

УДК 621.647.23

Зилинский А.И., асп., Луговской А.Ф., д.т.н., проф., Гришко И.А., к.т.н., доц.  
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ ПОВЫШЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Zilinskyi A., Lugovskoy A., Gryshko I.  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute» (zilinski@ukr.net)

### MATH MODEL OF FILTRATION IN AN ULTRASONIC FIELD OF INCREASED INTENSITY

*В работе рассмотрены физические процессы, что возникают при расположении фильтровальной перегородки в кавитационной среде, созданном ультразвуковым волной, интенсивность которой порог возникновения кавитации. Предоставлено аналитический анализ поведения кавитационного пузыря и частички загрязнителя в ультразвуковом поле, что предоставило возможность построить математическую модель процесса фильтрации в ультразвуковой среде. Предоставлены экспериментальные материалы распространения ультразвуковых волн в замкнутом объеме кавитационного фильтра.*

*Ключевые слова:* *фильтрация; ультразвуковая кавитационная обработка; ультразвуковое поле; ультразвуковая кавитация; кавитационная эрозия.*

Фильтрация технических жидкостей обеспечивает надежность и качество работы гидросистем и эффективность многих технологических процессов. Традиционно проблемы фильтрации жидкостей решаются с помощью центробежных фильтров [1], фильтров с сетчатыми или пористыми перегородками [1-4], фильтрами, создающими высокие относительные скорости перемещения фильтрующей перегородки и загрязненной жидкости, например, за счет быстрого вращения в жидкости цилиндрической фильтровальной перегородки [5].

Недостатками указанных способов фильтрации является либо малая грязеемкость при требуемой высокой степени фильтрации, приводящая к быстрому засорению фильтроэлемента и, как следствие, росту перепада давления на нем, либо необходимость в периодической механической очистке фильтроэлемента с помощью противодавления или с помощью периодически вращающихся ножей, прочищающих пазы щелевых фильтроэлементов, или низкочастотных вибрационных электроприводов, обеспечивающих периодическое или непрерывное сбрасывание осадка с фильтрующей перегородки [6].

Известен однако способ фильтрации жидкости в ультразвуковом поле, интенсивность которого обеспечивает возникновение в жидкости кавитации и сопутствующих ей вторичных явлений, таких как акустическая турбулентность, дегазация, микротечения, ударные волны, кумулятивные микроструи и т.д. [7-10]. Известно несколько вариантов реализации способа фильтрации в ультразвуковом поле - с использованием фильтровальной перегородки или без нее, в поле, образованном стоячей ультразвуковой волной, бегущей ультразвуковой волной в диффузном ультразвуковом поле [10]. В случае использования варианта фильтрации в ультразвуковом поле стоячей волны корпус фильтра выполняется резонансным с размерами, кратными  $\frac{1}{2}$  длины волны ультразвуковых колебаний в очищаемой жидкости.

Целью статьи является создание физической модели процесса фильтрации в ультразвуковом поле стоячей волны.

В случае излучения в воду плоской звуковой волны частотой 22 кГц среднего уровня интенсивности, при котором кавитационные явления уже присутствуют, но еще слабо выражены, вдоль прозрачного стакана с резонансным продольным размером, получаемая форма поля, представлена на рис.1. Из рис. 1 следует, что на излучающей поверхности ультразвукового преобразователя еще отсутствует двухфазная кавитационная прослойка, приводящая к поглощению и рассеиванию ультразвуковой энергии. Вдоль стакана установилась стоячая волна деформации, в пучностях которой скапливаются кавитационные пузырьки. Расстояние между прослойками пузырьков равно  $\frac{1}{2}$  длинны волны. Пузырьки образуются вследствие периодического сжатия и разряжения в звуковой волне деформации.

Кавитационные пузырьки образуются из зародышей кавитации, в качестве которых могут выступать не смачиваемые твердые частички, нерастворенные газы, микропузырьки нерастворенных газов, находящиеся в

микротрещинах на не смачиваемых твердых, граничащих с жидкостью, поверхностях, и т.д. Кавитационные парогазовые пузырьки увеличиваются в размерах в фазе разрежения и схлопываются в фазе сжатия звуковой волны после совершения одного или нескольких колебаний [11].

