

---

УДК 621.923

Ю. Н. Любимый

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ШУМА**

*В работе предложена методика определения интенсивности кавитационных процессов в жидкой среде по характеристикам шума. Разработана математическая модель и получена формула для определения мощности акустических колебаний. Построена 3D-модель поверхности, характеризующая зависимость уровня и частоты шума от перепада давления на кавитаторе.*

***Ключевые слова:** кавитационный шум, кавитатор, уровень шума, давление, частота, жидкое смазочно-охлаждающее технологическое средство, проточный стенд, гидродинамическая кавитация.*

## Введение

В настоящее время жидкие смазочно-охлаждающие технологические средства находят все большее применение в металлообработке. В частности при абразивной обработке требуется подвод в зону резания жидких сред в активированном состоянии. Это позволяет значительно снизить силы резания, уменьшить количество тепла в зоне контакта абразивного инструмента и поверхности заготовки, способствует интенсивной очистке пор шлифовального круга от засаливания, увеличению интервала времени между его правками. Одним из способов активации жидких СОТС может быть их гидродинамическая кавитационная обработка.

Исследование явлений гидродинамической кавитации при приготовлении и восстановлении жидких СОТС позволяет улучшить их эксплуатационные качества и повысить стойкость. При анализе используемых при этом аппаратных средств важным является определение режимов, при которых возникает кавитация и в дальнейшем достигает требуемого уровня интенсивности. Одним из способов, применяемых в гидродинамических исследованиях кавитационных характеристик процессов и устройств, является анализ так называемого «белого шума» [1] или кавитационного шума [2], который занимает широкую полосу частот, простирающуюся вплоть до 1 МГц. Возникновение этого шума является следствием процесса схлопывания каверн. При протекании жидкой среды через сужающийся участок канала (диффузор) скорость потока возрастает. При этом снижается давление в потоке, что приводит к образованию газоздушных каверн. На последующем расширяющемся участке (конфузор) происходят обратные процессы: уменьшение скорости течения жидкой среды, возрастание давления, пульсации и схлопывание кавитационных зародышей с образованием высоких локальных давлений и температур. Это способствует интенсификации физико-химических процессов и активации жидких СОТС.

В зависимости от интенсивности кавитации изменяется количество и размеры пузырьков, что приводит к изменению акустических эффектов. Поэтому спектральный анализ кавитационного шума может быть использован (как косвенный показатель) в частности для анализа интенсивности кавитации. В работах [1, 3] указывается, что при уменьшении диаметра пузырька частота звука увеличивается.

В работах Ильичева В.И., Лесуновского В.П. и других авторов противоречивые объяснения образования акустических колебаний. Предполагается, что при газовой кавитации основной причиной акустических колебаний являются объемные колебания газовых пузырьков (в основном пузырьков воздуха). Воздушные пузырьки, возникшие в вихрях при движении в турбулентном потоке, под действием пульсаций давления возбуждаются и совершают затухающие колебания на собственной частоте. Излучение шума кавитационными пузырьками при паровой кавитации связано с их захлопыванием [4].

Экспериментальные измерения уровня и спектра акустического шума используются в качестве, хотя и косвенного, но доступного источника информации при изучении кавитационных явлений в акустических полях [5].

Многие исследователи указывают на возможность и эффективность применения спектрального анализа кавитационного шума в гидродинамических исследованиях, однако, процесс проведения экспериментов и анализ их результатов нигде не раскрываются, что вызывает определенные проблемы для исследователя.

## Методика исследований

При выполнении исследований кавитационной обработки жидких рабочих сред наряду с гидродинамическими показателями нами рассматривались акустические эффекты. Для этого был разработан проточный стенд СП-02, на котором испытывались различные конструкции кавитационных насадок. Схема измерения гидродинамических параметров показана на рисунке 1.

