

ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

В статье рассмотрено техническое применение ультразвука в жидкостях с различным начальным состоянием. Сформулированы условия вихревого движения жидкости под действием ультразвука, показано практическое применение такому явлению и получены реальные результаты, которые можно использовать для дальнейших исследований. Ультразвук можно использовать как один из способов холодной дегазации жидкостей наряду с традиционными способами, такими как вакуумирование, кипячение, добавление сульфата натрия Na_2SO_3 . Режим воздействия на жидкость ультразвуком зависит от начального состояния этой жидкости, и дальнейшее поведение физических явлений в этой жидкости будет носить различный характер. Это поведение важно знать при его использовании в промышленности в различных электротехнологических установках. Режим кавитации существует, пока в жидкости есть газ. Режим звукового ветра имеет место, пока в жидкости есть очень небольшое количество газа, и кавитация оказывает минимальное сопротивление акустическому потоку. Для генерации ультразвуковых колебаний использовался новый, перспективный ультразвуковой транзисторный генератор с подмагничиванием силовой части, позволяющий работать с разными излучателями ультразвука, как с магнитострикционными, так и с пьезоэлектрическими. При работе на пьезоэлектрическую нагрузку необходимо просто отключить управление подмагничиванием и включить развязывающий трансформатор в выходной каскад силовой части. Ультразвуковые генераторы, построенные по представленной в работе силовой схеме, могут использоваться для применения в пищевой промышленности с целью интенсификации технологических процессов при небольших энергозатратах, что экономически выгодно для производителей пищевой продукции. При использовании высокоинтенсивного ультразвука возможна замена таких технологических процессов, как термическая обработка, нагрев, использование химических реагентов, а также замена использования насосов для генерации центробежной силы.

Ключевые слова: ультразвуковой генератор, подмагничивание, кавитация, звуковой ветер, вихревое движение, акустическое течение, число Рейнольдса, дегазация.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что все жидкости обладают способностью растворять газ, а при определенных условиях выделять его в виде пузырьков. Наличие газа в жидкости может ухудшать или улучшать тот или иной технологический процесс. Процесс разрушения происходит из-за кавитации, процесс уплотнения происходит из-за звукового ветра. Рассмотрим более подробно эти физические процессы.

Кавитацией называется выделение из жидкости паров и газа (местное закипание жидкости), обусловленное местным падением давления в потоке, с последующей конденсацией паров в области более высокого давления [1]. При кавитации нарушается неразрывность потока жидкости, происходят местные гидравлические удары с повышением давления до 100 МПа и выше. Кавитация может играть как положительную роль при расщеплении, растворении, разрушении и смешивании пищевых ингредиентов в пищевой промышленности, так и отрицательную – при разрушении стенок трубопроводов при наличии трещин, разрушении элементов гидропривода в машиностроении.

При очень больших удельных потоках звуковой энергии возможно поступательное движение материальных частиц жидкости в направлении распространения энергии. Этот сложный процесс переноса энергии звука в акустике называют явлением «звукового ветра». Перенос энергии звука осуществляется как за счет

колебания частиц среды относительно своих средних положений, так и за счет смещения всей массы вещества среды в направлении распространения энергии [2]. Объемное перемещение жидкости под действием звукового ветра (поля) провоцирует возникновение акустического течения жидкости, которое может иметь ламинарный или турбулентный характер движения. В данной статье условимся подразумевать под определением «звукового ветра» также «акустическое течение» жидкости. В технике эффект «звукового ветра» с успехом применяют для бесконтактного смешивания или разделения агрессивных жидкостей и слабо текущих композиций.