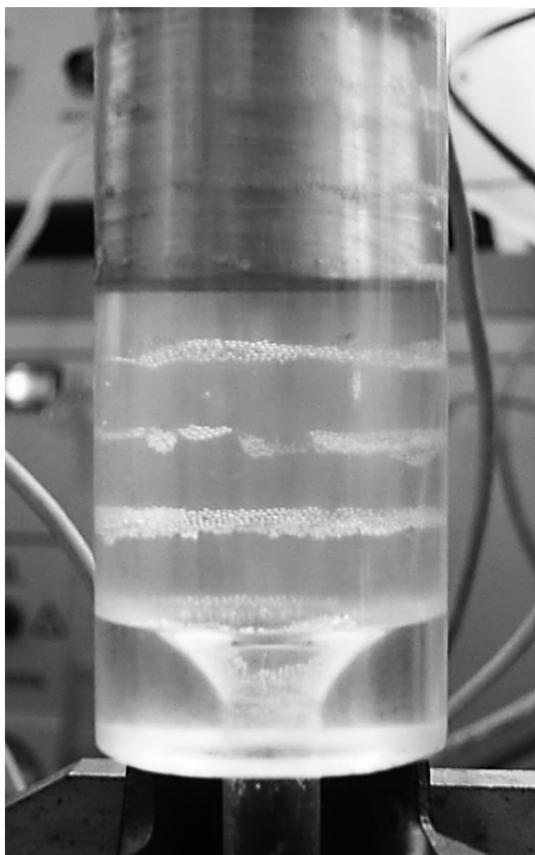


Рис. 1. Ультразвуковое поле плоской стоячей волны в технологическом объёме

Минимальный размер зародышей, способных возбудить ультразвуковую кавитацию, должен быть выше критического размера [11, 12]

$$R_{kp} = \sqrt{3}R_0 \left[ \frac{R_0}{2\sigma} \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения;  $R_0$  - начальный радиус пузырька;  $p_0$  - гидростатическое давление. Приведенное выражение справедливо при условии, что давление насыщенных паров пренебрежимо мало по сравнению с амплитудным звуковым давлением.

Максимальный размер зародышей, способных возбудить ультразвуковую кавитацию, соответствует их резонансным размерам, при которых их собственная частота равна частоте вводимой в жидкость звуковой волны. Резонансный размер зародыша и частота колебаний связаны зависимостью [11, 12]

$$(2\pi f)^2 = \frac{3\gamma_a}{\rho R_{рез}^2} \left( p_a + \frac{2\sigma}{R_{рез}} \right), \quad (2)$$

где  $f$  - частота звуковых колебаний;  $R_{рез}$  - резонансный размер зародыша;  $\gamma_a$  - показатель адиабаты;  $\rho$  - плотность невозмущенной жидкости;  $p_a$  - звуковое давление, создаваемое звуковым полем. В стоячей звуковой волне парогазовые пузырьки, имеющие размеры меньше  $R_{рез}$ , пульсируют в фазе с колебаниями давления и смещаются к пучностям давления, а при размерах, превышающих  $R_{рез}$ , перемещаются к узлам давления. Скорость движения пузырьков определяется зависимостью [13]

$$v_{пер.пуз} = \frac{R_0^2}{10\mu \left( p_0 + \frac{4\sigma}{3R_0} \right)} p_a \frac{\partial p_a}{\partial x}, \quad (3)$$

где  $\mu$  - коэффициент вязкости жидкости;  $x$  - пространственная координата.

Трансляционное движение пузырьков к узлам давления стоячей звуковой волны приводит к коагуляции пузырьков в этих зонах, т.е. увеличению их размеров. Такие крупные пузырьки, находясь в зоне с практически нулевым звуковым давлением, не схлопываются. Именно такие прослойки пузырьков и наблюдаются визуально на экспериментальных фотографиях звукового поля плоских стоячих волн (рис. 1 и рис. 2б). Тестовая алюминиевая фольга, размещенная в кавитационной камере нормально к излучающей поверхности ультразвукового преобразователя, показывает отсутствие кавитационной эрозии фольги в плоскостях, соответствующих узлам давления в стоячей волне (рис. 2б).