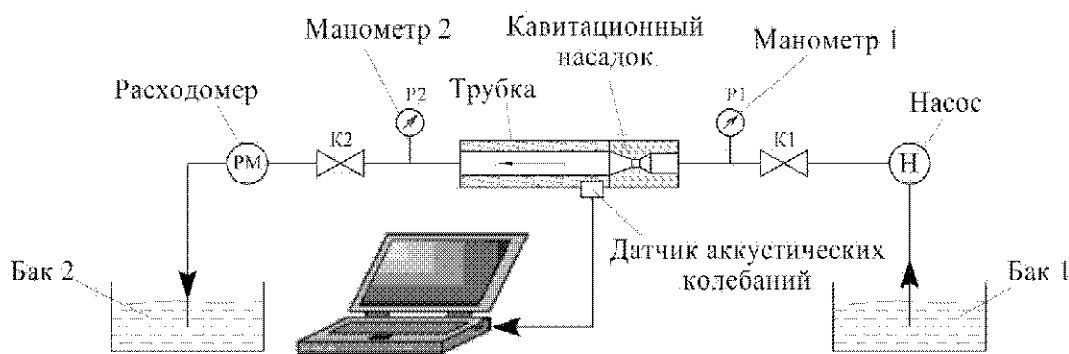


Рис. 1. Схема измерения гидродинамических параметров

Создание напора в системе выполняется при помощи насоса. При этом жидкая среда из бака 1 перекачивалась в бак 2 через кавитационный насадок. Регулировка параметров потока выполнялась кранами  $K1$  и  $K2$ . Контроль давления до и после насадка выполнялся с помощью манометров  $P1$  и  $P2$ , а расход жидкости – счетчиком  $PM$ . Процесс визуально наблюдался в трубке, изготовленной из оргстекла, к которой также был подключен микрофон, осуществляющий запись шумов в зоне кавитации при различных значениях давлений  $P2$ . Внешний вид экспериментального стенда СП-02 показан на рисунке 2.

Запись акустических эффектов при экспериментальных исследованиях выполнялась через микрофон стандартными средствами ОС Windows XP.

В работе Леонова Г.В., Савиной Е.И. [6] для спектрального анализа полученных звукозаписей применяется программа Cool Edit Pro. Для анализа шума нами использовалась более подходящая программа SpectraLAB v.4.32.17, при помощи которой можно

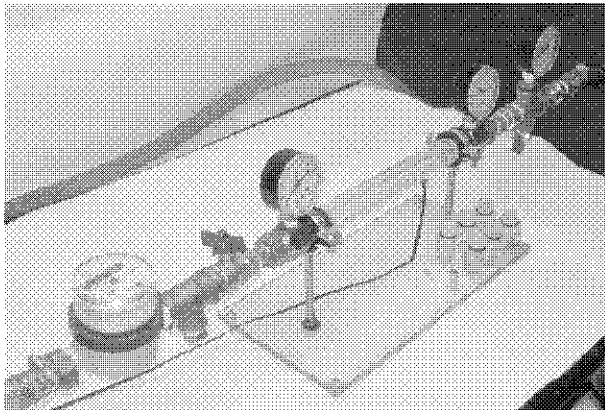


Рис. 2. Внешний вид проточного стенда СП-02

выполнять спектральный анализ в слышимом диапазоне частот как из заранее записанных звуковых файлов, так и непосредственно со звуковой карты.

При проведении эксперимента измерялись параметры расхода жидкости, ее давления и кавитационного шума. При визуальном наблюдении записывались видимые явления кавитации. Были составлены графики, по которым сравнивались гидродинамические и акустические показатели. На рисунке 3 показана амплитудно-частотная характеристика полученной записи кавитационного шума в диапазоне слышимых частот.

На вертикальной оси отмечены значения амплитуд (уровней шума). При этом предварительно был откалиброван опорный уровень измерительной системы микрофон – звуковая карта – программа, относительно которого осуществлялся отсчет. Однако возникновение и развитие кавитации в потоке можно определить при анализе относительных величин звуковых амплитуд [7].

Программный продукт SpectraLAB позволяет сохранить полученную спектрограмму в текстовом формате, т.е. в виде двух линейных массивов. По этим данным, в программном пакете MathCad можно не только построить эту же спектрограмму, но и получить функцию  $n$ -го порядка, характеризующую ее на указанном диапазоне частот (см. рис. 4). Предварительные опыты показали, что интенсивное изменение кавитационного шума происходит в диапазоне частот 1–6 кГц, поэтому, этот интервал и был в дальнейшем нами исследован.

Таким образом для всех экспериментальных значений при различных давлениях  $P$  и соответствующим их записям кавитационного шума, получаем ряд полиномов, описывающих характер распределения уровней шума на определенном диапазоне частот.

