

УДК 534.8

**Исследование процесса ультразвуковой капиллярной подачи жидких
лекарственных водоподобных препаратов на излучающую поверхность
ультразвукового волновода**

Городкова М.С, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Медико-технический менеджмент»*

Научный руководитель: Аполлонова И.А, к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Биомедицинские технические системы»*

appolonova-i@bmstu.ru

В работе планировалось всесторонне исследовать методы подачи жидкости к рабочему торцу ультразвукового волновода непосредственно используя для этого энергию ультразвуковых колебаний, частично отбираемую у ультразвуковой колебательной системы. Известны ультразвуковые насосы, использующие энергию ультразвуковых колебаний. Рассмотрим подробнее физические эффекты приводящие к подъему жидкости по трубкам и капиллярам под действием ультразвука. Рассмотрим подробнее ультразвуковой капиллярный эффект - явление аномально большого увеличения глубины и скорости проникновения жидкости в капиллярном канале под действием ультразвука. Первые работы в которых упоминается этот эффект посвящены исследованию механизма проникновения смазывающе-охлаждающей жидкости в подрезцовую зону при обработке металлов давлением [1, 2]. Проникновение жидкости в зону резания не может быть вызвано одним действием капиллярных сил. Е.Г. Коновалов предположил, что проникающая способность СОЖ увеличивается под действием высокочастотных вибраций, возникающих при обработке [2]. Для проверки этой гипотезы были выполнены исследования, в которых использовали одиночные стеклянные капилляры диаметром 0.112-0.352 мм. Источником колебаний служил магнитострикционный преобразователь, вмонтированный в дно рабочей емкости. Опыты проводились в следующей последовательности. Капилляр опускали в жидкость и устанавливали его на поверхность излучателя. Под действием капиллярных сил жидкость поднималась на некоторую высоту H_0 . После того как подъем прекращался, на преобразователь подавали переменное напряжение, возбуждали колебания и измеряли

высоту и скорость подъема жидкости под действием капиллярных сил и вибраций. При этом во втором случае жидкость поднималась в 40-50 раз быстрее, чем в первом, а максимальная высота подъема значительно превосходила высоту, на которую поднялась бы жидкость под действием только радиационного давления. Установлено, что скорость подъема под действием ультразвука зависит от диаметра капилляра, температуры жидкости и угла наклона капилляра к излучающей поверхности. При изменении диаметра капилляра от 0.1 до 2.0 мм скорость подъема воды сначала увеличивается, достигая максимума при $d = 0.4-0.8$ мм, затем начинает уменьшаться. С увеличением температуры эффект возрастает, причем для более вязких жидкостей в большей степени, чем для менее вязких. Считают, что увеличение средней скорости подъема при повышении температуры связано с уменьшением вязкости жидкостей.

В работе [3] влияние ультразвука на подъем жидкости в сравнительно широких ($d > 1$ мм) цилиндрических каналах исследовалось путем измерения максимальной высоты подъема Нт. Эффект наблюдался лишь при весьма малых зазорах между капилляром и излучателем (практически при контакте). Высота подъема достигала несколько метров. Было установлено, что Нт сильно зависит от условий на входе в капилляр и может изменяться в зависимости от формы торца капилляра почти в 2 раза. Максимальная высота подъема достигается в капиллярах, входной конец которых имеет внутренний конус, минимальная - в капиллярах с внешним конусом. Соотношение максимальных высот подъема в капиллярах в среднем равно 1:0.75:1.44.

В работе Е.Г. Коновалова [4] показано, что ультразвуковой капиллярный эффект наблюдается в различных жидких средах: растворах, расплавах металлов, пропиточных электроизоляционных лаках и компаундах. О природе воздействия ультразвука на подъем жидкости в капилляре предлагались различные гипотезы. Е.Г. Коновалов [1,2,5] в своих первых работах отводил решающую роль кавитации и акустическим течениям, указывая, что ускорение движения жидкостей в капиллярах происходит «за счет переменного давления, кавитации и звукового ветра». Позднее [3] появилась гипотеза, что ультразвуковой капиллярный эффект может быть обусловлен в какой-то степени колебаниями стенок капилляра. В.И. Дрожалова и Ю.И. Китайгородский [3] впервые получили экспериментальные данные, указывающие на важную роль кавитации в ультразвуковом капиллярном эффекте.

Предлагавшиеся гипотезы можно объединить в три группы, если в качестве определяющего признака принять место приложения движущей силы, вызывающей увеличение подъема.