В пучностях волны давления, где собираются пузырьки размером менее  $R_{рез}$ , вследствие чередования фаз сжатия и разрежения пузырьки, совершив одно или несколько переколебаний и накопив при этом энергию, схлопываются с образованием ударных волн, которые приводят к эрозионному разрушению тестовой фольги (рис. 2б). Испытательная фольга на рис. 2б дополнительно показывает, что максимальная интенсивность эрозионного разрушения наблюдается вблизи излучающей поверхности ультразвукового преобразователя. По мере удаления пучностей давления от излучающей поверхности интенсивность кавитационной эрозии уменьшается, что объясняется потерями ультразвуковой энергии при прохождении волны через двухфазные кавитационные прослойки, поглощающие и рассеивающие ультразвуковую энергию [14].

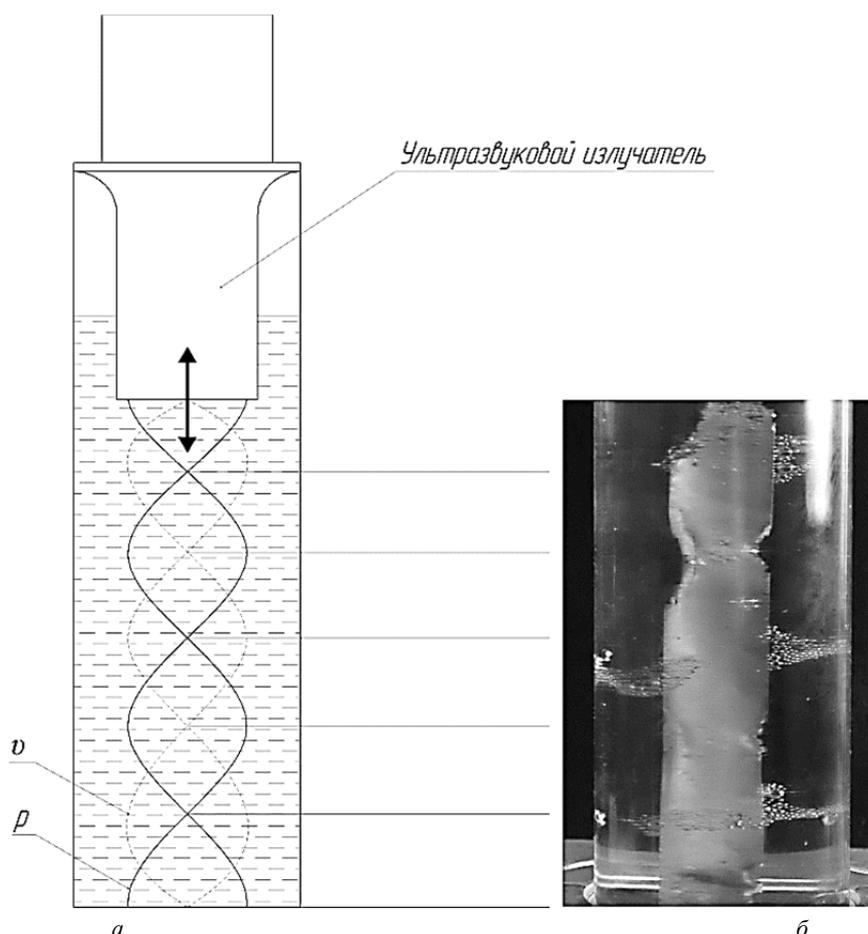


Рис. 2. Схема размещения ультразвукового поля плоской стоячей волны (а) и фотография кавитационной эрозии тестовой алюминиевой фольги в местах, соответствующих пучностям давления (б)

Взвешенная частица загрязнителя жидкости, оказавшись возле кавитационного пузырька, испытывает либо воздействие потока жидкости от движущихся с большой скоростью стенки пузырька, либо воздействие ударной волны при схлопывании пузырька. Для случая сферической формы частицы загрязнителя уравнение ее движения в жидкости может быть представлено в виде [15, 16]

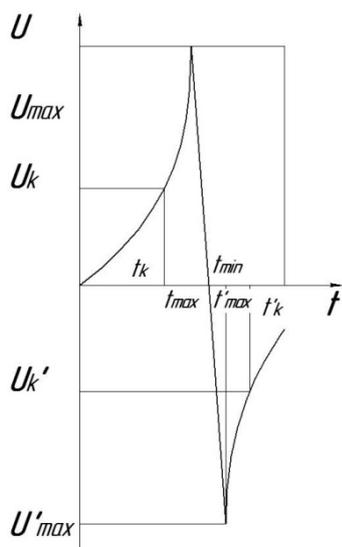


Рис. 3. Характер изменения скорости движения стенки кавитационного пузырька в фазе сжатия и фазе расширения

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{\pi K_{\text{сопр}}}{8} \rho d^2 (U - v)^2, \quad (4)$$

где  $m$  - масса частицы загрязнителя;  $v$  - скорость движения частицы;  $U$  - скорость движения стенки кавитационного пузырька;  $K_{\text{сопр}}$  - коэффициент лобового сопротивления;  $d$  - диаметр частицы.

