

УДК 534.232

ЭНЕРГЕТИКА ПРЯМОТОЧНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю. М. ДУДЗИНСКИЙ, О. В. СУХАРЬКОВ, Н. В. МАНИЧЕВА

*Одесский национальный политехнический университет**Получено 3.03.2004*

Исследована тороидальная вторичная кавитационная область, образующаяся при работе прямоточного гидродинамического излучателя с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием. По эрозионному разрушению модельных загрязнений определены геометрические параметры вторичного вихря. С помощью параметров акустического сигнала рассчитана интенсивность поля вблизи зоны звукообразования. Представлены зависимости интенсивности упругих волн и удельной энергии за один период колебаний от избыточного статического давления в жидкости.

Досліджено тороїдальну вторинну кавітаційну зону, яка утворюється при роботі прямоточного гідродинамічного випромінювача з кільцевим соплом і східчастою перешкодою. За ерозійним руйнуванням модельних забруднень визначені геометричні параметри вторинного вихря. За допомогою параметрів акустичного сигналу розраховано інтенсивність поля поблизу зони звукоутворення. Представлено залежності інтенсивності пружних хвиль і питомої енергії за один період коливань від надлишкового статичного тиску в рідині.

A toroidal secondary cavitation domain occurring at operation of the uniflow hydrodynamic sound source with a circular nozzle and stepwise barrier is studied. By erosional destruction of the model contamination the geometrical parameters of the secondary vortex are determined. After the acoustic signal parameters the field intensity in the vicinity of sound production zone is calculated. The elastic wave intensity and the specific power per period of oscillations are presented as the functions of static overpressure in the fluid.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство гидродинамических излучателей (ГДИ) генерируют упругие волны в результате возбуждения потоком жидкости стержней, пластин, мембран или в результате модуляции расхода струи [1, 2]. При этом существенный вклад в энергетику поля вносит сопутствующая первичная гидродинамическая и вторичная акустическая кавитация. Именно кавитация играет главную роль в задачах по интенсификации технологических процессов, протекающих в жидкой фазе. В качестве примеров упомянем разрушение пленок различных загрязнителей (окалина, нагар, асфальто-смолистые отложения), эмульгирование, диспергирование и т. п. [3, 4].

Затопленные струйные оболочки и вихри можно успешно использовать в осесимметричных гидродинамических излучателях прямоточного и противоточного типа для генерирования тонального сигнала высокой интенсивности [5]. В частности, в прямоточном ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием (рис. 1) вытекающая из кругового щелевого сопла в корпусе 1 затопленная струя формирует упругую жидкостную оболочку 2, которая жестко закреплена на выходе из сопла, причем другое ее основание является свободным. Ступенчатое препятствие 3 способствует тому, что часть кинетической энергии струи ра-

сходится на формирование первичного вихря 4, внутри которого за счет эффекта Бернулли создаются условия для развития кавитации. Неустойчивость этого тороидального вихря возбуждает колебания струйной оболочки на собственной частоте. При растяжении оболочки содержимое вихря 4 выходит наружу и за счет эффекта Кармана образуется вторичный тороидальный вихрь 5, генерирующий тональный звук в результате синфазного схлопывания паровых каверн. При этом часть потока струи уходит в окружающее пространство и в автоколебаниях не участвует. Поэтому высота струи-оболочки определяется расстоянием от щелевого сопла до центра вторичного вихря. На рисунке указаны следующие геометрические параметры: $D_c = 2r_1$, $D_{max} = 2r_2$, l , h – диаметры оснований, высота и толщина оболочки соответственно. Гидродинамическими параметрами системы являются ρ , Γ , P_* – плотность, параметр адиабатической сжимаемости, внутреннее давление (прочность жидкости) соответственно и v – скорость струи на выходе из сопла. Как было показано ранее, при оптимальной настройке излучателя параметр l определяется через v [6]. Под воздействием пульсаций как первичного, так и вторичного кольцевых вихрей развитой кавитации вследствие коллапса каверн создается акустическое поле высокой интенсивности, которое, в свою очередь, приводит к возникновению вторичной акустической кавита-

ции на твердых поверхностях.

