https://doi.org/10.1134/S1027451007020103)).
 7. Papok K.K., Semenidov E.G. *Motornye i reaktivnye masla i zhidkosti* [Motor and jet oil and liquids]. Leningrad, Khimiya Publ., 1963. 704 p. (in Russian).
 8. Altshul' A.D. *Gidravlicheskie soprotivleniya* [Hydraulics resistance]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1982. 224 p. (in Russian).
 9. Pil'gunov V.N. Research of mineral oil bursting strength. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 5, pp. 1-17. DOI: [10.7463/0512.0370692](https://doi.org/10.7463/0512.0370692) (in Russian).
 10. Deo R.C. Comparative Analysis of Turbulent Plane Jets from a Sharp-Edged Orifice, a Beveled-Edge Orifice and a Radially Contoured Nozzle. *Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, 2013, vol. 7, no. 12, pp. 1496-1505.
 11. De Giorgi M.G., Ficarella A., Tarantino M. Evaluating cavitation regimes in an internal orifice at different temperatures using frequency analysis and visualization. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2013, vol. 39, pp. 160-172. DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2012.11.002](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2012.11.002)