Согласно данным работы [17] характер изменения скорости движения стенки кавитационного пузырька имеет вид, представленный на рис. 3. Из рисунка следует, что сжатие пузырька происходит по закону, близкому к экспоненциальному. Резкий рост скорости начинается с некоторого критического значения  $U_k$ . Достигнув значения  $U_{\text{max}}$  при уже минимальном размере пузырька, скорость падает до 0. По данным работы [18] характер изменения скорости стенки кавитационного пузырька в фазе расширения является симметричным отражением фазы сжатия.

Для случая образования кавитационного пузырька в вязкой сжимаемой жидкости при введении в нее ультразвуковой волны скорость движения стенки пузырька можно описать уравнением Херринга-Флинна [19, 20]

$$\begin{aligned}
 & R \left( 1 - \frac{2U}{c_p} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{4U}{3c_p} \right) \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \\
 & + \frac{1}{\rho} \left[ p_0 - p_n - p_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu U}{R} + \right. \\
 & \left. + \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] \\
 & + \frac{RU}{\rho c_p} \left( 1 - \frac{U}{c_p} \right) \frac{dp(R)}{dR} = 0,
 \end{aligned} \tag{5}$$

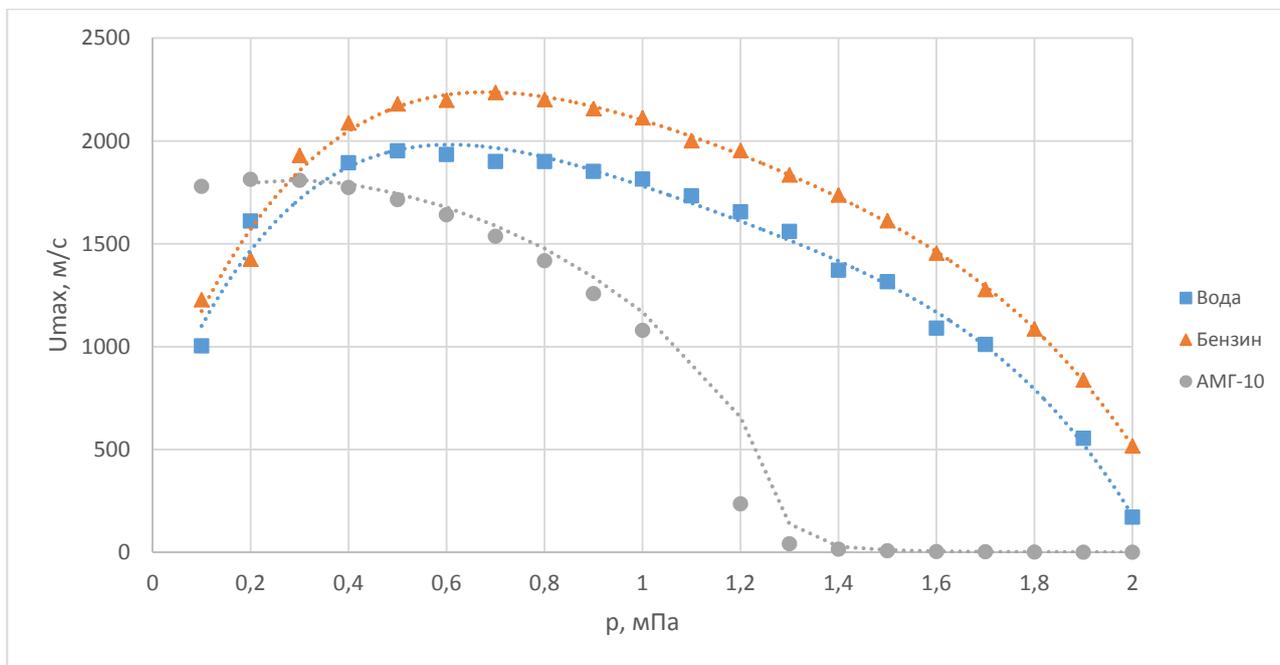
где  $p_n$  - давление пара;  $U = \frac{dR}{dt}$  - скорость схлопывания пузырька;  $c_p$  - скорость звука в невозмущенной жидкости;  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота искомых колебаний;  $\gamma$  - показатель политропы.