1. Менисковые. Решающая роль отводится взаимодействию ультразвуковых колебаний с мениском в капилляре. К этой группе относятся гипотезы, основанные на предположениях о возникновении у мениска в капилляре особого «звукокапиллярного» давления, об увеличении подъема вследствие изменения смачиваемости и поверхностного натяжения, а также объясняющие эффект действием радиационного давления на границу жидкость - газ в капилляре.
2. Вибрационные или волновые. Они связывают эффект в основном с распространением колебаний в стенках капилляра.
3. Кавитационные гипотезы. Связывают эффект с процессами роста и захлопывания кавитационных пузырьков у входа в капиллярный канал.
4. Гидродинамические гипотезы. Предположение об увеличении подъема под действием акустического течения или вследствие асимметрии гидродинамического сопротивления потоку жидкости в капилляр и обратно.

Роль мениска и колебаний стенок капилляра

В работе [6] Изучалось воздействие ультразвука на полусферический мениск при выдавливании пузырька воздуха из капилляра. Кроме того, проводились наблюдения за подъемом жидкости. Отмечено, что величины приращений подъема незначительны.

Роль мениска в ультразвуковом капиллярном эффекте может быть оценена с помощью капилляров с широкой ванночкой на конце. Если предположить, что увеличение подъема жидкости в капилляре связано с воздействием ультразвука на мениск (изменение смачиваемости и поверхностного натяжения, возникновение звукокапиллярного давления и т.д.), то, очевидно, в капилляре с ванночкой жидкость не может подняться выше дна ванночки, поскольку здесь мениска уже нет, и граница раздела жидкость-газ плоская. Но опыты, проведенные с различными жидкостями в широком диапазоне изменения параметров звукового поля, показали, что жидкость, заполнив весь капилляр, продолжает подниматься дальше, заполняет ванночку и вытекает через сливную трубку. Причем для удержания границы раздела жидкость-газ на одном уровне в обычном капилляре и в капилляре с ванночкой на конце требуется одинаковое избыточное давление. Этот результат показывает, что воздействие ультразвука на мениск если и вносит какой-то вклад в исследуемое явление, то он настолько мал, что не превышает ошибки измерений.

Гипотеза о роли колебаний стенок капилляра развивалась в работе [4]. К возможным причинам, порождающим ультразвуковой капиллярный эффект, Е.Г. Коновалов относил также кавитацию и акустические течения. При этом особая роль отводилась акустическим течениям в канале капилляра, инициируемым поперечными колебаниями стенок капилляра. Их изучением и ограничивались первые теоретические исследования ультразвукового капиллярного эффекта. Но, проведенные Е.Г. Коноваловым расчеты, не согласовались с экспериментальными данными. Из расчетов следовало, что скорость течения жидкости в капилляре направлена в сторону его закрепления, а на практике координата точки закрепления не влияет на эффект. Эксперименты по исследованию роли колебаний стенок капилляра показали, что эффект не наблюдается при сохранении условий, достаточных для его возникновения, и имеет место в отсутствие необходимых условий.

Описанные эксперименты показали, что колебания капилляра не могут рассматриваться в качестве одной из причин увеличения подъема жидкости в капилляре под действием ультразвука.

Кавитация играет важную роль в эффекте увеличения глубины и скорости проникновения жидкости в капиллярные каналы под действием ультразвука. При звуковых давлениях ниже порога кавитации увеличения подъема жидкости в капиллярах не наблюдается [10]. При локализации кавитационного облачка у торца капилляра жидкость в капилляре начинает подниматься, а при отрыве пузырьков от канала капилляра опускаться до исходной высоты.

Экспериментами авторов [4] подтвержден вывод об определяющей роли кавитации в ультразвуковом капиллярном эффекте. Используемая методика исследований состояла в измерении давления AP_0 над мениском в капилляре, необходимого для удержания мениска на высоте обычного капиллярного подъема. В работах других авторов влияние ультразвука на подъем жидкости в капилляре оценивалось либо по максимальной высоте подъема [3], либо по средней за определенный промежуток времени скорости подъема [1, 2]. Эксперименты, в которых измерялось давление на мениск на входе в капилляр, не могут быть отождествлены с опытами по подъему жидкости, так как в первом случае жидкость в капилляре отсутствует, а у входа в его канал находится пузырек воздуха, что существенно меняет условия по сравнению с ситуацией, когда капилляр жидкостью хотя бы до уровня, H_0 .

