

УДК 621.37/39:534

Я.А. КУМЧЕНКО

*Научно-производственное предприятие «КАШТУЛ», Днепропетровск, Украина*

**СИЛА БЬЕРКНЕСА-УМОВА-ЛЕБЕДЕВА (БУЛ)  
В РЕЗОНАТОРНО-РЕЗОНАНСНОМ МЕХАНИЗМЕ ОЧИСТКИ  
УГЛЕВОДОРОДНЫХ И БИОТОПЛИВ ОТ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ**

В рамках предложенного и развитого автором резонаторно-резонансного механизма силовых взаимодействий различных иерархических уровней предложен ультразвуковой метод очистки углеводородных и биотоплив от вредных примесей в газообразном, жидком и твердом состоянии. При этом очистка производится перед заправкой топливом ДВС, ГТУ и ЖРД. Определены режимы работы ультразвуковых генераторов, при которых и реализуется процесс очистки от примесей, отрицательно сказывающихся на работе теплоэнергетической установки. При этом силы взаимодействия между примесями описываются согласно закону  $1/l^2$  и названы силами Бьеркнеса-Умова-Лебедева в честь их первооткрывателей.

**сила Бьеркнеса-Умова-Лебедева, очистка топлив, вредные примеси, резонаторно-резонансный механизм, ультразвуковой генератор**

### Введение

Различного рода примеси оказывают вредное влияние на работу не только камеры сгорания, но и всей установки в целом.

Газообразные включения в топливе приводят к кавитации при работе турбонасосного агрегата (ТНА) для ЖРД и при подаче жидких топлив в самолетных двигателях, ГТУ и ДВС.

Примеси в жидком состоянии уменьшают теплопроводную способность теплоагрегата, что снижает его энергоэффективность. Кроме того, наличие в горючем, например, воды, может отрицательно сказаться на работе всех агрегатов в зимнее время или при изменении температуры окружающей среды с жаркой на холодную, например, за время перелета самолета. Заманчивым в этом случае является выделение глицерина из биотоплив без использования химических процессов.

Твердые примеси могут привести к эрозии внутренних стенок топливоподающего тракта, лопаток центробежных насосов, закоксовыванию форсунок.

### **1. Аналитический обзор и постановка задачи. Сила Бьеркнеса- Умова-Лебедева (БУЛ)**

Вопрос ультразвуковой обработки аэрозолей широко освещен в печати, опубликовано много об-

зорных статей на эту тему. Однако анализировать экспериментальный и частично теоретический материал по озвучиванию аэрозолей мы не будем только по той причине, что в нем не вполне выявлена природа силовых взаимодействий между аэрозольными частицами.

По авторитетному мнению многих исследователей, в том числе и, по мнению автора этой работы, приоритет по ее объяснению всецело принадлежит русским ученым Н.А.Умову (1873г.) [1], П.Н.Лебедеву (1897г.) [2] и норвежскому исследователю Ф.Бьеркнесу (1891г.) [3].

Средняя по времени сила взаимодействия между двумя пульсирующими в жидкости сферами по Бьеркнесу равна

$$F = (\rho\Omega_1)(\rho\Omega_2) \cos \psi / 4\pi r l^2, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $\Omega = 4\pi r^2 V$  – объемная скорость пульсирующего пузырька;  $r$  – его радиус;  $l$  – расстояние между ними;  $\psi$  – разность фаз колебаний сфер.

Скорость колебания поверхности сферы, пульсирующей под действием акустического давления  $P$  с круговой частотой  $\omega$

$$V = P / \omega r \rho (\omega_{рез}^2 / \omega^2 - 1)^2 + \eta^2)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\omega_{рез}$  – резонансная частота пузырька;  $\omega$  – частота возбуждения;  $\eta$  – декремент затухания волновой энергии поля.

