

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ
ПРЯМОТОЧНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙTHE ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF AXIALLY SYMMETRIC
DIRECT-FLOW HYDRODYNAMIC RADIATORS

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования акустических характеристик осесимметричных прямооточных гидродинамических излучателей в зависимости от геометрических параметров кольцевого сопла.

Summary. The results of the experimental research of axially symmetric direct-flow hydrodynamic radiators acoustic characteristics are presented as a function of geometric parameters of circular nozzle.

Проблема обеспечения большей дальности действия систем подводной связи последние десятилетия стимулировала разработку и исследование низкочастотных (50 Гц ... 10 кГц) источников звука, способных работать в условиях избыточного гидростатического давления (см., например, [1...8]). Теоретические и экспериментальные исследования показали, что перспективными для решения задач подводной связи являются осесимметричные гидродинамические излучатели (ГДИ) [4...11]. В результате теоретических исследований установлено, что моделью таких ГДИ может служить упругая затопленная струя-оболочка [6...11]. В работе [10] рассмотрена модель осесимметричного прямооточного ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием, получена аналитическая зависимость частоты основного тона акустического сигнала от геометрических параметров струи-оболочки и гидродинамических параметров жидкости. Однако отсутствие экспериментальных исследований по соответствию разработанной математической модели реальным излучателям данного типа затрудняет их использование в гидроакустических системах связи.

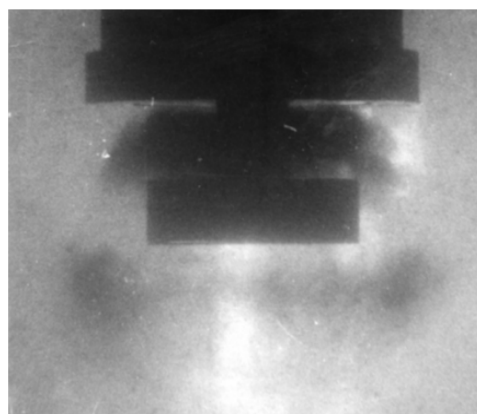
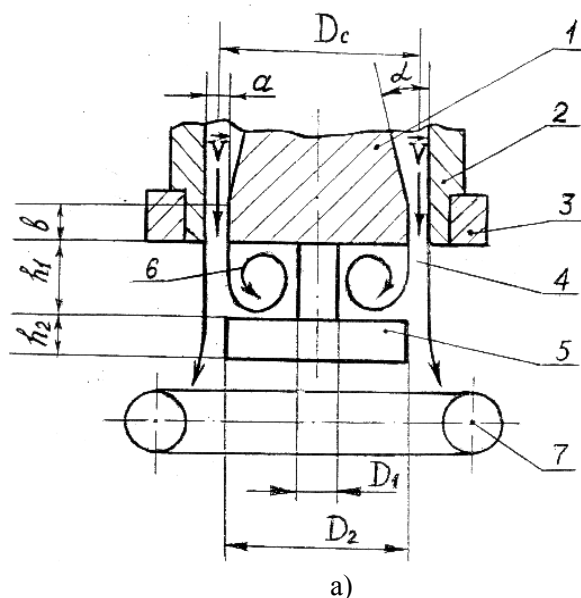
Поэтому цель данной статьи – экспериментальное исследование акустических характеристик осесимметричных прямооточных гидродинамических излучателей в зависимости от геометрических параметров кольцевого сопла.

1. Модель осесимметричного прямооточного ГДИ. Практические исследования показали, что использование электроакустических излучателей магнитострикционного и пьезоэлектрического типов на частотах менее 10 кГц нецелесообразно. Это связано с уменьшением КПД и значительным увеличением массы и габаритов излучателей [1...3]. Поиски новых источников звука привели к созданию мощных низкочастотных излучателей, потребляющих в процессе работы вещества, либо всегда имеющиеся на судне, либо находящиеся в непосредственной близости от него (дизельное топливо и масло, газ, воздух, вода). Однако к недостаткам таких излучателей следует отнести: во-первых, относительную сложность эксплуатации; во-вторых, резкое уменьшение КПД или полную потерю работоспособности при увеличении глубины более 100 м вследствие повышения жёсткости и возникновения усталостных явлений в мембранах, диафрагмах и сиффонах, а также утечки сжатого воздуха в системе компенсации гидростатического давления [1,3].