Объектом исследования данной работы является воздействие ультразвуковых колебаний на жидкую среду с различным начальным состоянием и возможностью генерирования таких колебаний с помощью ультразвукового генератора с подмагничиванием. Предметом исследования является физическое явление и техническое применение такого явления в различных электротехнологических установках. Цель работы – добиться образования вихревого движения в жидкости под действием ультразвуковых колебаний, показать необходимые условия для образования такого движения под воздействием ультразвуковых колебаний. Задача данной работы – рассмотреть подробное влияние ультразвука на жидкую среду, изучить возможные физические явления в этой среде и новые средства генерирования ультразвуковых колебаний для их дальнейшего применения в промышленности.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим теоретические методы, описывающие процесс кавитации и эффект звукового ветра. Известно, что под действием ультразвука в воде начинается процесс дегазации газа и возникает кавитация, которая может расщеплять или разрушать вещества, которые в этот момент находились в воде. При ультразвуковом кавитационном воздействии выделяют следующие режимы в зависимости от его интенсивности [3]:

- работа при малых интенсивностях воздействия (докавитационный режим), при которых не нарушается сплошность обрабатываемой среды;

- работа в режиме зарождения кавитации. Режим характеризуется возникновением в жидкой среде кавитационных парогазовых пузырьков, которые насыщают жидкую среду, изменяя ее волновое сопротивление (импеданс) [4].

Процесс кавитации происходит до полного дробления кавитационных пузырьков и со временем кавитационная область сужается, а через определенное время t_1 (рис. 1) процесс кавитации плавно перейдет в акустическое течение жидкости под действием звукового ветра. Процесс акустического течения можно наблюдать визуально, если опустить в дегазированную воду погружной излучатель ультразвука. В интервале времени $[0, t_1]$ звуковой ветер тоже присутствует, но его сила очень мала, т.к. режим кавитации оказывает сопротивление звуковому ветру. После дегазации жидкости в интервале времени $[t_1, t]$ наступает режим звукового ветра и происходит акустическое течение жидкости. В интервале времени $t \geq t_1$ кавитация частично будет присутствовать, но меньшей интенсивности. Все, что находилось в этот момент в жидкости, будет уплотняться, и ультразвук будет работать как насос, перекачивая жидкость из стороны в сторону. Какой же характер движения имеет акустическое течение дегазированной жидкости, возникающее вследствие ультразвукового воздействия? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим более подробно процесс перехода из ламинарного течения в турбулентное.

Количественная оценка режима движения жидкости производится с помощью числа Рейнольдса. Число Рейнольдса характеризует соотношение сил инерции и вязкости в потоке. Число Рейнольдса, соответствующее переходу от турбулентного режима к ламинарному, называется нижним критическим числом Рейнольдса и обозначается $Re_{кр.н}$, а число Рейнольдса, соответствующее переходу от ламинарного движения к турбулентному, называется верхним критическим числом Рейнольдса и обозначается как $Re_{кр.в}$. Для практических расчётов можно полагать, что при значениях $Re < 2300$ имеет место ламинарный режим, а при $Re > 2300$ – турбулентный режим. Для потоков произвольного сечения критерий Рейнольдса определяется по формуле [5]:

$$Re = \frac{V_{cp} R}{\nu}, \tag{1}$$

где R – характерный линейный размер обтекаемого тела; V_{cp} – средняя по сечению скорость; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

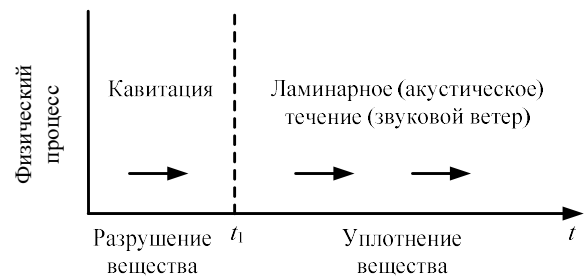


Рис. 1. Представление поведения физических явлений при воздействии ультразвука на жидкую среду

Из (1) следует, что если на пути акустического течения нет препятствия или оно очень маленькое, т. е. $R \rightarrow 0$, значение Re будет меньше 2300, значит, будет преобладать ламинарное течение жидкости, а с увеличением R ламинарное течение будет плавно переходить в турбулентное. Данное условие хорошо работает при свободном течении жидкости в реках, водоемах и различных трубах под действием силы насоса.

В акустике для количественной характеристики распространения ультразвуковой волны в воде используют безразмерный параметр - акустическое число Рейнольдса Re_a , который определяется по формуле [6]:

$$Re_a = \frac{\rho c_0 V}{\omega b}, \tag{2}$$

где ρ – плотность среды, $кг/м^3$; c_0 – скорость звука в среде, $м/с$; V – амплитуда колебательной скорости, $м/с$; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, $рад/с$; b – параметр диссипации.