Зададимся вопросом: а что будет с жесткими сферами, находящимися в осциллирующем потоке жидкости или газа? Отметим, что именно Н.Е. Жуковский впервые заметил аналогию между силой Бьеркнеса для двух взаимодействующих пульсирующих сфер, находящихся в жидкости, и двух жестких сфер, находящихся в пульсирующем потоке жидкости или газа. При этом, как считает автор данной работы, в обмене волновой энергией между жесткими шарами принимает участие так называемая присоединенная масса жидкости.

Отдавая дань заслуженного уважения упомянутому выше ученому, назовем силу взаимодействия между двумя пульсирующими сферами и жесткими шарами в пульсирующем потоке силой Бьеркнеса-Умова-Лебедева (БУЛ).

Считаю, что автор этих строк имеет право такого предложения, т.к. им впервые была детально изучена природа таких силовых взаимодействий при обмене волновой энергией между частицами-резонаторами и наложенным силовым полем волнового характера [4].

В этой работе им достигнуты следующие результаты:

1. Акустическая потенциальная яма формируется в зависимости от режимов пульсаций частиц-излучателей газообразной, жидкой или твердой фазы:

1.1. Усиление колебаний приводит к отталкиванию между источником и резонатором-микрочастицей.

1.2. Ослабление колебаний приводит к притяжению между источником и резонатором с возбужденными колебаниями.

1.3. В случае резонанса силовое взаимодействие отсутствует.

2. Процесс притяжения и отталкивания корректнее рассматривать не на языке сил, а с точки зрения близкодействия, на языке потенциальной энергии, которая локализована в пространстве, окружающем аэрозольные частицы-излучатели, и которая всецело зависит от его физических свойств.

Учитывая (1), (2) и результаты работы [5], получаем для сил БУЛ

$$F = r_1 r_2 P^2 \cos \psi / \omega^2 \rho l^2 \cdot \{[(\omega_{рез1}^2 / \omega^2 - 1)^2 + \eta_1^2] \times \times [(\omega_{рез2}^2 / \omega^2 - 1)^2 + \eta_2^2]\}^{1/2}, \quad (3)$$

где индексы 1 и 2 относятся к первому и второму пузырькам-резонаторам.

В случае если звуковое поле имеет несколько частотных компонент, необходимо просуммировать действие каждой и них в отдельности.

В работе [5] по результатам обработки кинематических данных получена экспериментальная зависимость между уменьшением  $l$  (сближением частиц) и временем озвучивания, которая имеет вид:

$$l^{3/2} = B(C - t), \quad (4)$$

где  $t$  – время озвучивания;  $B$  и  $C$  – константы.

На рис. 1 [5] представлена эта экспериментальная зависимость. Параметр  $B$  определяет наклон прямой к оси времени. Значения расстояния между пузырьками для каждого момента времени хорошо ложатся на прямую (4).

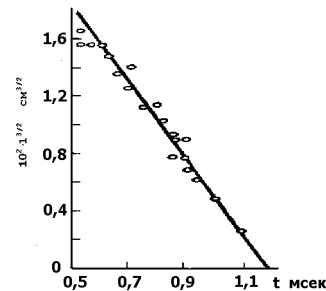


Рис. 1. Зависимость сближения пузырьков от времени для воды

В этой же работе была найдена экспериментальная зависимость константы  $B$  от радиусов пузырьков, представленная на рис. 2.

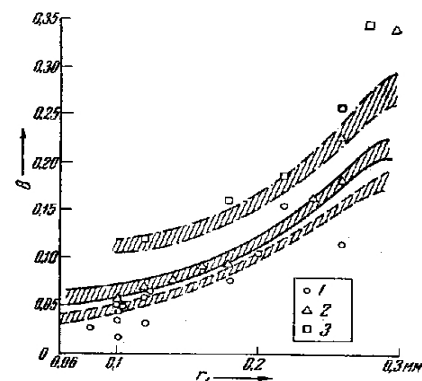


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $B$  от радиусов пузырьков (значения  $r_2$ : 1 – 0,12...0,14; 2 – 0,16...0,18; 3 – 0,22...0,24 мм)

По начальным условиям ( $t = 0$ ) определяем постоянную  $C$  по формуле

$$C = l_0^{3/2} / B, \quad (5)$$

где  $l_0$  – начальное расстояние между пузырьками.