С точки зрения электробезопасности, массы и габаритов, простоты и надёжности в эксплуатации перспективными для решения задач подводной связи являются осесимметричные гидродинамические излучатели (ГДИ) [4...14].

Особенность осесимметричных ГДИ – отсутствие вибрирующих элементов конструкции, что обуславливает их длительный срок службы. При этом пульсирующий первичный вихрь является источником энергии, частоту основного тона колебаний задаёт упругая струя-оболочка, а непосредственно активной зоной гидродинамического звукообразования является вторичный вихрь [5,7]. Осесимметричные ГДИ можно разделить на прямооточные, у которых струя после встречи с препятствием удаляется от сопла, и противоточные – струя разворачивается вогнутым отражателем в виде лунки, близкой по форме к параболоиду вращения, и направляется в сторону сопла, частично замыкаясь на его наружную кромку. Недостатком противоточных ГДИ является относительно низкая стабильность оптимального режима генерирования акустических колебаний. Это связано с необходимостью в процессе работы данного излучателя обеспечивать высокую соосность между конусоцилиндрическим соплом и отражателем [4]. Преимуществом осесимметричного прямооточного ГДИ [7, 10] является строго заданное формирование кольцевой струи перед обтеканием ею ступенчатого

цилиндрического препятствия 5 (рис.1), что позволяет существенно повысить стабильность режима генерирования звуковых волн.



а) схема; б) фотография излучателя при оптимальном режиме работы

Прямоточный ГДИ состоит из конусно-цилиндрического обтекателя 1, цилиндрического корпуса 2, кольцевого насадка 3, установленного на корпусе 2, и ступенчатого цилиндрического препятствия 5 (рис. 1,а). Щелевое сопло, образованное обтекателем 1 и корпусом 2, служит для формирования кольцевой струи. Основным типоразмером данного излучателя служит отношение a/D_c , где a – ширина щели кольцевого сопла, D_c – средний диаметр сопла.

Рассмотрим механизм звукообразования осесимметричного прямоточного ГДИ (рис.1,а). Из кольцевого щелевого сопла в корпусе 2 с заданной скоростью V вытекает затопленная струя (струя-оболочка) 4. Считается [10], что эта “оболочка” жестко защемлена на выходе из сопла, а другое её основание является свободным. Ступенчатое препятствие 5 способствует тому, что часть кинетической энергии струи расходуется на формирование первичного вихря 6, внутри которого за счет эффекта Бернулли создаются условия для развития кавитации. Неустойчивость этого тороидального вихря возбуждает колебания струйной оболочки на собственной частоте. При растяжении свободного края оболочки содержимое вихря 6 выходит наружу и за счет эффекта Кармана образует вторичный тороидальный вихрь 7, генерирующий тональный звук в результате синфазного схлопывания кавитационных пузырьков. Максимум уровня звука достигается для некоторых оптимальных значений геометрических и гидродинамических параметров осесимметричного излучателя [7].

На рис. 1,б представлена фотография излучателя в процессе генерирования акустических колебаний при оптимальном режиме его работы. Видно, что зона звукообразования (зона наибольшей кавитационной активности 7) находится за пределами конструктивных элементов излучателя. Таким образом, сама конструкция не подвергается действию кавитационной эрозии.

Применительно к рассмотренной модели прямоточного ГДИ решена задача о собственных колебаниях упругой затопленной оболочки-струи, жёстко защемленной на одном и свободной на другом основании [10]. С помощью методики, описанной в работе [6], аналитически получена формула для расчета частоты основного тона генерируемого акустического сигнала:

$$f_0 = \frac{1}{\pi \cdot D_{\text{цил}}} \cdot \sqrt{\frac{(12 + 0,25k_0^4 h^2 D_{\text{цил}}^2) \cdot \Gamma \cdot (P_* + \Delta P_{\text{ст}})}{36\rho}}, \quad (1)$$

где ρ , Γ , P_* , $\Delta P_{\text{ст}}$ – плотность, параметр адиабатической сжимаемости, внутреннее давление в жидкости, избыточное по сравнению с атмосферным статическое давление в жидкости, соответственно. В выражении (1) $k_0 = 1,8751/l$ – параметр, соответствующий минимальному

значению собственной частоты оболочки; l, h – высота и толщина оболочки, соответственно. Средний диаметр эквивалентного цилиндра оболочки $D_{\text{цил}} = (D_c + D_{\text{макс}})/2$, где D_c – средний диаметр сопла ГДИ, а $D_{\text{макс}}$ – диаметр вторичного тороидального вихря 7 (рис.1,а), который можно оценить по фотографиям работающего излучателя (рис. 1, б).