Амплитуда колебательной скорости V характеризует максимальную скорость, с которой частицы среды движутся в процессе колебаний, и определяется частотой колебаний и амплитудой ультразвукового колебания:

$$V = 2\pi f A, \tag{3}$$

где f – частота ультразвуковых колебаний, $кГц$; A – амплитуда ультразвуковых колебаний, $мкм$.

Подставив (3) в (2), увидим, что акустическое число Рейнольдса Re_a в большей степени зависит от амплитуды A ультразвуковых колебаний, чем от частоты. Если $Re_a < 1$, то преобладает влияние вязкости жидкости, и ультразвуковая волна в ней затухает. При таком условии не возможно акустическое течение жидкости и, соответственно, ни ламинарного, ни турбулентного режима не будет возникать. Если $Re_a > 1$, то начинают образовываться слабые ударные ультразвуковые волны, которые способствуют возникновению акустического течения жидкости.

Прямой связи между формулами (1) и (2) в данной статье не показано, это будет являться предметом будущих исследований, но по результатам экспериментальных исследований можно показать, что минимальными условиями для образования турбулентного движения жидкости под действием ультразвука являются следующие условия:

$$\begin{cases} Re > 2300, V_{cp} \rightarrow \infty, R \neq 0; \\ Re_a > 1, A \rightarrow \infty, p > p_{воды}, c_0 > c_{воды}. \end{cases} \tag{4}$$

Условие (4) призвано показать физическую связь между формулами (1) и (2). После дегазации жидкости (см. **рис. 1**) в момент времени t_1 условия $\rho > \rho_{\text{воды}}, c_0 > c_{\text{воды}}$ уже будут соблюдаться, т.к. $c_{\text{дисцилир}}=1482 \text{ м/с}, c_{\text{воды}} = 1450 \text{ м/с}$ и $c_{\text{дисцилир}} > c_{\text{воды}}$. Это приведет к ламинарному течению, затем при достаточной амплитуде A и наличии препятствия R возникнет перестройка профиля скорости $V_{\text{ср}}$ и начнет образовываться турбулентный режим течения жидкости. Важно понимать, что в любой дегазированной жидкости, когда процесс кавитации ослабляется, ультразвуковое воздействие будет плавно порождать акустическое течение ламинарного характера, а при условиях (4) акустическое течение начнет принимать турбулентный (вихревой) характер.

С увеличением частоты f расстояние, на которое распространяется ультразвуковая волна, будет уменьшаться. Также необходимо отметить, что на турбулентный характер акустического течения жидкости не будет влиять фокусированное ультразвуковое воздействие, т.к. при этом будет все равно сохраняться ламинарный режим, даже если будет достигаться условие $Re > 2300$.

Процесс кавитации при ультразвуковом воздействии можно использовать как один из способ холодной дегазации жидкости наряду с другими способами дегазации, такими как вакуумирование, термическая дегазация и др. Например, показателен эксперимент с алюминиевой фольгой в холодной воде [7]. Скорость дегазации жидкости зависит от мощности и интенсивности ультразвука. В дегазированном состоянии жидкость может храниться очень долго. Вода, находящаяся в открытом резервуаре или в резервуаре, закрытом проницаемой пленкой, будет естественным образом поглощать растворимые в ней газы, пока она не достигнет уровня насыщения. Этот процесс протекает очень долго, примерно 1 мг/л за 8 часов. Скорость этого насыщения будет зависеть от многих факторов, важнейшими из которых являются температура, режим перемешивания и отношение площади водной поверхности к объему воды. Пример динамики такого поглощения показан на **рис. 2** [8]. (Резервуар вместимостью 200 л с площадью водной поверхности 4000 см², температура воды 17-22°C [9]).