Эксперименты, показали, что при плавном увеличении амплитуды колебаний излучателя уровень жидкости в капилляре начинает изменяться практически

одновременно с возникновением кавитации если зазор не превышает 0,3 - 0,5 мм. Таким образом, при малых зазорах кавитационный порог является также и порогом ультразвукового капиллярного эффекта [4]. Когда зазор достаточно велик (более 1 мм), жидкость в капилляре начинает подниматься под действием ультразвука лишь с появлением кавитационного облачка у торца капилляра (рис. 1), что соответствует амплитуде колебаний, значительно превышающей порог кавитации.

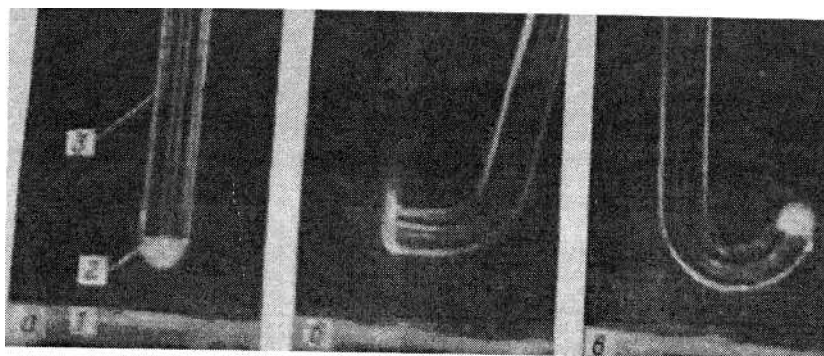


Рис.1. Жидкость в капилляре

Это объясняется тем, что при увеличении амплитуды колебаний кавитация появляется вначале на поверхности излучателя, а затем уже у торца капилляра и в объеме жидкости. В зависимости от амплитуды колебательной скорости излучателя эффект колеблется не плавно, а скачкообразно: с возникновением кавитации уровень жидкости увеличивается сразу на 20-100 см. Особенно хорошо это заметно в дегазированной кипячением воде или глицерине. Это объясняется тем, что акустическая кавитация представляет собой цепную реакцию. При достижении уровня звукового давления, соответствующего порогу кавитации число пузырьков растет лавинообразно, так как зародышами кавитации становятся осколки захлопнувшихся пузырьков.

Характерно, что жидкость в капилляре поднимается под действием ультразвука не равномерно, а толчками и, достигнув максимальной высоты, хаотически (не периодически) колеблется около некоторого среднего уровня с амплитудой, достигающей иногда 10 см. Это вызвано тем, что кавитация в известном отношении является вероятностным процессом и неравномерность подъема связана, по-видимому с флуктуациями концентрации кавитационных пузырьков у входа в канал капилляра.

Радиационное давление и акустические течения

Определенный вклад в воздействие ультразвука на подъем жидкости в капилляре вносят акустические течения и радиационное давление. В частности, подъем,

обусловленный радиационным давлением, был отмечен Ричардсом [7] и Оямой [8], которые исследовали возможность использования капилляров для измерения интенсивности ультразвука в жидкостях.

Увеличение подъема жидкости практически пропорционально напряжению на кварцевых пластинах, работавших на частоте 250 и 500 кГц. Этот факт в совокупности с квадратичной зависимостью подъема от радиуса позволяет утверждать, что увеличение подъема жидкости в капиллярах, зафиксированное Ричардсом, действительно было обусловлено радиационными силами.

Позднее метод измерения интенсивности ультразвука, предложенный Ричардсом, был модифицирован Ю.П. Розиным и В. С. Тихоновой. Разработанное ими устройство предназначалось для измерения интенсивности звука в проводящих жидкостях. Радиационное давление определялось не по увеличению высоты подъема, а по изменению избыточного давления, необходимого для выдавливания жидкости из капилляра до проскакивания первого пузырька воздуха.

Итак, роль мениска, колебаний стенок капилляра, радиационного давления и акустических течений в ультразвуковом капиллярном эффекте незначительна, и он определяется в основном кавитационными процессами у входа в канал капилляра.

Эксперименты по ультразвуковому перекачиванию жидкости

Нами были проведены экспериментальные исследования влияния ультразвука на высоту подъема жидкости в осевых каналах ультразвуковых волноводов продольных колебаний.