Проведенные ранее теоретические и экспериментальные исследования энергетических характеристик противоточных ГДИ позволили получить акусто-гидродинамический к. п. д. [7], уточнить координаты вторичного вихря и двумя способами (гидродинамическим и акустическим) определить его интенсивность и удельную энергию вблизи вихря за один период колебаний [8]. При этом в диапазоне гидростатических давлений от 0.1 до 0.6 МПа за счет подбора оптимальной скорости струи на выходе сопла можно на порядок повысить интенсивность упругих волн вблизи активной зоны: с 1.1 до 10 Вт/см². Кроме того, как показано в работе [7], при определенном давлении и соответствующей скорости затопленной струи удается на 50 % повысить к. п. д. противоточного ГДИ. Представляет интерес получение аналогичных характеристик для прямооточных гидродинамических излучателей с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием при наличии избыточного статического давления в рабочей области.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОБЛАСТИ ЗВУКООБРАЗОВАНИЯ

На первом этапе исследований по фотографиям установлено местоположение вторичной торoidalной зоны развитой кавитации и приближенно оценены ее габариты. Кроме того, оценивались размеры области, в пределах которой кавитационная активность проявляется наиболее интенсивно. Заметим, что противоточные излучающие системы используются в основном для эмульгирования нерастворимых одна в другой жидкостей, диспергирования твердых присадок в жидкостях, в устройствах дегазации жидкостей и др. Исходя из этого, в работах [7, 8] исследовалась эрозия свинцовых и алюминиевых образцов. Прямоточные же излучатели, благодаря большой площади активной зоны звукообразования, весьма перспективны для очистки поверхностей деталей машин от различных загрязнителей [4, 9] (нагар, притирочные пасты, окалина и т. п.). Поэтому в качестве образцов, подвергаемых кавитационной обработке, использовались металлические цилиндры, на торец которых наносились “тяжелые” асфальто-смолистые отложения, аналогичные тем, которые образуются на деталях двигателей внутреннего сгорания [10].

Модельная паста (смесь битума, шлаков и мелкодисперсного кварцевого песка) наносилась на предварительно нагретый цилиндр из расчета ~ 5 мг на 1 см² поверхности. Образцы с модельным загрязнением перемещались в радиальном r

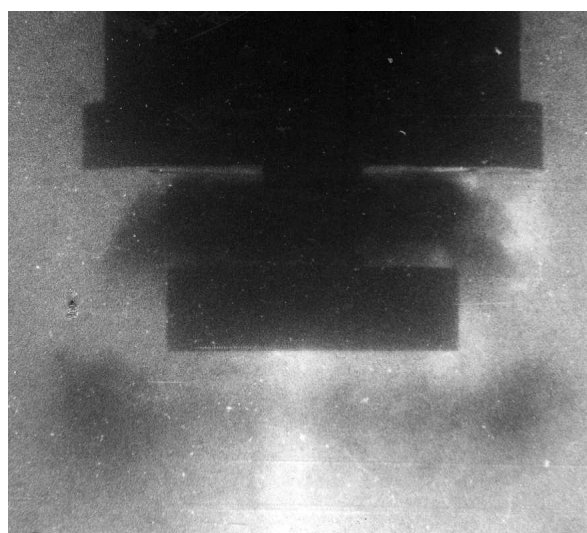
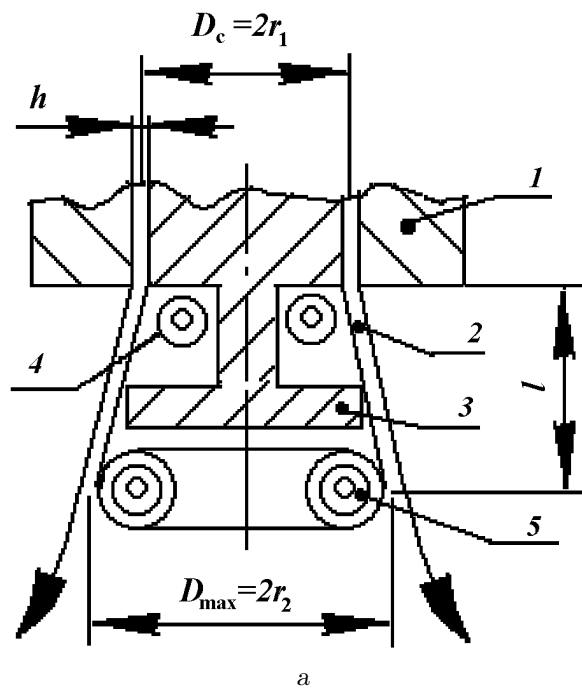