Рис. 2. Динамика поглощения газа водой после ее дегазации

Таким образом, в работе показано, что ультразвуковое воздействие на жидкость сначала порождает процесс кавитации, а затем, когда газа становится мало, процесс звукового ветра. В процессе возникновения звукового ветра всегда возникает ламинарный режим течения жидкости, и только при определенных условиях (4) возможно возникновение турбулентного режима течения жидкости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подтверждения данной теории были проведены эксперименты по посолу рыбы ультразвуковым воздействием в растворе тузлука 10% солености. Основным технологическим параметром посола является длительность процесса. Известно, что соль при растворении в воде вытесняет молекулы газа из воды, и тузлук жидкость становится плотной, газовых пузырьков в ней становится мало и, соответственно, процесс кавитации происходит быстро и кавитация ослабляется. После этого наступает процесс акустического течения, который как раз и можно использовать для диффузии молекул NaCl из тузлук жидкости в мясо рыбы и диффузионно-осмотического переноса воды из тканей рыбы в раствор соли [10].

Сначала процессом кавитации вытесняется газ, а затем наступает процесс акустического течения. Акустическое течение имеет ламинарный характер, т.к. отсутствует обтекаемое тело $R = 0$ из (1). После того, как тузлук жидкость приобретает движение ламинарного характера, а процесс кавитации становится слабее, кавитационная область сокращается в размерах, и акустические течения постепенно заполняют всю емкость, в нее на специальную сетку помещается сырая рыба или филе, $R \neq 0$, а $c_{\text{тузлук}} = 1521,6 > c_{\text{воды}} = 1450$ и $\rho_{\text{тузлук}} = 1020 > \rho_{\text{воды}} = 998$, на периферии рыбной поверхности начинают появляться завихрения тузлук жидкости, происходит перестройка профиля скорости $V_{\text{ср}} \rightarrow \infty$, что можно наблюдать визуально. Для предотвращения разрушения консистенции мяса рыбы не желательно помещать рыбу в интервале времени $[0, t_1]$ (см. **рис. 1**).

Таким образом, по результатам экспериментов можно сделать вывод, что с помощью ультразвукового воздействия при достижении с помощью звукового ветра вихревого движения можно ускорить процесс посола рыбы. Результат представлен на графике солености (**рис. 3**).

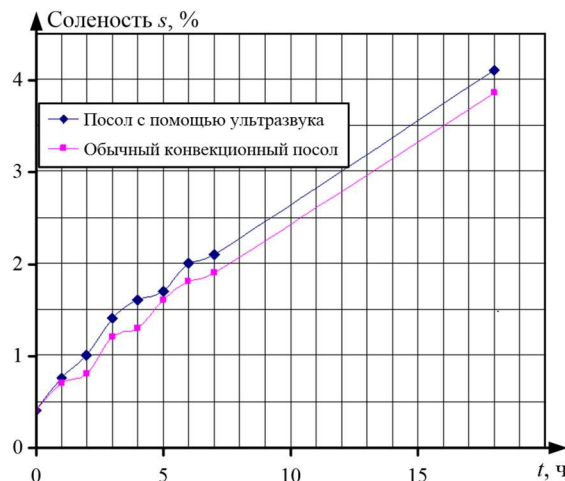


Рис. 3. Графики солености при обычном и ультразвуковом посоле

Аналогичные данные получены в других работах [11]. В этих работах показано, что график солёности (рис. 4) примерно совпадает с графиком, представленным на рис. 3, и отличается следующими параметрами:

- 1) типом засаливаемой рыбы;
- 2) интенсивностью ультразвукового воздействия I ;
- 3) частотой ультразвуковых колебаний f .

По результатам экспериментальных исследований было выявлено, что показатели качества солёной рыбы, полученные с использованием предварительной ультразвуковой обработки, отвечают требованиям нормативно-технической документации по всем органолептическим и микробиологическим показателям.

Для получения экспериментальных данных и образования вихревого движения в жидкости под действием ультразвуковых колебаний использовался ультразвуковой генератор, силовая схема которого выполнена по мостовой транзисторной топологии с подмагничиванием силовой части (рис. 5).

Электрические характеристики ультразвукового воздействия при этом были следующие: импульсная мощность генератора $P_{\text{и}} = 9330$ Вт; средняя электрическая мощность на резонансной частоте и максимальной частоте следования пачек $P_{\text{ср.эл}} = 933$ Вт; КПД излучателей $\eta_{\text{изл}} = 30\%$; средняя акустическая мощность $P_{\text{ср.акуст}} = 280$ Вт; создаваемая интенсивность воздействия на площади излучения $I = 0,03$ Вт/см²; площадь излучения $S_{\text{изл}} = 10000$ см²; объём излучения $V_{\text{изл}} = 200000$ см³.