Исследования производились для частоты ультразвуковых колебаний 26,5 кГц и амплитуды колебаний торца ультразвукового волновода около 30-40 мкм. Ультразвуковой волновод подсоединялся к магнитострикционному преобразователю УРСК-7Н-18. Исследования производились на двух составных волноводах с внутренним осевым отверстием диаметром 3 мм. В волноводах на расстоянии четверти длины волны от рабочего торца располагался вход в осевой канал волновода.

В первой серии экспериментов волновод опускался в воду. Глубина погружения варьировалась. При расстоянии до дна 13-16 мм и 38-43 мм (рис. 2.1) наблюдалось следующее: вода начинала подниматься по осевому каналу волновода и выливаться из бокового отверстия.



Рис. 2.1. Ультразвуковой волновод опущенный в жидкость

В других положениях волновода тока воды не наблюдалось. Так как эти расстояния примерно соответствуют четверти длины волны в воде, было решено продолжить исследования, поместив на дно сосуда стальной массивный отражатель (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Ультразвуковой волновод помещенный в жидкость со стальным массивным отражателем на дне сосуда

Было установлено, что при использовании такого отражателя высота подъема жидкости увеличивается на 3-4 см.

Таким образом, было установлено, что жидкость движется по осевому каналу в направлении от рабочего торца волновода к боковому отверстию.

Нас интересовало, возможно ли движение по каналу волновода в обратном направлении? Для этой цели надели короткую (3см) трубку на штуцер (боковое отверстие) волновода, а второй конец трубки опустили на 1 см в сосуд с водой, а волновод повернули рабочим торцом вверх. Включив ультразвук, и, заполнив канал волновода жидкостью, тока жидкости мы не обнаружили. В следующем эксперименте мы убрали трубку и опустили штуцер в воду, ориентируя волновод горизонтально (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Расположенный горизонтально ультразвуковой волновод со штуцером

Был обнаружен стабильный, но небольшой ток воды по каналу волновода, но в этом случае, уже от бокового отверстия к рабочему торцу волновода, т.е. в направлении, противоположном тому, что было в первых опытах.

Далее была проведена следующая серия опытов: волновод размещался вертикально торцом вниз (рис. 2.4), причем торец размещался на расстоянии около четверти длины волны в воде от стального отражателя.

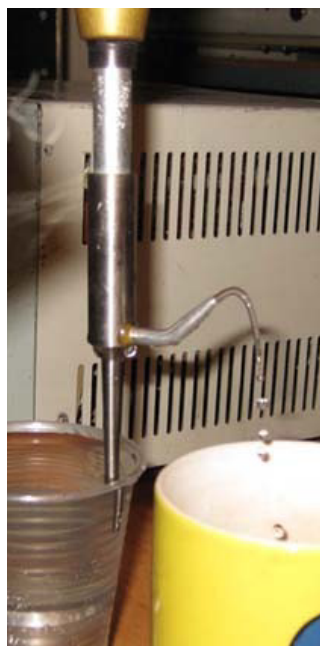


Рис. 2.4. Расположенный вертикально, торцом вниз ультразвуковой волновод со стальным отражателем

Осуществлялась плавная перестройка частоты и измерялась высота подъема жидкости, для чего к штуцеру присоединялся отрезок прозрачной силиконовой трубки, прикрепленной к линейке с миллиметровыми делениями. Одновременно измерялась частота и амплитуда механических колебаний.

Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость высоты подъема воды от частоты колебаний и амплитуды

Частота, кГц	Амплитуда, мкм	Высота подъема, мм	Примечание
27,44	10	50	
27,45	14	60	
27,48	20	75	
27,51	32	90	
27,53	40	141	макс. высота
27,55	45	110	макс. амплитуды
27,61	40	140	макс. высоты
27,7	33	90	
28,0	21		

Проведенные эксперименты позволили достоверно установить, что максимум подъема воды не соответствует максимуму амплитуды колебаний торца волновода, а ведь

именно при максимуме колебаний максимально акустическое давление, радиационное давление и скорость макро- и микропотоков. Причем максимумов подъема жидкости всегда наблюдалось два, причем они располагались практически симметрично от максимума амплитуды колебаний примерно в 40 Гц от него. Предполагая, что справедливо соотношение, вытекающее из уравнения Бернулли $p = \rho g h$, а также то, что давление связано со скоростью как

$$p = \rho c \dot{u}(t),$$

где ρ - плотность жидкости, c – скорость звука в жидкости, $\dot{u}(t)$ - колебательная скорость на торце волновода, тогда для высоты подъема жидкости можно получить следующее выражение

$$h = c \dot{u}(t) / g ,$$

т.е. можно предположить, что обнаруженное явление связано с уменьшением скорости звука в воде из-за ее «разрыхления» кавитационными пузырьками на резонансе или из-за появления кавитации в осевом отверстии волновода.