Рис. 1. Прямоточный ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием:
а – схема, б – фотография

(отсчет от оси симметрии ГДИ) и осевом z ($z=0$ – торец сопла) направлениях (см. рис. 1, а). Интенсивность кавитационной эрозии оценивалась по уменьшению массы затвердевшей пасты на аналитических весах с ценой деления 0.01 мг. Предварительно измерялись массы металлических цилиндров до и после нанесения модели асфальто-смолистого загрязнителя. В качестве критерия

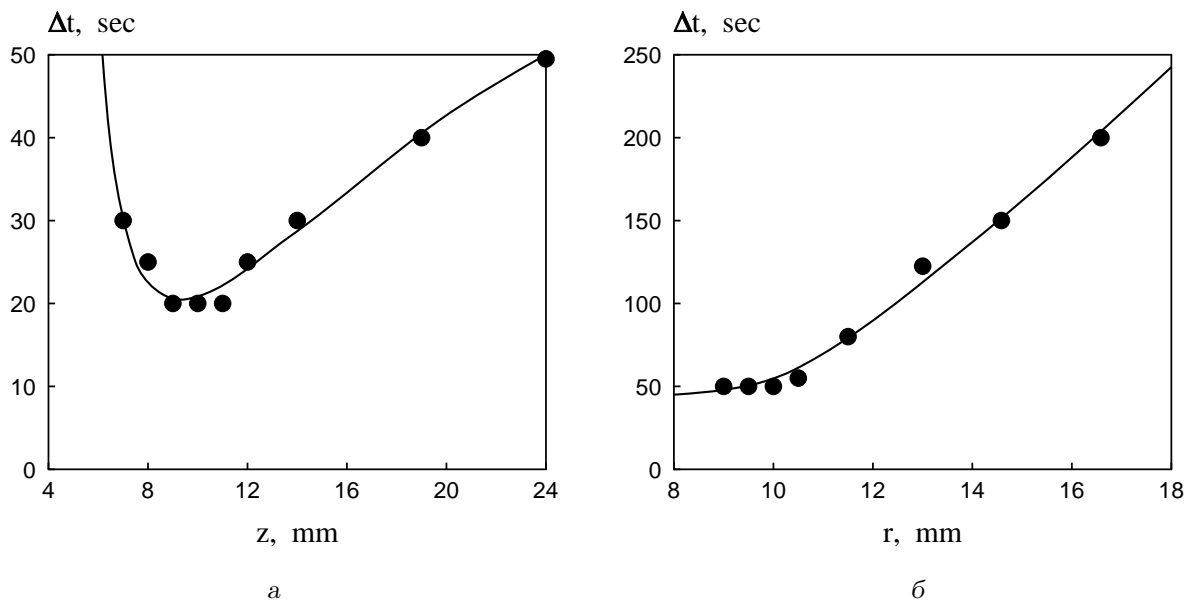


Рис. 2. Зависимости времени очистки образца от осевой z (а) и радиальной r (б) координаты прямогоочного ГДИ

эффективности кавитации использовалось время полной очистки образца Δt .

Измерения проводились при постоянных параметрах: одинаковом гидростатическом давлении, концентрации примесей и температуре жидкости, уровне акустического сигнала ГДИ, координатах (r, z) загрязненных поверхностей образцов. Для выполнения этого условия восемь–десять образцов одновременно устанавливались на различных расстояниях z вдоль оси излучателя при $r = \text{const}$ с помощью соответствующих зажимов. Взвешивания загрязненных цилиндров проводились через каждые $10 \div 15$ с обработки. После полной очистки всех образцов одной партии в тех же зажимах фиксировались аналогичные образцы из другой партии.