Решение уравнения (5) для случая образования кавитационного пузырька проведено при значениях, показанных на табл.1. Результаты расчета представлены в виде графических зависимостей на рис.4

Таблица 1

**Начальные значения, использованные при моделировании динамики кавитационного пузырька**

	$f, \text{кГц}$	$t, \text{°C}$	$\mu, \frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\sigma, 10^{-3} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$p_0, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$p_n, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$p_a, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$R_0, \text{м}$
Вода	22	20	0,001	1000	74	$4 \cdot 10^6$	2300	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
Бензин	22	20	0,0005	750	21	$4 \cdot 10^6$	66000	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
АМГ-10	22	20	0,51	850	28,9	$4 \cdot 10^6$	-	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$



**Рис. 4. Зависимость скорости движения стенки кавитационного пузырька в фазе сжатия от статического давления в жидкости**

Считая движение стенки кавитационного пузырька на участке  $t_{max} - t_k$  равноускоренным, уравнение (4) можно переписать в виде

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\pi K_{comp} \rho d^2}{8m} (at - v)^2, \quad (6)$$

где  $K_{comp} = 0,8$ ;  $a$  - ускорение движения частицы загрязнителя.

Интегрируя полученное выражение, а пределах от 0 до  $t_{max} - t_k$ , получим [15]:

$$v = a\tau + \sqrt{\frac{a}{A}} \cdot \frac{1 - e^{2\sqrt{aA}\tau}}{1 + e^{2\sqrt{aA}\tau}}, \quad (7)$$

где  $\tau = t_{max} - t_k$ ;  $A = \frac{\pi K_{comp} \rho d^2}{8m}$ . Результаты расчета скорости движения частицы загрязнителя, находящейся возле стенки пульсирующего кавитационного пузырька, выполненные по выражению (7), представлены в виде графиков на рис.5. Полученные результаты свидетельствуют о возможности достижения частицами загрязнителя сверхзвуковой скорости перемещения в жидкости.