Таким образом, все необходимые параметры для расчета требуемого времени озвучивания и режимов работы ультразвукового генератора имеются.

## 2. Реализация поставленной задачи

Для подбора режима работы ультразвукового генератора необходимо знание следующих параметров: 1 – диаметры пузырьков; 2 – их распределение по размерам; 3 – резонансные частоты пузырьков; 4 – плотность среды; 5 – концентрация примесей; 6 – акустическое давление; 7 – величина декремента затухания; 8 – расстояние между пузырьками.

Если известны эти параметры, то из приведенных зависимостей можно определить частоту озвучивания и ее мощность.

Функция распределения пузырьков по размерам  $n(r)$  связана с коэффициентом затухания соотношением (см. [6])

$$n(r) = 1,38 \cdot 10^{-3} R^{-3} \eta, \quad (6)$$

где  $R$  – резонансный размер пузырька.

На рис.3 приведена зависимость коэффициента затухания от амплитуды акустической волны [5]. Сделанная в работе [5] оценка времени слияния двух пузырьков с радиусами 10 и 20 мк, первоначально расположенных на расстоянии 1 см при амплитуде акустической волны  $10^3$  Па, составляет около 2 с.

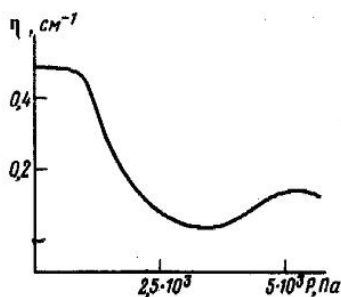


Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания от амплитуды акустической волны (для воды)

Небезынтересно отметить, что в эксперименте визуально наблюдалось «слияние» пузырьков до видимых размеров ( $R > 40$  мк), но образовавшиеся гроздья после всплытия из объема воды вновь распадалась на отдельные пузырьки.

На рис. 4 приведена функция распределения пузырьков по размерам (1 – без акустического озвучи-

вания, 2 – при его наличии).

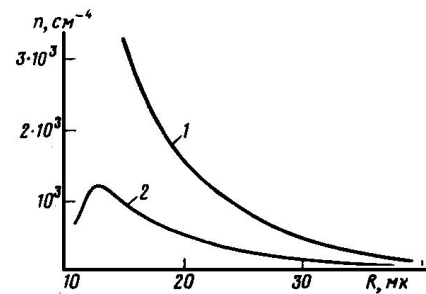


Рис. 4. Распределение пузырьков по размерам [6]

## Выводы

1. Работоспособность ультразвуковой очистки топлив для двигательных установок от примесей в связи с отсутствием внутренних противоречий может считаться доказанной.

2. Предложенный автором механизм очистки и возможность расчета режимов озвучивания носят перспективный характер.

## Литература

1. Умов Н.А. Теория взаимодействия на расстояниях конечных и ее приложение к выводу электростатических и электродинамических законов. – М., 1873. – 340 с.
2. Lebedew P. Wied. Ann., 62, 1897. – P. 158.
3. Bjerknes V. Wied. Ann., 44, 1891. – P. 558.
4. Кумченко Я.А. Резонаторная природа силового взаимодействия между аэрозольными частицами. Формирование акустической потенциальной ямы // Физика аэродисперсных систем. – Одесса. – 2002. – Вып. 39. – С. 40-50.
5. Казанцев В.Ф. Движение газовых пузырьков в жидкости под действием сил Бьеркнеса, возникающих в акустическом поле // ДАН СССР. – 1959. – Т. 129, № 1. – С. 64-67.
6. Кобелев Ю.А., Островский Л.А., Сутин А.М. Эффект самоосветления для акустических волн в жидкости с пузырьками газа // Письма в ЖЭТФ. – 1979. – Т. 30, вып. 7. – С. 423-425.
7. Физические основы подводной акустики. – М., 1955. – 360 с.

Поступила в редакцию 30.05.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ф. П. Санин, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.