Результаты измерений времени полной очистки поверхностей от модельных загрязнителей усреднялись по пяти–семи партиям образцов. По аналогичной методике исследовалась зависимость времени полной очистки цилиндров от радиальной координаты r при $z = \text{const}$. Результаты первого этапа исследований представлены на рис. 2. Как видно из графиков, областью наибольшей кавитационной активности прямогоочного ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием является тороид с наружным диаметром $D_{\text{max}} = 2r_2 \approx 23$ мм (его центр расположен на оси излучателя) и средним диаметром сечения тора $\Delta D \approx 4$ мм.

Следует отметить, что для экспериментальных зависимостей $\Delta t = f_1(z)$ и $\Delta t = f_2(r)$ наблюдалось значительное расхождение значений Δt . Очевидно, это обусловлено тем, что для получения радиальной зависимости времени полной очистки образец перемещали в горизонтальном направлении не через центр сечения тора.

2. ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ И УДЕЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ ПОЛЯ

На втором этапе исследовалась зависимость акустических параметров (уровень P и частота основной гармоники f акустического сигнала) от гидростатического давления P_{st} в герметичной емкости. В работе [11] анализировались распределения акустических полей противоточного осесимметричного ГДИ вдоль радиальной (r) и осевой (z) координат, в работе [12] – аналогичные характеристики прямогоочного ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием. В обоих случаях звуковое давление убывает обратно пропорционально расстоянию. Это позволяет сделать вывод о том, что вторичный тороидальный вихрь является монопольным источником сферических волн, интенсивность которых можно вычислить по формуле

$$I_{\text{ac}} = \frac{P_{\text{ac}}^2}{\rho c} \quad (1)$$

Здесь P_{ac} – эффективное значение звукового давления, измеренное калиброванным гидрофоном; ρ и c – плотность и скорость звука в невозмущенной жидкости соответственно.

Герметичная емкость, трубопроводы и основной насос составляли замкнутую систему, которая полностью заполнялась рабочей жидкостью – отстоянной в течение двух–трех недель водопроводной водой, не подвергавшейся специальной обработке. Гидростатическое давление создавалось дополнительным насосом и регулировалось с помощью клапана. Давление измерялось образцовым манометром. Скорость струи определялась по данным расходомера. Сигнал с выхода калиброванного гидрофона поступал на спектроанализатор и электронный вольтметр.

На рис. 3 представлена зависимость интенсивности упругих волн от статического давления в жидкости. Расстояние между геометрическим центром сферического гидрофона и осью ГДИ изменялось в диапазоне $r = 10 \div 50$ мм. Поскольку длина генерируемых упругих волн намного превышала это значение ($\lambda \gg r$), то фронт можно считать сферическим. Исходя из этого, применима формула (1). В диапазоне гидростатических давлений $P_{st} = 0.1 \div 0.3$ МПа интенсивность упругих волн в этой точке плавно увеличивается примерно от 2 до 15 Вт/см², что хорошо согласуется с экспериментами по определению эффективности очистки [4, 9]. При этом для всех значений давлений в рабочей емкости подбиралась оптимальная скорость струи v на выходе из сопла, что соответствовало максимальному уровню звукового давления P_{ac} .

Зависимость частоты основной гармоники сигнала от гидростатического давления представлена на рис. 4. Регулируя давление в емкости от 1 до 3 атм, можно плавно повышать частоту от 0.65 до 1.8 кГц. При этом видна тенденция к более медленному росту частоты при $P_{st} \geq 0.15$ МПа. Подобная же особенность наблюдалась и в случае противоточного ГДИ, а для более вязкой жидкости (трансформаторное масло) замедленный рост частоты был отмечен, начиная со значения 0.4 МПа [11]. В связи с этим интересно оценить, как изменяется с увеличением избыточного давления удельная энергия гидродинамического излучателя, генерируемая за период колебаний

$$W_{pd} = \frac{I_{ac}}{f} = \frac{P_{ac}^2}{\rho c f}. \quad (2)$$

По результатам измерений зависимостей $I_{ac}(P_{st})$ и $f(P_{st})$ по формуле (2) были пересчитаны соответствующие значения W_{pd} . На рис. 5 представлена