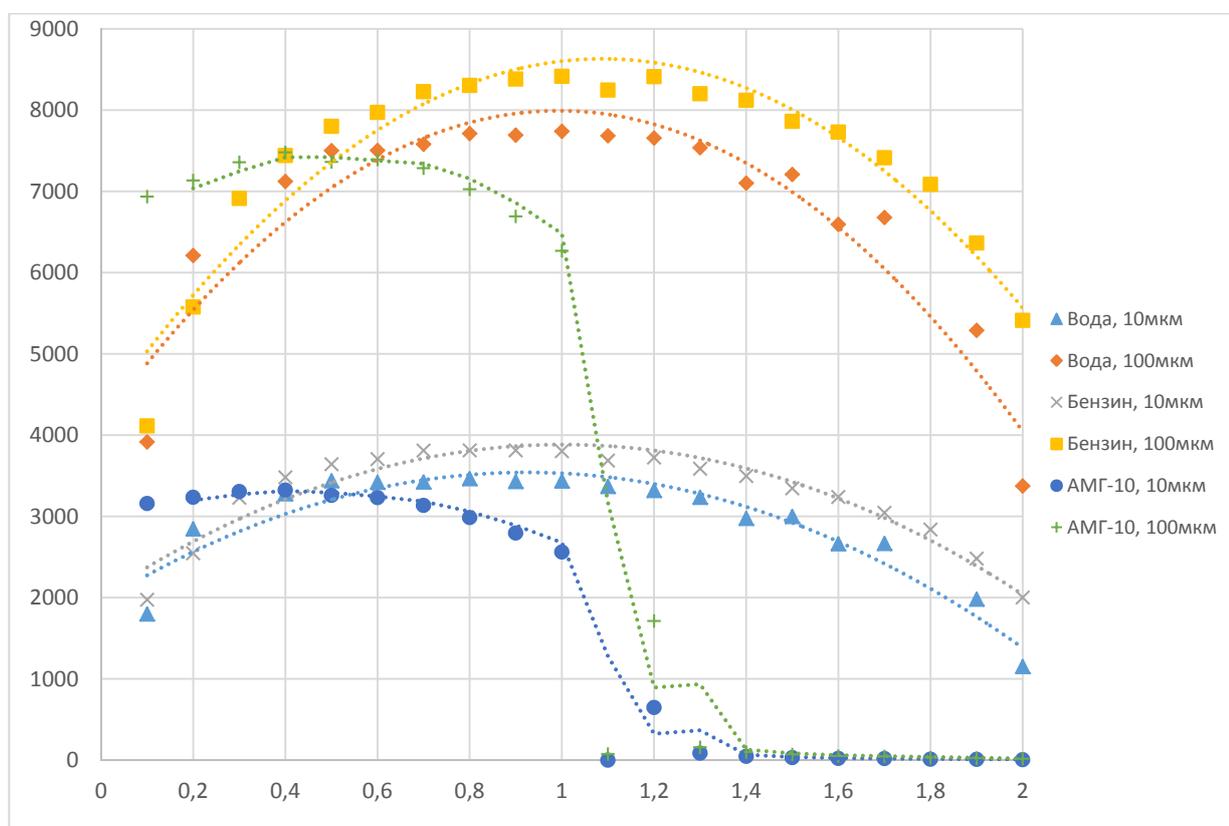


Рис. 5. Зависимость скорости движения частиц загрязнителя различной массы и размеров, находящихся в кавитационной среде возле стенки пузырька

В предположении постоянства скорости движения стенки кавитационного пузырька и ее равенстве среднearифметическому значению, можно определить путь, который частица загрязнителя пройдет, на участке  $t_{max} - t_k$ , со сверхзвуковой скоростью, записав уравнение (4) в виде [16]

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A \left( U - \frac{dx}{dt} \right)^2, \quad (8)$$

Проинтегрировав уравнение (8), получим

$$x = \frac{1}{A} [UA\tau - \ln(1 + UA\tau)], \quad (9)$$

Результаты расчета величины перемещения частицы загрязнителя, находящейся возле стенки схлопывающегося кавитационного пузырька, в зависимости от размеров частицы и статического давления сведены в табл.1. [16]

Таблиця 2

**Зависимость величины перемещения частицы загрязнителя, находящейся возле стенки захлопывающегося кавитационного пузырька, от размеров частицы и статического давления**

Диаметр частицы, мкм	Статическое давление МПа	Смещение в воде, мкм	Смещение в бензине, мкм	Смещение в АМГ-10, мкм
10	0,1	41,279702	74,60884	38,5649
	0,5	39,107835	54,17943	25,67424
	1	22,328168	34,98349	6,970632
	1,5	5,675779	14,38415	6,211486
	2	41,327390	0,641432	0,125832
100	0,1	6,026788	12,21081	5,565946
	0,5	5,657538	8,309672	3,480699
	1	2,969696	4,969105	0,821381
	1,5	0,658521	1,813939	0,725461
	2	6,034946	0,067504	0,012873

Анализ полученных расчетных значений величины перемещения частицы загрязнителя в кавитационной области ультразвукового поля значительно превышает размеры пор фильтрующей перегородки, которые в фильтрах тонкой очистки составляют 5...20 мкм. Колебательные движения этих частиц не позволяют загрязнителю проникнуть через поры фильтра. Этот эффект иногда называют эффектом «пьяной» частицы. Соударяясь между собой, колеблющиеся частицы коагулируют и оседают в грязесборник фильтра. Проникнуть через поры фильтра такие укрупненные частицы не могут. Соударения таких, интенсивно колеблющихся, частиц с фильтровальной перегородкой, сферические ударные волны от захлопывающихся в кавитационной области пузырьков и высокоэнергетические кумулятивные струи, возникающие при захлопывании кавитационных пузырьков вблизи поверхности фильтровальной перегородки, приводят, помимо кавитационной эрозии фильтровальной перегородки, к возбуждению в ней ультразвуковых колебаний. Эти колебания существенно снижают поверхностное трение жидкости в порах фильтровальной перегородки, что приводит к повышению производительности фильтра при прочих равных условиях. Нахождение фильтровальной перегородки в кавитационной среде обеспечивает ей, за счет сопутствующих кавитации эффектов, практическую незасоряемость.