Нелинейный параметр $\Gamma = (6,5 \dots 10,5)$ для большинства жидкостей. Если учесть, что осесимметричные ГДИ генерируют звук только при наличии тороидальных зон развитой кавитации, то вместо внутреннего давления следует взять предел прочности жидкости на разрыв. Для отстоянной водопроводной воды, не подвергнутой выше приведенной специальной обработке, динамические измерения, проведенные Дэвисом [12], дали результат $P^* = (0,8 \dots 1,4)$ МПа. В рассматриваемой модели для отстоянной в течение двух недель при стабильной температуре воды были приняты значения $\Gamma = 7,1 : P^* = 1,2$ МПа.

2. Анализ экспериментальных исследований. Для проверки соответствия приведенной в [10] математической модели параметрам реального устройства были исследованы акустические характеристики девяти осесимметричных прямооточных ГДИ. Ширина щели кольцевого сопла a изменялась в интервале от 0,3 до 1,5 мм, а средние диаметры сопла имели значения от 6,5 до 32 мм. Для всех излучателей геометрические параметры ступенчатого цилиндрического препятствия принимали следующие значения: $h_1 = h_2 = D_1 = 0,3 D_c$; $D_2 = 0,88 D_c$ (см. рис. 1,а). Угол между конической поверхностью обтекателя 1 и цилиндрической поверхностью корпуса 2 излучателя $\alpha = 13,5^\circ$. Конические сопла с таким углом обладают наибольшими коэффициентами расхода и скорости в широком диапазоне чисел Рейнольдса, и близки по гидродинамическим характеристикам к коноидальным соплам [см., например, 13].

Излучатели помещались в ёмкость, снабжённую иллюминаторами; рабочей жидкостью служила водопроводная вода, которая для установления равновесия газосодержания отстаивалась перед экспериментом в течение двух недель. Поток жидкости из сопла ГДИ создавался насосом с плавно регулируемым расходом. В ходе экспериментов избыточное гидростатическое давление составляло 3 кПа. Акустическое давление воспринималось пьезокерамическим гидрофоном с чувствительностью 22 мкВ/Па, преобразовывалось в электрические сигналы, которые поступали на вольтметр, спектроанализатор и осциллограф. Гидрофон был размещен на расстоянии 50 мм от оси излучателя, т.е. в зоне линейного затухания экспоненциального упругого импульса [11].

Зависимости гидродинамических параметров ГДИ от основного типоразмера излучателя для $a = \text{const}$ и $D_c = \text{const}$ представлены соответственно в таблицах 1 и 2. Оптимальная скорость струи $V_{\text{опт}}$ определялась по расходу и площади торцевого сечения сопла при генерировании излучателем звука максимальной интенсивности. Гидродинамическая мощность струи рассчитывалась по формуле:

$$N_{\text{ГД}} = \frac{S_c \rho V_{\text{опт}}^3}{2}, \quad (2)$$

где S_c – площадь сопла ($S_c = \pi D_c a$); ρ – плотность рабочей жидкости.

Таблица 1 – Гидродинамические параметры ГДИ ($a = \text{const} = 0,5$ мм)

Основной типоразмер ГДИ, a/D_c [мм/мм]	0,5/6,5	0,5/13	0,5/19,5	0,5/26	0,5/32
Оптимальная скорость струи, $V_{\text{опт}}$ [м/с]	25	31	34,5	37,5	40
Гидродинамическая мощность струи, $N_{\text{ГД}}$ [кВт]	0,080	0,303	0,629	1,076	1,608

Таблица 2 – Гидродинамические параметры ГДИ ($D_c = \text{const} = 13$ мм)

Основной типоразмер ГДИ, a/D_c [мм/мм]	1,5/13	1,0/13	0,8/13	0,5/13	0,3/13
Оптимальная скорость струи, $V_{\text{опт}}$ [м/с]	22	25	26,5	31	36
Гидродинамическая мощность струи, $N_{\text{ГД}}$ [кВт]	0,326	0,319	0,305	0,303	0,286

Как видно из таблиц с уменьшением основного типоразмера ГДИ оптимальная скорость струи возрастает. Что касается мощности струи, то с увеличением среднего диаметра сопла от 6,5 до 32 мм

она возрастает примерно в 20 раз (табл. 1). Однако увеличение площади сопла за счёт расширения параметра a от 0,3 до 1,5 мм повышает $N_{ГД}$ всего лишь на 14 % (табл. 2).