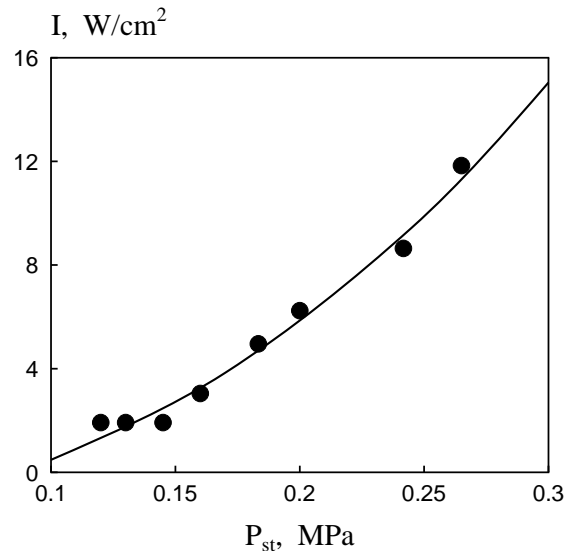


Рис. 3. Зависимость интенсивности акустического поля от гидростатического давления в рабочей емкости

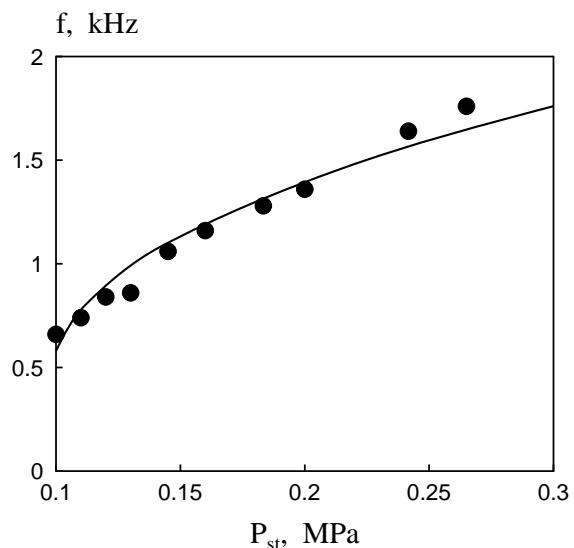


Рис. 4. Зависимость частоты основной гармоники звука от гидростатического давления в рабочей емкости

удельная энергия упругих волн как функция гидростатического давления в жидкости.

Следует отметить, что с ростом давления наблюдается насыщение характеристики $W_{pd}(P_{st})$ и ее асимптотическое приближение к значению $W_{sat} = 2.5$ Дж/см². Очевидно, что в диапазоне $P_{st} \leq 0.27$ МПа возрастание интенсивности звука обусловлено двумя факторами: увеличением энер-

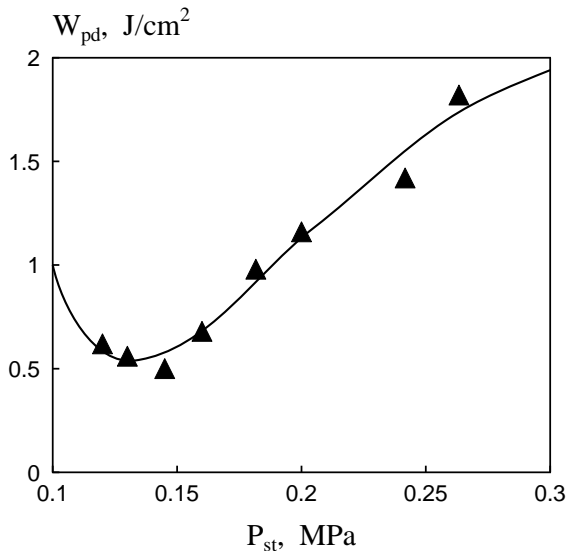


Рис. 5. Зависимость удельной энергии одного колебания от гидростатического давления в рабочей емкости