Использование фильтровальных перегородок из кавитационно стойких материалов позволяет на базе рассмотренной технологии создать фильтры, отличающиеся высокими эксплуатационными характеристиками.

**Анотація.** В роботі розглянуто фізичні процеси, що виникають при розміщенні фільтрувальної перегородки в кавітаційному середовищі, утвореному ультразвуковою хвилею, інтенсивність якої перевищує поріг виникнення кавітації. Надано аналітичний аналіз поведінки кавітаційної бульбашки та частинки забруднювача в ультразвуковому полі, що дало можливість побудувати математичну модель процесу фільтрування в ультразвуковому кавітаційному середовищі. Наведені експериментальні матеріали розповсюдження ультразвукових хвиль в замкненому об'ємі кавітаційного фільтра.  
**Ключові слова:** фільтрування; ультразвукова кавітаційна обробка; ультразвукове поле; ультразвукова кавітація; кавітаційна ерозія.

**Abstract. Purpose.** Filtration of liquid may be increased by ultrasonic cavitation. Aim of article is creation of math model of filtration in a standing ultrasonic field.

**Design/methodology/approach.** Using equation of Herring-Flynn has allowed us to calculate velocity of the wall of bubble, which provided an opportunity to calculate the speed and movement of the pollutant particles in an ultrasonic field in the destruction of the cavitation bubble.

**Findings.** The analysis of the calculated values show that fluctuations of contaminants in the field of ultrasonic cavitation field is much larger than the filter pore walls, which in fine filters are 5 ... 20 microns.

**Originality/value.** This paper can explain theory of so called "drunken" parts in ultrasonic fields, however next step is practice realisation.

**Keywords:** filtration; ultrasonic cavitation treatment; ultrasound field; ultrasonic cavitation; cavitation erosion.

**Библиографический список использованной литературы**

1. Белянин П.Н., Черненко Ж.С. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем.- М: Машиностроение, 1964.- 293 с.
2. Абрамов Е.И., Колесниченко К.А., Маслов В.Т. Элементы гидропривода. - К. : "Техніка", 1977

3. Патент Японии №61129012, МПК В01D 24/26, опубл. 17.06.86 г.
4. А.С. №504542, МПК В01D 25/38, опубл. 28.02.76 г.
5. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин. - М.: Недра, 1986. -232 с.
6. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в Химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии). - М.: Химия, 1983. - 192 с.
7. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. - М.: Металлургия, 1974. - 503 с.
8. Луговський О.Ф., Чорний В.І. Застосування ультразвукових коливань у пристроях фільтрування рідини // Вестник Национального технического университета Украины «КПІ». Машиностроение.- 1999. - Вил. 35.-с. 111-119.
9. Патент № UA 55323; 17.03.03. Бюл. № 3; Чорний В.І., Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В. Спосіб обробки і очистки рідини та пристрій для його використання.
10. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. - К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. - 244 с.
11. Луговской А.Ф. Проблемы создания технологического оборудования для ультразвукового кавитационного обеззараживания воды / А.Ф. Луговской, И.А. Гришко // В кн.: Промислова гідравліка і пневматика. – 2009. – № 4 (26). – С.3-6
12. Minnaert M. On musical air-bubbles and sound of running water. - Phil. Mag., 1933. - 16,7.-235.
13. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. - М.: Советская энциклопедия, 1979. -400 с.
14. Луговской А.Ф., Мочанюк А.В., Фесич В.П., Гришко И.С. Исследование рабочей зоны высокоамплитудного кавитационного ультразвукового привода.- Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського. Вип. 2/2008 (49).Частина 2, -Кременчук, 2008, с.81-85
15. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. ГИИТЛ, 1949,236 с.
16. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Докучаева В.А., Чернов А.П. О скорости и энергии абразивной частицы в кавитирующей жидкости./ Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов - М.: Металлургия, 1970. -с. 43-53.
17. Агранат Б.А. и др. Ультразвуковая техника, №3,1967, с. 1-5.
18. Розенберг Л.Д. Труды VI всесоюзной акустической конференции, серия Д11. Изд-во АН СССР, 1968.
19. Кнэпп Р. Дейли Дж., Хеммит Ф. Кавитация. - М.: Мир, 1974.-688 с.
20. Flynn H.G. Physics of acoustic cavitation in liquids. In "Physical Acoustics", v. IB. W. Mason (Ed.), N.Y., 1964. (Перевод: Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях. - В кн.: Физическая акустика. / Пол ред. У. Мезона. - Т.1,часть Б.- М.: Мир, 1967. - С.7-138 .

