

ЭНЕРГЕТИКА ЗАТОПЛЕННЫХ КОНИЧЕСКИХ СТРУЙНЫХ ОБОЛОЧЕК

Н. В. МАНИЧЕВА

*Одесский национальный политехнический университет
65044, пр. Шевченко, 1, Одесса, Украина*

Осесимметричные гидродинамические излучатели противоточного типа моделируются затопленной струйной оболочкой в виде усеченного конуса. Динамика оболочки определяет характеристики генерируемого акустического поля, в частности, его интенсивность. Чем больше амплитуда деформации изгиба свободного края струйной оболочки, тем выше интенсивность звука, генерируемого при коллапсе паровых каверн. Этому соответствует оптимальная скорость струи, при которой частота пульсаций неустойчивого тороидального вихря совпадает с собственной частотой оболочки. Работа посвящена экспериментальному исследованию зависимости интенсивности акустического поля, генерируемого данными источниками звука, от геометрических, гидродинамических параметров струйной оболочки и свойств жидкости.

ВВЕДЕНИЕ

Антенные решетки, набранные из электроакустических преобразователей, обладают, благодаря малой длине волны и узкой диаграмме направленности, высокой разрешающей способностью. Это обусловило успешное применение данного типа излучателей в морской археологии. При этом глубина проникновения сигнала в грунт ограничена значением (10...20) м. Вместе с тем, электроакустические излучатели магнитострикционного и пьезоэлектрического типа весьма эффективны лишь на ультразвуковых частотах (≥ 20 кГц). Однако на низких частотах (5...6) кГц они обладают малым КПД, а на частотах менее 1 кГц их нецелесообразно использовать из-за больших габаритов и массы. Кроме того, для этого типа источников звука характерна резонансная амплитудно-частотная характеристика. Увеличение полосы рабочих частот приводит к значительному уменьшению интенсивности звука.

Параметрические излучатели, использующие нелинейное взаимодействие первичных волн накачки в воде, обладают сверхразрешением, широкополосностью, нижний диапазон вторичных волн у них порядка 100 Гц. Однако низкий КПД (3...5)% в морской воде существенно снижает глубину проникновения акустических импульсов в грунт.

В сейсмической акустике, исследовании донных отложений, морской геологии наиболее эффективными источниками акустических волн с точки зрения мощности и ширины спектра излучаемых сигналов до сих пор считаются электроискровые излучатели и взрывы [1 – 6]. Их основное преимущество, по сравнению с традиционными преобразователями магнитострикционного или пьезоэлектрического типа: широкая полоса рабочих частот и возможность излучать большую энергию в виде коротких акустических импульсов. При неоспоримых достоинствах для различных задач подводной акустики искровые и взрывные источники звука обладают рядом недостатков: существенное различие спектральных характеристик акустических волн при каждом последующем излучении импульсов, высокая опасность обоих типов излучателей, сложная в обслуживании аппаратура.

Отдельный тип преобразователей – осесимметричные гидродинамические излучатели (ГДИ), в которых для генерирования акустических волн используется явление кави-