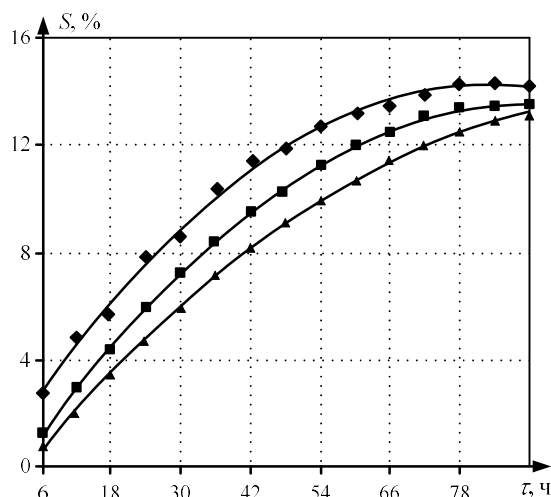


Рис. 4. Влияние ультразвуковой обработки на кинетику средней солёности S сельди атлантической:
 1 – без обработки ультразвуком;
 2 – ультразвуковая обработка частотой 34 кГц;
 3 – ультразвуковая обработка частотой 30 кГц

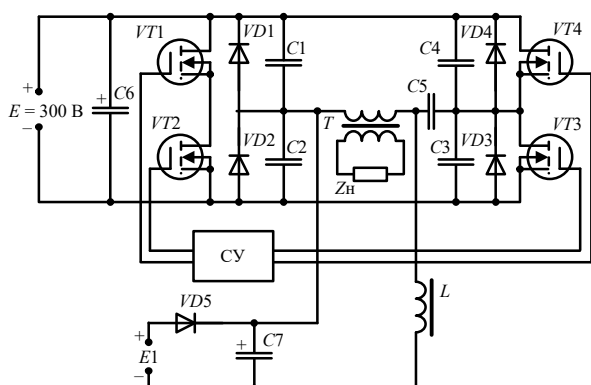


Рис. 5. Структурная схема мостового транзисторного инвертора с подмагничиванием

При увеличении $P_{\text{и}}$, количества излучателей, частоты следования пачек импульсов, КПД излучателей и уменьшения $S_{\text{изл}}$ можно увеличить интенсивность воздействия для использования этого генератора в химических процессах.

Подробный принцип работы такого ультразвукового генератора рассмотрен в источниках [12, 13] и в данной работе не приводится. Тип подключаемого ультразвукового преобразователя может быть как магнитострикционный, так и пьезоэлектрический. В данной схеме в качестве излучателя $Z_{\text{н}}$ использовался магнитострикционный преобразователь. Для подключения пьезоэлектрического преобразователя достаточно включить развязывающий трансформатор в выходной каскад силовой части и отключить систему управления или источник питания цепи подмагничивания. Система управления СУ силовым каскадом спроектирована на базе ПЛИС с алгоритмом управления мощностью, аналогичным широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [13]. При замене $Z_{\text{н}}$ на пьезоэлектрическую нагрузку программное обеспечение ПЛИС значительно не меняется. Также будет отсутствовать система автоматической подстройки резонансной частоты, т. к. данная система не предусмотрена в используемом генераторе с целью снижения его себестоимости.