Расчет производительности ультразвукового насоса

Рассмотрим ступенчатый волновод продольных колебаний. Известно [9], что амплитуда $U(z)$ продольных колебаний цилиндрической части волновода изменяется как

$$U(z) = A \cos \alpha z$$

(где α - волновое число, продольная координата поперечного сечения волновода, отсчитываемая от излучающего торца волновода). Продольная деформация стержня $\varepsilon(z)$ связана с его перемещением соотношением $\varepsilon = U'(z)$, а поперечная деформация стержня ε_r связана с продольной деформацией как

$$\varepsilon_r = \mu \varepsilon$$

(где μ - коэффициент поперечной деформации, и для металлов лежит в диапазоне 0,2-0,3). Тогда продольная деформация будет

$$\varepsilon(z) = A \alpha \sin \alpha z ,$$

а поперечная –

$$\varepsilon_r(z) = A \alpha \mu \sin \alpha z .$$

При этом амплитуда радиального перемещения в z -ом поперечном сечении $W_r(z)$ будет

$$W_r(z) = A\alpha\mu R \sin \alpha z, \quad (1)$$

где R – радиус отверстия волновода.

Для подачи жидкости использовалась схема, в соответствии с которой вертикально расположенный рабочим торцом вверх цилиндрический волновод снабжен осевым отверстием, внутренний диаметр составляет примерно половину от внешнего диаметра волновода [11]. Жидкость в осевом канале поднимается от узловой плоскости волновода вверх, к рабочему торцу волновода. Как следует из приведенного выше литературного обзора, в настоящее время нет достоверных сведений, точно описывающих процесс подъема жидкости в каналах и капиллярах. Как было нами изучено, жидкость по каналу волновода может перемещать в двух взаимно противоположных направлениях, что не может быть объяснено акусто-капиллярной теорией. Ниже мы приводим расчет объема жидкости, который может быть вытеснен из канала волновода при условии, что через нижний зазор вытекает столько же жидкости, сколько и через верхнее отверстие, и силы инерции, действующие на жидкость в осевом канале в осевом направлении не велики. Тогда вытесненный за один период колебаний объем V можно определить, как:

$$V = \int F_{ring}(z) dz, \quad (2)$$

где $F_{ring}(z)$ – площадь поперечного кольца, внешний радиус которого равен $R_{ex}(z)=R+W_r(z)$, а внутренний радиус – $R_{in}(z)=R-W_r(z)$. Тогда площадь кольца $F_{ring}(z)$ можно записать как

$$F_{ring}(z) = 4\pi R W_r$$

или с учетом выражения для амплитуды радиального перемещения (1):

$$F_{ring}(z) = 4\pi A\alpha\mu R^2 \sin \alpha z. \quad (3)$$

С учетом последнего выражения, формула (2) для вытесненного за один период колебаний объема примет вид

$$V = \int_0^L 4\pi A\alpha\mu R^2 \sin \alpha z dz$$

или после вычисления интеграла

$$V = 4\pi A\mu R^2. \quad (4)$$

В нижеприводимой табл.2. представлены результаты численного расчета объема V для некоторого диапазона значений радиуса волновода и амплитуды колебаний A , при этом коэффициент поперечной деформации принят равным 0,3.

Таблица 2

Объем вытесняемой жидкости (нл) из узкого щелевого канала для различных значений амплитуды колебаний A и радиуса волновода R

$R, \text{мм} \backslash A, \text{мкм}$	5	10	15	20	25
0,8	4	8	12	16	20
1,0	7	12	18	25	32
1,2	9	18	27	36	46
1,4	12	25	37	49	62
1,6	16	32	48	64	82
1,8	20	41	62	81	104
2,0	25	50	74	100	125

Производительность насоса при этом можно подсчитать как

$$Q = Vf,$$

где f – частота колебаний волновода. Результаты расчета расхода для некоторого диапазона значений радиуса волновода и амплитуды колебаний A представлены на рисунке (рис.4).