## References

1. Beljanin P.N., Chernenko Zh.S. Aviacionnye fil'try i ochistiteli gidravlicheskih sistem[Aviation filters and purifiers of hydraulic systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1964. 293p.
2. Abramov E.I., Kolesnichenko K.A., Maslov V.T. Jelementy gidroprivoda[Elements of the hydraulic drive]. Kyiv, Tehnika, 1977
3. Japan Patent no 61129012, МПК В01D 24/26, pub. 17.06.86.
4. Certificate of Authorship no 504542, МПК В01D 25/38, pub. 28.02.76.
5. Finkel'shtejn Z.L. Primenenie i ochistka rabochih zhidkostej dlja gornyh mashin[Use and cleaning of hydraulic fluids for mining mashines]. Moscow, Nedra, 1986, 232p.
6. Novickij B.G. Primenenie akusticheskikh kolebanij v Himiko-tehnologicheskikh processah (Processy i apparaty himicheskoj i nef'tjanoj tehnologii)[ The use of acoustic vibrations in chemical-engineering processes (Processes and devices of chemical and petroleum technology)]. Moscow, Himija, 1983, 192 p.
7. Agranat B.A., Bashkirov V.I., Kitajgorodskij Ju.I., Havskij N.N. Ul'trazvukovaja tehnologija[Ultrasonic technology] Moscow, Metallurgija, 1974, 503p.
8. Lugovs'kij O.F., Chornij V.I. Journal of Mechanical Engineering the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" 1999. no. 35, pp. 111-119.
9. Patent no UA 55323; 17.03.03. Bull. no 3; Chornij V.I., Lugovs'kij O.F., Movchanjuk A.V. Sposib obrobki i ochistki ridini ta pristrrij dlja jogo vikoristannja[Method of processing and cleaning fluid and a device for its use].
10. Lugovskij A.F., Chuhraev N.V., Ul'trazvukovaja kavitacija v sovremennyh tehnologijah[Ultrasonic cavitation in modern technologies]. Kiev, Vidavnicho-poligrafichnij centr «Київський університет», 2007. 244 p.
11. Lugovskoj A.F., Grishko I.A. Promislova gidravlika i pnevmatika[Industrial hydraulics and pneumatic]. 2009, no 4 (26), pp.3-6
12. Minnaert M. On musical air-bubbles and sound of running water. Phil. Mag., 1933. 16,7.-235.
13. Goljamin I.P., Ul'trazvuk. Malen'kaja jenciklopedija (Ultrasound. Small encyclopedia) Moscow, Sovetskaja jenciklopedija, 1979, 400 p.
14. Lugovskoj A.F., Mochanjuk A.V., Fesich V.P., Grishko I.S. Visnik Kremen'chuk'skogo derzhavnogo politehničnogo universitetu im. M.Ostrograds'kogo. No 2/2008 (49). part 2, Kremen'chuk, 2008, pp.81-85
15. Prandtl' L. Gidrojermehanika[Hydroaeromechanic]. GIITL, 1949, 236 p.
16. Agranat B.A., Bashkirov V.I., Dokuchaeva V.A., Chernov A.P. O skorosti i jenergii abrazivnoj chasticy v kavitirujushhej zhidkosti. Ul'trazvukovyje metody intensifikacii tehnologicheskikh processov[About the speed and energy of the abrasive particles in a fluid cavitation. Ultrasonic methods of intensification of technological processes]. Moscow, Metallurgija, 1970, pp. 43-53.
17. Agranat B.A. & others. Ul'trazvukovaja tehnika[Ultrasonic machines]. no 3, 1967, pp. 1-5.
18. Rozenberg L.D. Trudy VI vsesozuznoj akusticheskoi konferencii, serija D11[Works of VI All-Union conference, series D11]. Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1968.
19. Knjapp R. Dejli Dzh., Hemmit F. Kavitacija[Cavitation]. Moscow, Mir, 1974, 688p.
20. Flynn H.G. Physics of acoustic cavitation in liquids. In "Physical Acoustics", v. IB. W. Mason (Ed.), N.Y., 1964.

Подана до редакції 18.09.2015