Для формирования кольцевой струи заданной толщины в исследуемом излучателе коническая часть сопла переходит в цилиндрическую. Предложенная конструкция кольцевого сопла позволяет существенно уменьшить габариты и массу излучателя, сохраняя при этом заданную производительность. На рис. 2 представлена зависимость величины звукового давления от параметра b/a , где b – интересующая нас высота цилиндрической части обтекателя 1 (см. рис. 1,а).

Видно, что зависимость акустического давления от параметра b/a имеет экстремальный характер и принимает максимальное значение при $b/a = 3 \dots 5$. Уменьшение высоты цилиндрической части обтекателя до нуля, также как и увеличение этого параметра до 12, ведет к снижению $P_{ак}$ примерно на 40%. В частотном спектре генерируемых колебаний существенных изменений при этом не наблюдается.

На рис. 3,а представлена зависимость частоты основного тона звука от среднего диаметра кольцевого сопла ГДИ.

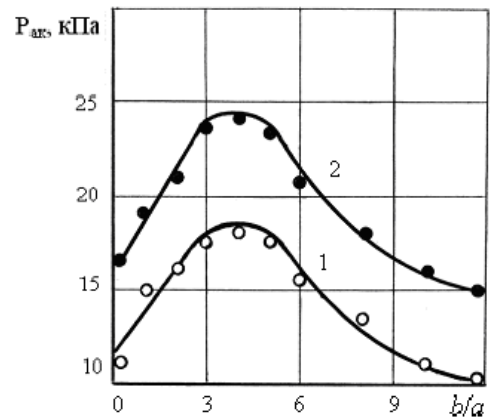


Рисунок 2 – Зависимость акустического давления от параметра b/a для значений основного типоразмера a/D_c [мм/мм]: 1 - 0,5/13; 2 – 0,5/26

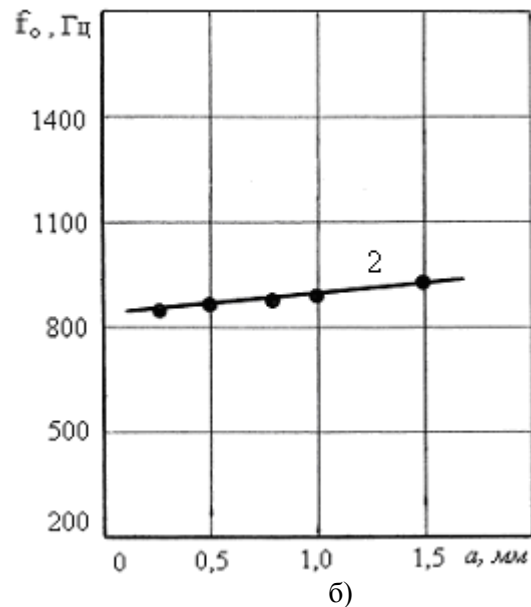
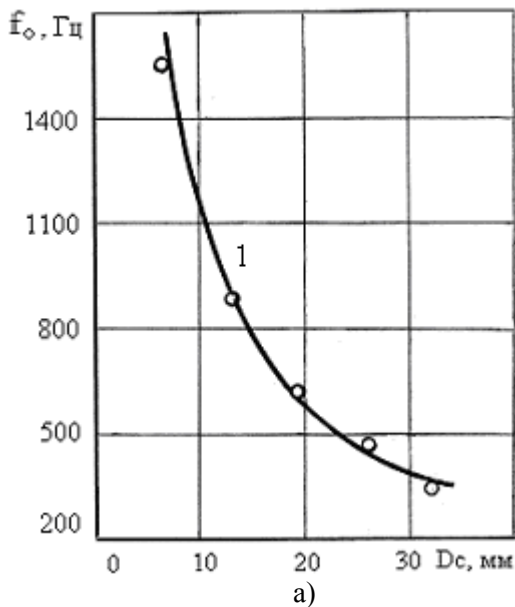


Рисунок 3 – Зависимость частоты основного тона звука:
а) от среднего диаметра кольцевого сопла ($a = \text{const} = 0,5$ мм);
б) от ширины щели кольцевого сопла ($D_c = \text{const} = 13$ мм)

Видно, что теоретическая зависимость (1) (кривая 1) хорошо соответствует экспериментальным точкам для значений $D_c > 13$ мм или соответственно $D_{щел} > 18$ мм. При этом с увеличением D_c от 6,5 до 32 мм частота основного тона звука уменьшается от 1550 до 350 Гц. Известно [14], что увеличение габаритов пульсирующего или осциллирующего тела приводит к уменьшению низшей из его собственных частот. Результаты эксперимента, представленные на рис. 3,а хорошо согласуются с этой закономерностью.