При подключении пьезоэлектрических преобразователей можно получать высокоинтенсивный ультразвук для его использования в пищевой и химической промышленности с целью интенсификации технологических процессов. Показанное на рис. 5 решение улучшает технические характеристики ультразвукового генератора, снижает его себестоимость и расширяет области технического применения ультразвука в электротехнологических установках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, акустическое течение в дегазированной жидкости под действием ультразвука имеет ламинарный характер и при определенных условиях переходит в вихревое движение. По результатам теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) вихревой режим течения жидкости будет зависеть в большей степени от амплитуды ультразвуковых колебаний A , чем от их частоты f ;
- 2) свойства работы ультразвука в жидкой среде зависят от исходного состояния этой среды, ультразвук порождает разный физический процесс: в дегазированной жидкости – процесс акустического течения, в недегазированной жидкости – процесс кавитации;
- 3) ультразвуковое воздействие можно использовать как один из способов холодной дегазации жидкости наряду с вакуумированием, химической и термической дегазацией;
- 4) высокоинтенсивный ультразвук в жидкости, где имеется малое содержание газа, можно использовать в электротехнологии как насос, уплотнитель веществ и ускоритель конвекционного потока пищевой продукции;
- 5) транзисторный ультразвуковой генератор с подмагничиванием мостовой силовой части можно использовать на разную нагрузку, тем самым добиться расширения области применения такого генератора в ультразвуковой технике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галдин Н.С. Основы гидравлики и гидропривода: учебное пособие. Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. 145 с.
2. Воробьев Е.А. Теория ультразвуковых колебаний как основа построения и применения технических средств получения информации: учебное пособие. СПбГУАП, СПб., 2002. 54 с.
3. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / Хмелев В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. 414 с.
4. Хмелев В.Н. Повышение эффективности ультразвуковых технологических аппаратов для кавитационной обработки жидких сред высокой вязкости. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2019. 59 с.
5. Лаптева Н.Е., Пастухова Л.Г. Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости: учебное электронное текстовое издание / ФГАОУ ВПО «УрФУ». Екатеринбург, 2011. 15 с.
6. Голямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
7. Поддубный Б.Н. Усовершенствование методов эрозийных тестов по эрозии алюминиевой фольги и по убыли веса образца // Акустический журнал. 1976. Т. 22. № 4. С. 586-589.
8. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 8.897-2015/IEC/TR 62781:2012. Ультразвук. Методы подготовки воды для ультразвуковых измерений. М.: Стандартинформ, 2016. 17 с.
9. Fowlkes J.B., Carson R.L. Systems for degassing water used in ultrasonic measurements // The Journal of the Acoustical Society of America. 1991. Vol. 90(2). Pp. 1197-1200.
10. Афанасьев В.А., Малинин Г.В., Янкевич С.В. Технология ультразвукового посола рыбной и мясной продукции // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 2020. С. 518-521.
11. Яковлев О.В. Применение ультразвука для интенсификации процесса посола рыбы // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2018. № 1. С. 89-95.
12. Янкевич С.В., Малинин Г.В. Обзор схемотехнических решений при построении силовой части ультразвуковых генераторов // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 212-220.
13. Янкевич С.В. Ультразвуковой генератор на ПЛИС фирмы XILINX // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 2010. С. 272-275.

Поступила в редакцию 08 июля 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

VORTEX MOTION FORMATION IN LIQUID MEDIUM UNDER THE ACTION OF ULTRASONIC OSCILLATIONS

Sergey V. Yankevich

Postgraduate Student, Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary. E-mail: ds3617@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6151-0448>

Grigoriy V. Malinin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary. E-mail: malgrig6@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3993-0435>

The article is concerned with the technical application of ultrasound in liquids with different initial states. The conditions for the vortex movement of the liquid under the influence of ultrasound are formulated, practical application of such a phenomenon is shown and real results are obtained, which can be used for further research. Ultrasound can be used as one of the methods of cold degassing for liquids along with traditional methods such as vacuumization, boiling, addition of sodium sulfite Na_2SO_3 . The mode of the liquid exposure to ultrasound depends on the initial state of this liquid, and the further behavior of physical phenomena in this liquid will be different. It is important to know this behavior when it is used in industry in various electrical installations. The cavitation mode exists as long as there is a gas in the liquid. The sound wind mode occurs as long as there is a very small amount of gas in the liquid, and cavitation provides minimal resistance to acoustic flow. To generate ultrasonic vibrations, a new, promising ultrasonic transistor generator with bias of the power part was used, which makes it possible to work with different ultrasound emitters, both magnetostriptive and piezoelectric. When working on a piezoelectric load, it is simply necessary to turn off the bias control and turn on the decoupling transformer in the output stage of the power part. Ultrasonic generators built according to the power scheme presented in the work can be used in the food industry for the purpose of intensifying technological processes at low energy costs, which is economically beneficial for food producers. Using high-intensity ultrasound, it is possible to replace such technological processes as heat treatment, heating,

the use of chemical reagents, as well as replacing the use of pumps to generate centrifugal force.