гии схлопывания паровых каверн во вторичном тороидальном вихре и возрастанием частоты схлопываний. При гидростатических давлениях, больших 0.27 МПа, дальнейший рост интенсивности поля в основном зависит от возрастания частоты колебаний. Объяснить это можно тем, что с увеличением отношения радиусов пузырька R_{max}/R_{min} давление в нем в момент схлопывания растет [13]. Очевидно, что вначале с увеличением гидростатического давления уменьшение радиуса каверны в момент схлопывания R_{min} происходит быстрее, чем уменьшение радиуса R_{max} в момент ее максимального расширения [8]. Начиная же с некоторого значения P_{st} , второй процесс становится преобладающим. Незначительное понижение удельной энергии в диапазоне $P_{st}=0.1 \div 0.15$ МПа обусловлено процессом дегазации воды на начальной стадии включения и настройки излучателя. Если же плавно уменьшать статическое давление, одновременно настраивая ГДИ на максимальный сигнал за счет регулировки скорости струи на выходе из кольцевого сопла, то функция $W_{pd}(P_{st})$ будет монотонно уменьшаться.

ВЫВОДЫ

Экспериментально исследована тороидальная вторичная кавитационная зона, образующаяся при работе гидродинамических излучателей с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием. По фотографиям и в результате обработки образцов с

модельным загрязнителем определены координаты вторичного вихря. Установлено, что пространство наибольшей кавитационной активности находится за пределами конструктивных элементов излучателя. Таким образом, сама конструкция не подвергается действию кавитационной эрозии.

По результатам измерения параметров акустических полей вблизи зоны звукообразования получена зависимость акустической интенсивности от гидростатического давления. Генерация высокоамплитудных волн разрежения – сжатия вблизи вторичного тороидального вихря развитой кавитации позволяет эффективно применять гидродинамические излучатели с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием для интенсификации различных технологических процессов (например, для очистки поверхностей деталей).

Используя зависимость частоты колебаний от гидростатического давления, была оценена удельная энергия волн, генерируемых за один период. Наличие эффекта насыщения функции удельной энергии показывает, что дальнейшее увеличение интенсивности звука связано, в основном, с ростом частоты звуковых колебаний.

1. Richardson E. G. Flow noise // Technical aspects of sound: vol. 3.– Amsterdam, New York, 1962.– P. 123–177.
2. Константинов Б. П. Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченной среде.– Л.: Наука, 1974.– 144 с.
3. Дудзінський Ю., Манічева Н. Кавітаційна ерозія металу в потужних акустичних полях // Тези доп. 6-го Міжнарод. симпоз. українських інженерів-механіків.– Львів, 21–23 травня 2003 року.– С. 159.
4. Дудзинский Ю. М., Сухарьков А. О., Сухарьков О. В. Очистка прецизионных деталей машин в мощных акустических полях // Прогрессивные технологии и системы машиностроения.– 2003.– Вып. 25.– С. 123–127.
5. Назаренко А. Ф. Гидродинамические излучатели // Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой.– М.: Сов. энцикл., 1979.– С. 79–81.
6. Дудзинский Ю. М., Манічева Н. В., Назаренко О. А. Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений // Акуст. вісн.– 2001.– 4, N 2.– С. 38–46.
7. Дудзинский Ю. М., Назаренко А. Ф. Эффективность работы осесимметричных гидродинамических излучателей в условиях избыточного статического давления // Акуст. ж.– 1996.– 42, N 4.– С. 569–572.
8. Дудзинский Ю. М., Назаренко А. А. Энергетические характеристики вторичной вихревой области осесимметричного гидродинамического излучателя // Акуст. вісн.– 2000.– 3, N 1.– С. 36–41.

9. Максимов В. Г., Сухарьков О. В., Сухарьков А. О. Очистка деталей автомобилей с использованием гидродинамических излучателей // Тр. Одес. политехн. ун-та.– 2002.– Вып. 1(17).– С. 65–68.
10. Козлов Ю. С. Очистка изделий в машиностроении.– М.: Машиностроение, 1982.– 264 с.
11. Дудзинский Ю. М. Осесимметричные гидродинамические излучатели в условиях статического давления.– Одесса: Дисс. канд. техн. наук, 1990.– 170 с.
12. Сухарьков О. В. Повышение эффективности очистки сложнопрофильных деталей машин гидродинамическими источниками колебаний.– Одесса: Дисс. канд. техн. наук, 1990.– 170 с.
13. Агранат Б. А., Башкиров В. И., Китайгородский Ю. И. Кавитационное разрушение металлов и сплавов в ультразвуковом поле // Применение ультразвука в машиностроении.– Минск, 1964.– С. 89–93.