Зависимость частоты основной гармоник колебаний от ширины щели сопла ГДИ показана на рис. 3,б. Видно, что ширина щели сопла и, соответственно, толщина струйной оболочки практически не влияют на частоту основного тона акустического сигнала, причем экспериментальные точки хорошо подтверждают аналитический расчет, проведенный по формуле (1) (кривая 2). Объяснить этот факт можно одновременным влиянием двух противодействующих физических закономерностей. С одной стороны, увеличение толщины струи приводит к возрастанию её модуля упругости и,

соответственно, к повышению частоты f_0 [10]. С другой стороны, одновременно с увеличением параметра a возрастает удельная масса единицы площади оболочки, что неизбежно понижает собственную частоту излучателя.

На рис. 4 представлены зависимости акустического давления от параметров D_c и a .

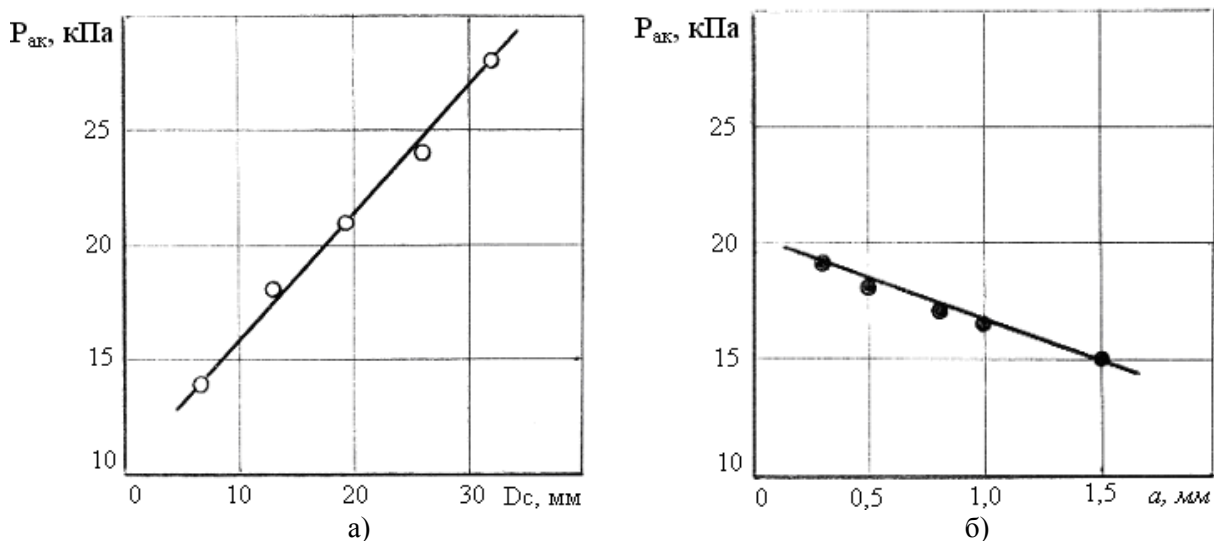


Рисунок 4 – Зависимость акустического давления:

а) от среднего диаметра кольцевого сопла ($a = \text{const} = 0,5$ мм);

б) от ширины щели кольцевого сопла ($D_c = \text{const} = 13$ мм)

Как и следовало ожидать, увеличение среднего диаметра кольцевого сопла ведет к значительному росту звукового давления (рис. 4,а), что обусловлено возрастанием гидродинамической мощности струи (табл. 1) при неизменном акусто-гидродинамическом КПД осесимметричных ГДИ [4]. В то же время, увеличение ширины щели сопла и, соответственно, толщины струйной оболочки от 0,3 до 1,5 мм снижает величину звукового давления с 19 до 15 кПа (рис. 4, б). Полученный результат на первый взгляд можно считать парадоксальным, так как в этом случае происходит некоторое повышение гидродинамической мощности струи (табл. 2). Объяснение данного факта следует искать в физических свойствах жидкоструйной оболочки. Очевидно, что с увеличением параметра a и возрастанием удельной массы единицы площади оболочки повышается её инертность. Это ведет к уменьшению акусто-гидродинамического КПД и, соответственно, снижению интенсивности сигнала. Все сказанное выше хорошо согласуется с результатами, полученными в работах [4, 8].