Keywords: ultrasonic generator, bias, cavitation, sound wind, vortex motion, acoustic flow, Reynolds number, degassing.

REFERENCES

1. Galdin N.S. *Osnovy gidravliki i gidroprivoda* [Hydraulics and Hydraulic Drive Basics]. Omsk: Izd-vo SibADI, 2006, 145 p. (In Russian)
2. Vorobyev E.A. *Teoriya ultrazvukovykh kolebaniy kak osnova postroeniya i primeneniya tekhnicheskikh sredstv polucheniya informatsii: Uchebnoeposobie* [The theory of ultrasonic oscillations as the basis for the construction and application of technical means of obtaining information: Tutorial]. SPbGUAP, Saint Petersburg, 2002, 54 p. (In Russian)
3. Khmelev V.N., Leonov G.V., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Shalunov A.V. *Ultrazvukovye mnogofunktsionalnye i spetsializirovannye apparaty dlya intensifikatsii tekhnologicheskikh protsessov v promyshlennosti, selskom i domashnem khozyaystve* [Ultrasonic multifunctional and specialized devices for intensification of technological processes in industry, agriculture and household]. Biysk, Publishing house of Altay State Technical University, 2007. 414 p. (In Russian)
4. Khmelev V.N. *Povyshenie effektivnosti ultrazvukovykh tekhnologicheskikh apparatov dlya kavitatsionnoy obrabotki zhidkikh sred vysokoy vyazkosti* [Increased efficiency of ultrasonic process apparatus for cavitation treatment of liquid

- media of high viscosity]. Biysk, Publishing house of Altay State Technical University, 2019, 59 p. (In Russian)
5. Lapteva N.E., Pastukhova L.G. *Laminarnyy i turbulentnyy rezhimy dvizheniya zhidkosti* [Laminar and turbulent fluid modes]. Yekaterinburg, UrFU, 2011, 15 p. (in Russian)
 6. Golyamina I.P. *Ultrazvuk. Malenkaya entsiklopediya* [Ultrasound. Little Encyclopedia]. Moscow, Soviet encyclopedia, 1979, 400 p. (In Russian)
 7. Poddubnyy B.N. Improvement of methods of erosion tests for erosion of aluminum foil and reduction of sample weight. *Akusticheskiy zhurnal* [Acoustic journal], 1976, 22, no. 4, pp. 586-589. (In Russian)
 8. State Standart 8.897-2015/IEC/TR 62781:2012. Ultrasonics. Methods of conditioning of water for ultrasonic measurements. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 17 p. (In Russian)
 9. Fowlkes J.B., Carson R.L. Systems for degassing water used in ultrasonic measurements. *J. Acoust. Soc. Am* 1991, 90, no. 2, pp. 1197-1200.
 10. Afanasyev V.A., Malinin G.V., Yankevich S.V. Technology of ultrasonic salting of fish and meat products. *Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike»* [Information technology in electrical engineering and power engineering: materials of XII All-Russianscientific conference]. Cheboksary, Publishing house of ChGU; 2020, pp. 518-521. (in Russian)
 11. Yakovlev O.V. Application of ultrasound for intensification of fish salting process. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kerch State Marine Technological University], 2018, no. 1, pp. 89-95. (in Russian)
 12. Yankevich S.V., Malinin G.V. Schematic solutions overview for construction of ultrasonic generators power unit. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Bulletin of Chuvash University], 2020, no. 1, pp. 212-220. (in Russian)
 13. Yankevich S.V. Ultrasonic generator at XILINX FPGA. *Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike»*. [Materials of VII All-Russian scientific conference "Information technology in electrical engineering and power engineering"]. Cheboksary, Publishing house of ChGU, 2010, pp. 272-275. (in Russian)

Янкевич С.В., Малинин Г.В. Образование вихревого движения в жидкой среде под действием ультразвуковых колебаний // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 3(52). С. 66-71. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-66-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-66-71)

Yankevich S.V., Malinin G.V. Vortex Motion Formation in Liquid Medium Under the Action of Ultrasonic Oscillations. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 3(52), pp. 66-71. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-66-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-66-71)