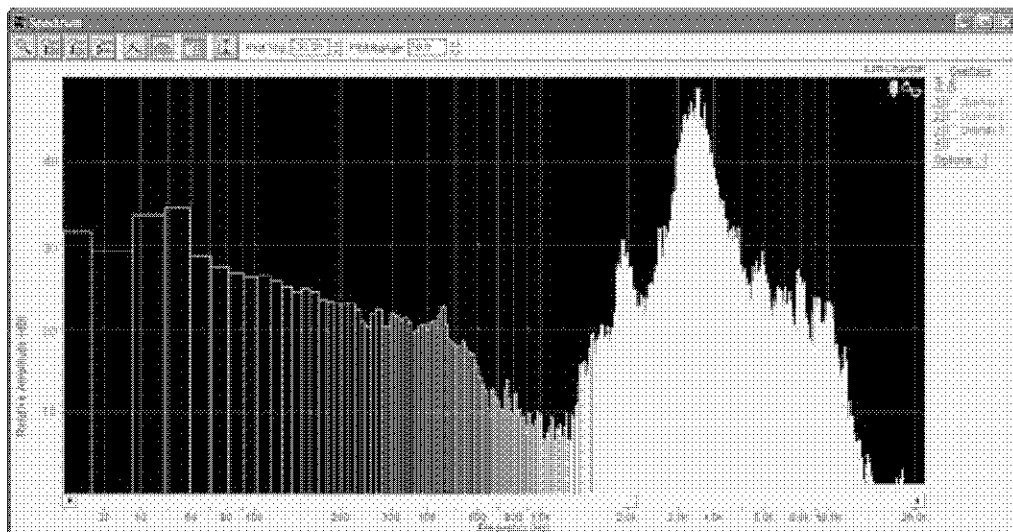


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика кавитационного шума

### Расчетная функция

$$y(x) := a_1 + \frac{a_2 \cdot x}{Kx} + \frac{a_3 \cdot x^2}{Kx^2} + \frac{a_4 \cdot x^3}{Kx^3} + \frac{a_5 \cdot x^4}{Kx^4} + \frac{a_6 \cdot x^5}{Kx^5} + \frac{a_7 \cdot x^6}{Kx^6}$$

$$\Delta := 1000, 1001, \dots, 6000$$

Искомый график и график-шаблон

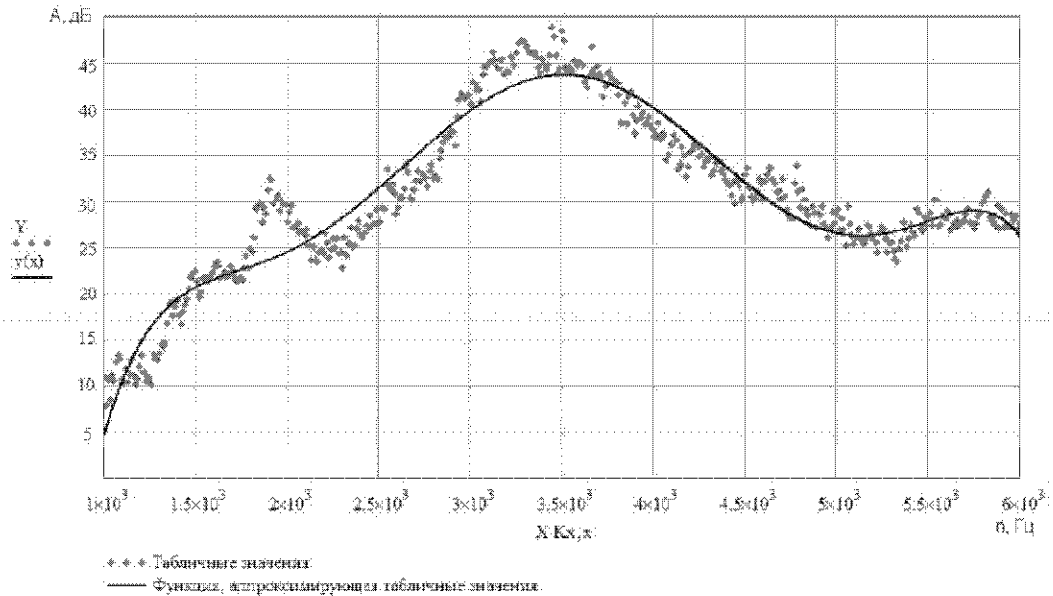


Рис. 4. Построение полинома  $n$ -го порядка

Поскольку в данном случае децибел – это безразмерная величина, применяемая для измерения отношения мощности шума, то при известном опорном уровне мощности  $P_0$  получим:

$$P = P_0 \cdot 10^{\frac{A}{10}}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – опорный уровень мощности, Вт;  $P$  – мощность кавитационного шума, Вт;  $A$  – уровень шума, дБ.

Мощность кавитационного шума рассматривалась на всем указанном диапазоне частот. Поэтому, проинтегрируем полученную нами функциональную зависимость в диапазоне частот от  $f_1$  до  $f_2$  и подставим ее в уравнение (1)

$$P = P_0 \cdot \sqrt[10]{\frac{1}{(f_2 - f_1)} \int_{f_1}^{f_2} y(f) df}. \quad (2)$$

Зная уровень мощности, затраченной на генерирование шума можно косвенно судить об энергетике кавитационного процесса. Это может быть использовано при управлении процессами кавитации. На основании экспериментальных данных гидродинамики потока получены амплитудно-частотные характеристики. Для определения частоты, на которой регистрируется максимальное значение амплитуды, дБ опре-

делялись экстремумы функции  $y(x)$ . Для этого исследованы первая и вторая ее производные. Средствами Mathcad v.14.0 значения частоты и максимальной амплитуды определялись следующим образом:

$$Freq := \text{Maximize}(y, x) = 3,51 \cdot 10^3;$$

$$Amplitude := y(Freq) = 44,26.$$

Полученные результаты можно представить в виде двумерных графиков зависимости параметров между собой, либо в виде поверхности в пространстве. К примеру, рассмотрим трехмерное изображение поверхности, характеризующей взаимосвязь между технологическими параметрами при работе одного из кавитаторов (см. рис. 5). По одной координатной оси откладываем частоты кавитационного шума, по второй – амплитуды (мощности), а по третьей – перепад давления в системе. Для этого составим двумерную матрицу  $B$ , которая содержит коэффициенты полученных полиномов

$$W = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

где  $a_{i,j}$  – коэффициент полинома  $(m-1)$ -го порядка;  $m$  – количество коэффициентов полинома;  $n$  – количество полиномов.

По данной матрице в пакете MathCad строим пространственную поверхность.

В шлифовальных станках рабочие давления в системах подвода жидких СОТС в основном находятся в пределах до 5–6 кг/см<sup>2</sup>. Поэтому, нами рассмотрен именно этот диапазон значений.

Было установлено, что для данных условий эксперимента наблюдается увеличение амплитуды в диапазоне частот 3–4 кГц. На поверхности (см. рис. 5) хо-

рошо виден участок резкого возрастания амплитуды шума в этом диапазоне, что согласуется с данными гидродинамических исследований и визуальных наблюдений.

### Выводы

Предложенная методика позволяет выполнить анализ кавитационных процессов по уровню шума. Это может быть использовано при определении интенсивности процессов кавитации и при исследовании параметров для анализа наиболее эффективных конструкций насадков.