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Осесимметричные прямооточные гидродинамические излучатели являются источниками мощных акустических сигналов в области звуковых частот (350...1550 Гц) и перспективны для применения в гидроакустических системах подводной связи.

2. Кольцевое сопло, состоящее из конусно-цилиндрического обтекателя и цилиндрического корпуса, обеспечивает строго заданное формирование кольцевой струи перед обтеканием ею ступенчатого препятствия. Такая конструкция сопла позволяет существенно повысить стабильность режима генерирования звуковых волн.

3. Зависимость величины звукового давления от параметра, связывающего высоту цилиндрической части обтекателя и ширину щели кольцевого сопла, носит экстремальный характер и принимает максимальное значение при $b/a = 3...5$.

4. На амплитудные и частотные характеристики прямооточных излучателей с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием существенное влияние оказывает средний диаметр кольцевого сопла. Установлено, что частота основной гармоники акустических волн обратно пропорциональна среднему диаметру сопла. При этом получено не только качественное, но и количественное соотношение между теоретическими и экспериментальными данными.

5. Незначительное влияние ширины щели кольцевого сопла на гидродинамическую мощность струи, амплитуду и частоту генерируемого сигнала при оптимальном режиме позволяет питать данный тип излучателей от насосов различной производительности.

Литература

1. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики; Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978. – 448 с.
2. Митько В.Б., Евтютов А.П., Гуцин С.Е. Гидроакустические средства связи и наблюдения. – Л.: Судостроение, 1982. – 200 с.
3. Акустика дна океана; Пер. с англ. / Под ред. У.Купермана и Ф.Енсена. – М.: Мир, 1984. – 454 с.
4. Дудзинский Ю.М., Назаренко А.Ф. Эффективность работы осесимметричных гидродинамических излучателей в условиях избыточного статического давления // Акуст.ж. – 1996. – 42. – № 4. – С. 569 – 572.
5. Дудзинский Ю.М., Назаренко А.А. Энергетические характеристики вторичной вихревой области осесимметричного гидродинамического излучателя // Акуст. вісн. – 2000. – 3. – № 1. – С. 36 – 41.
6. Dudzinski Yu. M., Suharkov O. V., Manicheva N. V. Axial-symmetric hydrodynamic radiators used for fluid cavitation threshold measurement // IV Int. Hutsulian Workshop on Mathematical Theories and their Application in Physics and Technology. – Austria: Timpani, 2004. – P. 275- 284.
7. Дудзинский Ю.М., Сухарьков О.В., Маничева Н.В. Энергетика прямого гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления // Акуст. вісн. – 2004. – 7. – № 1. – С. 44 – 49.
8. Дащенко А.Ф., Дудзинский Ю.М. Собственные колебания струйной оболочки в условиях гидростатического давления // Прикладная механика. – 2004. – 40. – № 12. – С. 92 – 98.
9. Дудзінський Ю.М., Сухарьков А.О., Назаренко О.А. Автоколивання пружного зануреного осесимметричного струменя-оболонки // Акуст. вісн. – 2003. – 6. – № 3. – С. 29 – 33.
10. Дудзінський Ю.М., Сухарьков О.В., Маничева Н.В. Модель прямого гидродинамического випромінювача з кільцевим соплом і східчастою перешкодою // Акуст. вісн. – 2004. – 7. – № 3. – С. 49 – 54.
11. Дудзинский Ю.М. Ближнее поле осесимметричного гидродинамического излучателя // Акуст. вісн. – 2004. – 7. – № 4. – С. 48 – 51.
12. Кнэпп Р., Дэйли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 688 с.
13. Большаков В.А., Попов В.Н. Гидравлика. – К.: Вища школа, 1989. – 216 с.
14. Скучик Е. Основы акустики. – М.: Мир, 1976. – Т.2. – 542.