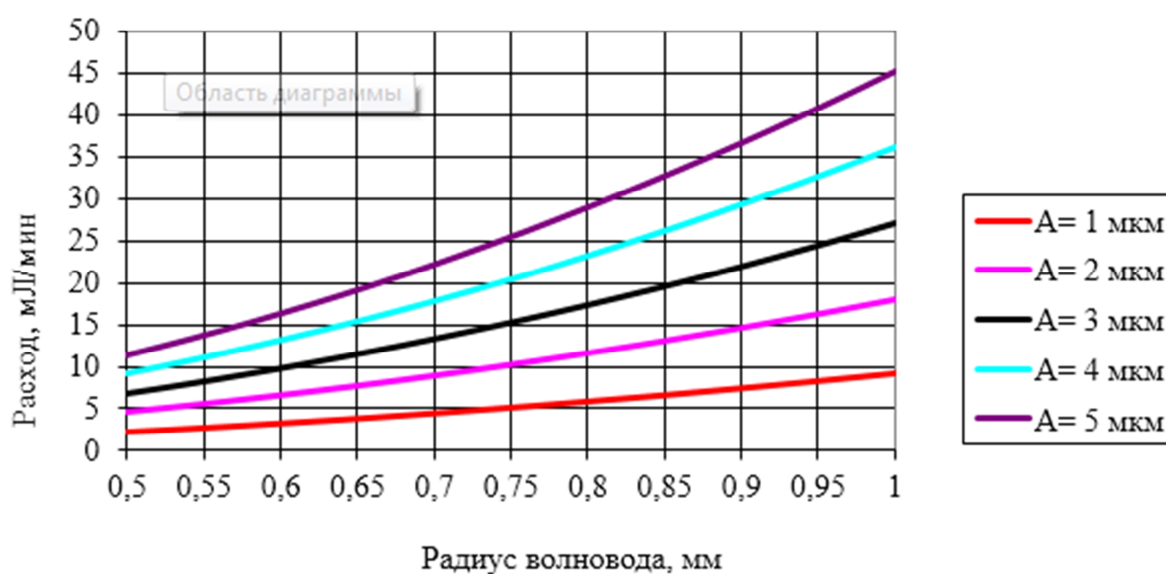


Рис. 4. Зависимость минутного расхода ингалятора от радиуса и амплитуды колебаний волновода

Как видно из результатов, представленных на (рис.4) расход, вычисленный по статической модели превышает экспериментально полученные нами результаты, при которых для частоты 80 кГц и радиусе волновода $R=1$ мм при амплитуде колебаний 5 мкм составил примерно 10-15 мл/мин.

Выводы

Выполнены эксперименты по исследованию процессов ультразвуковой капиллярной подачи жидкости при радиально-продольных колебаниях ультразвуковых волноводов. Показано, что за счет изменения радиуса волновода возможно изменение расхода жидкости, подаваемой на торец волновода-распылителя, при этом объем подаваемой жидкости прямо пропорционален амплитуде продольных колебаний торца волновода, причем объем жидкости за один период колебаний волновода равен произведению площади торца волновода на амплитуду его колебаний.

Список литературы

1. Коновалов Е.Г., Германович И.Н. Ультразвуковой капиллярный эффект. Минск: АН БССР, 1962. 495 с.
2. Коновалов Е.Г. Основы новых способов металлообработки. Минск: АН БССР, 1961. 297 с.
3. Китайгородский Ю.И., Дрожалова В.И. Расчет высоты и скорости подъема жидкости по капиллярам под воздействием ультразвуковых колебаний. М.: Металлургия, 1977. 312 с.
4. Прохоренко П. П., Дежкунов Н.В., Коновалов Г.Е., Ультразвуковой капиллярный эффект / под ред. В. В. Клубовича. Минск: Наука и техника, 1981. 135 с.
5. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
6. Осипов Л.В. Индивидуальные ультразвуковые и компрессорные ингаляторы: Практические рекомендации для пользователей, М., ИзоМед, 2003 г. 80 с.
7. Richards W. T. An intensity gauge for supersonic radiation in liquids. Washington, Proc. Nat. Acad. Sci., 1929. pp 314.
8. Oyama H. Generation and application of intense supersonic acoustic waves. Japan, Rep. Radio Resch., 1934. pp 155.
9. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1972. 416 с.
10. Квашнина М.С. Разработка персонального небулайзерного устройства с изменяющимися размерами частиц // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 10. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/736322.html> (дата обращения 07.04.2015).
11. Квашнина М.С. Исследование обратного чрескожного транспорта водного раствора глюкозы под действием низкочастотного ультразвука // Молодежный научно-

технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 11. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/637443.html> (дата обращения 07.04.2015).