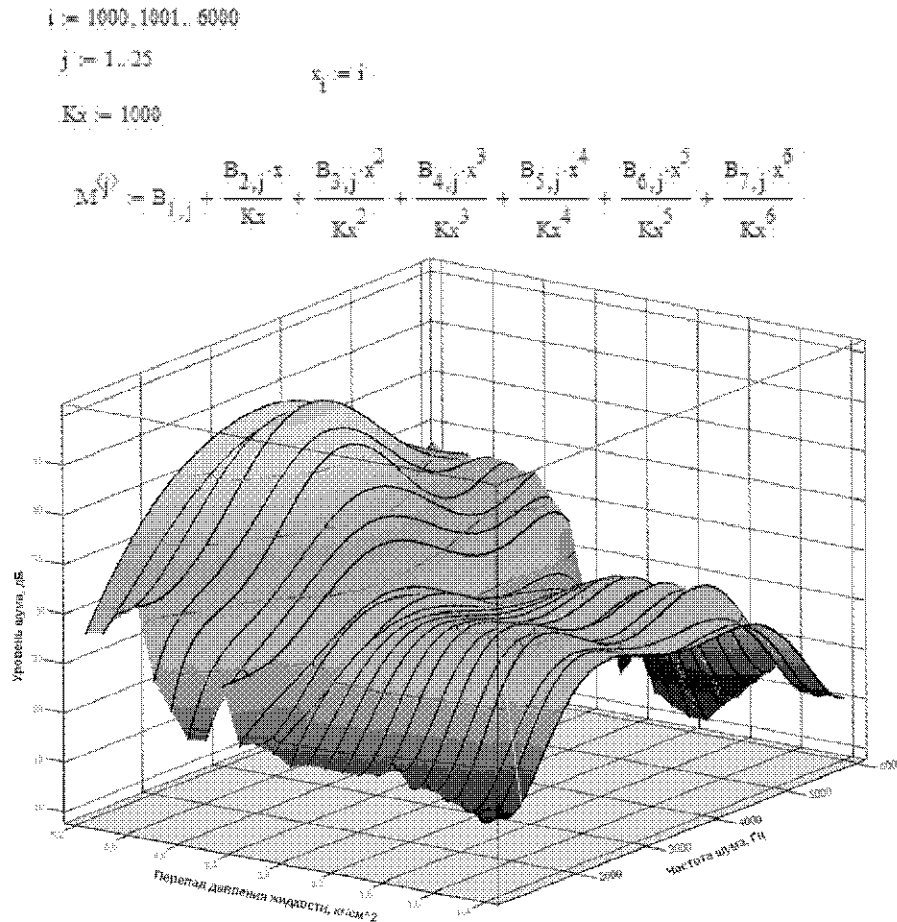


Рис. 5. Трехмерное представление результатов экспериментов

### Список литературы

1. Пирсол И. Кавитация / И. Пирсол ; [пер. с англ. Ю. Ф. Журавлева] ; ред., предисл. и дополн. Л. А. Эпштейна. – М. : Мир, 1975. – 95 с.
2. Федоткин И. М. Использование кавитации в технологических процессах / Федоткин И. М., Немчин А. Ф. – К. : Высш. шк. Изд-во при Киевском ун-те, 1984. – 68 с.
3. Электронный ресурс: <http://e-lib.info/book.php?id=1121022043&p=7>.
4. Арзуманов Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях / Э. С. Арзуманов. – М. : Энергия, 1978. – 304 с.
5. Долинский А. А. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах: теплофиз. основы дискрет.-импульс. ввода энергии / А. А. Долинский, Г. К. Иваницкий. – К. : Наук. думка, 2008. – 381 с.
6. Леонов Г. В. Информационное моделирование кавитационных процессов, инициированных ультразвуковыми осцилляторами / Г. В. Леонов, Е. И. Савина // Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, 2006.
7. Червяков В. М. Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах / В. М. Червяков, В. Г. Однолько. – М. : Машиностроение, 2008. – 116 с.

Одержано 05.09.2011 р.

**Любимий Ю.М. Методика визначення інтенсивності кавітаційних процесів за характеристиками шуму**

*У роботі запропонована методика визначення інтенсивності процесу кавітації у рідкому середовищі за характеристиками шуму. Розроблена математична модель і отримана формула для визначення потужності акустичних коливань. Побудована 3D-модель поверхні, що характеризує залежність рівня і частоти шуму від перепаду тиску на кавітаторі.*

***Ключові слова:** кавітаційний шум, кавітатор, рівень шуму, тиск, частота, рідкий мастильно-охолодний технологічний засіб, проточний стенд, гідродинамічна кавітація.*

**Liubymiy I. Method of cavitation processes intensity determination using noise descriptions**  
**Liubymiy I. Method of determination of cavitation processes intensity on noise descriptions**

*The method of intensity cavitation processes determination is in-process offered in a liquid environment based on noise description. Mathematical model is built and a formula is got for determination of acoustic vibrations power. The surface 3D-model, characterizing level dependence and noise frequency on the overall pressure on cavitator, is built.*

***Key words:** cavitation noise, cavitator, sound-level, pressure, frequency, liquid lubricating-cooling technological mean, running stand, hydrodynamic cavitation.*

---