тации [7]. Существенное отличие их от вышеописанных – генерирование тональных акустических сигналов, спектры которых содержат ряд дискретных гармоник. Спектральной характеристикой сигнала можно управлять за счет геометрических и гидродинамических параметров затопленной кольцевой струи [8, 9, 10]. При этом акустические поля имеют высокую интенсивность [11, 12]. Можно утверждать, что осесимметричные излучатели объединяют в себе полезные свойства традиционных (низкие частоты, большая мощность, простота в эксплуатации) и электроакустических преобразователей (дискретный спектр). Представляет интерес исследовать влияние на энергетику данных ГДИ геометрических, гидродинамических параметров струйной оболочки и свойств жидкости.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Физическая модель противоточного осесимметричного гидродинамического излучателя представлена на (рис. 1а). Основные конструктивные элементы такой излучающей системы – соосные круговые сопло 1 и отражатель 3 с лункой на торце. Лунка имеет оптимальный параболический профиль, а её диаметр на торце зависит от диаметра проходного отверстия сопла 1 [12]. После натекания на лунку струя разворачивается, формируясь в осесимметричную струйную оболочку 2, которую можно считать жестко заземленной на торце отражателя. При натекании на наружную кромку сопла струя кольцевого сечения раздваивается. Часть потока жидкости уходит в окружающее пространство, а часть за счёт эффекта Бернулли отклоняется к оси симметрии, образуя первичный вихрь тороидальной формы 4. Внутри вихря создаётся развитая кавитационная область. По мере увеличения концентрации газовых и паровых каверн в объёме вихря возрастает давление, которое деформирует свободный край упругой струйной оболочки. В результате этого содержимое кавитационной области периодически выбрасывается наружу, формируя вторичный тороидальный вихрь 5. Захлопывание паровых каверн порождает тональные акустические волны высокой интенсивности, т. е. вихрь 5 является зоной звукообразования [13].

Данный источник звука помещался в герметичной емкости в затопленном состоянии. Скорость истечения струи из сопла изменялась с помощью насоса с регулируемым расходом. Длина струйной оболочки l регулировалась путем изменения расстояния между соплом и отражателем. Конусность, радиусы меньшего и большего основания подбирались за счет замены сопла 1 и (или) отражателя 2. Радиус меньшего основания r_1 определяется размерами лунки на торце отражателя, радиус большего основания r_2 – наружной кромкой сопла. Длина усечённого конуса l равна расстоянию между торцами сопла и отражателя. Изменение l приводит к изменению параметра θ – конусности оболочки. Толщина струйной оболочки h зависит от расхода жидкости, т. е. от скорости потока v на выходе из сопла (рис. 1а). Сигнал от калиброванного пьезокерамического гидрофона поступал на электронный вольтметр и анализатор спектра для измерения интегрального уровня и частоты основной (низшей) гармоники. Соответствующее освещение, визуальное наблюдение, фотографирование и видеосъёмка процесса проводились через иллюминаторы в рабочей емкости.

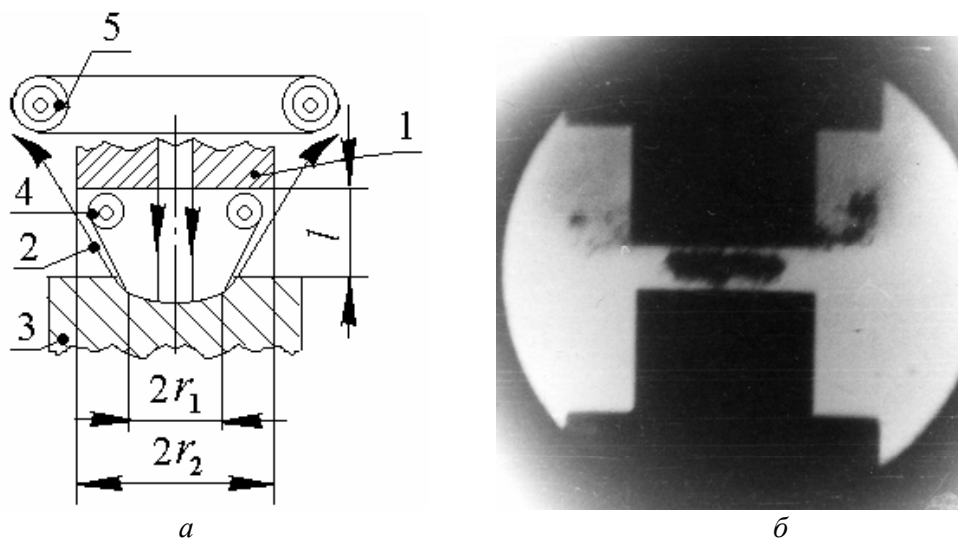


Рис. 1. Осесимметричный ГДИ противоточного типа:
 а – функциональная схема, б – фотография работающего излучателя

ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Влияние геометрических параметров на интенсивность сигнала. Чем больше амплитуда деформации изгиба свободного края струйной оболочки, тем большее количество паровых каверн из первичного тороидального вихря (внутренняя область оболочки) выйдет наружу. Следовательно, при коллапсе этих каверн во вторичном тороидальном вихре будет выше интенсивность генерируемого звука. При этом наибольшая часть кинетической мощности затопленной кольцевой струи преобразуется в интенсивность акустического поля, т. е. повышается акусто-гидродинамический КПД осесимметричного гидродинамического излучателя. Поэтому были проведены экспериментальные исследования зависимости интенсивности сигнала, генерируемого противоточными гидродинамическими излучателями, от геометрических параметров конической струйной оболочки. Во всех экспериментах ГДИ настраивался на максимальное звучание подбором оптимальной скорости истечения струи из сопла. На рис. 2а отражена зависимость оптимальной скорости, а на рис. 2б – кинетической мощности струи на выходе из сопла от радиуса r_1 меньшего основания усеченной конической оболочки. При этом радиус большего основания r_2 подбирался таким образом, чтобы параметр конусности оставался неизменным ($\theta \approx 35^\circ$). Рабочие жидкости – отстоянная водопроводная вода и трансформаторное масло. В трансформаторном масле необходима большая величина гидродинамической мощности затопленной струи. Это обусловлено большей вязкостью органической жидкости по сравнению с водой.

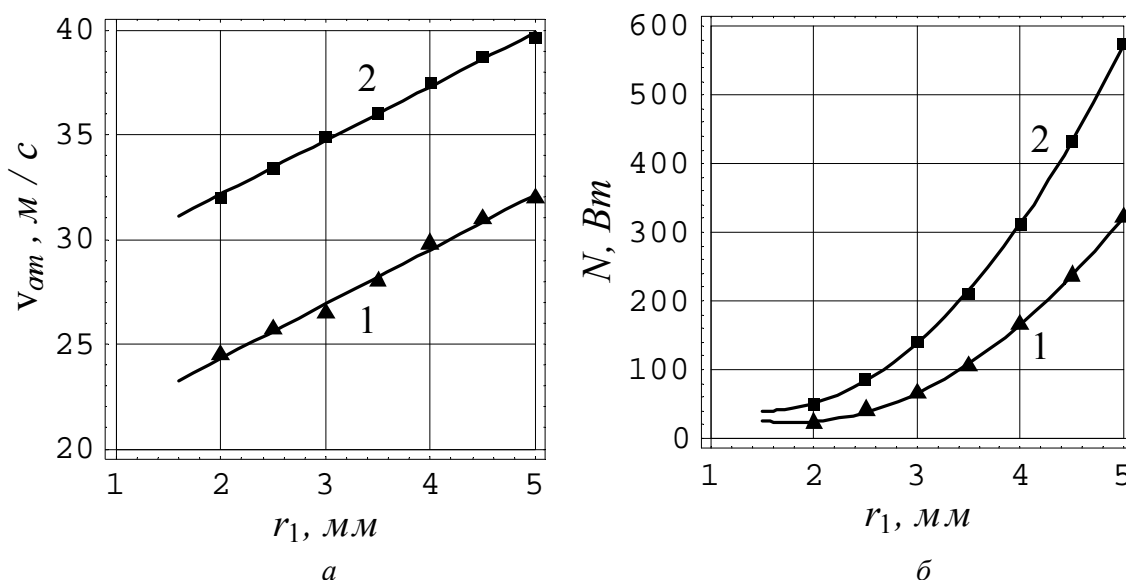


Рис. 2. Зависимости оптимальной скорости (а) и кинетической мощности (б) конической струи от радиуса меньшего основания:
 1 – в водопроводной воде; 2 – в трансформаторном масле

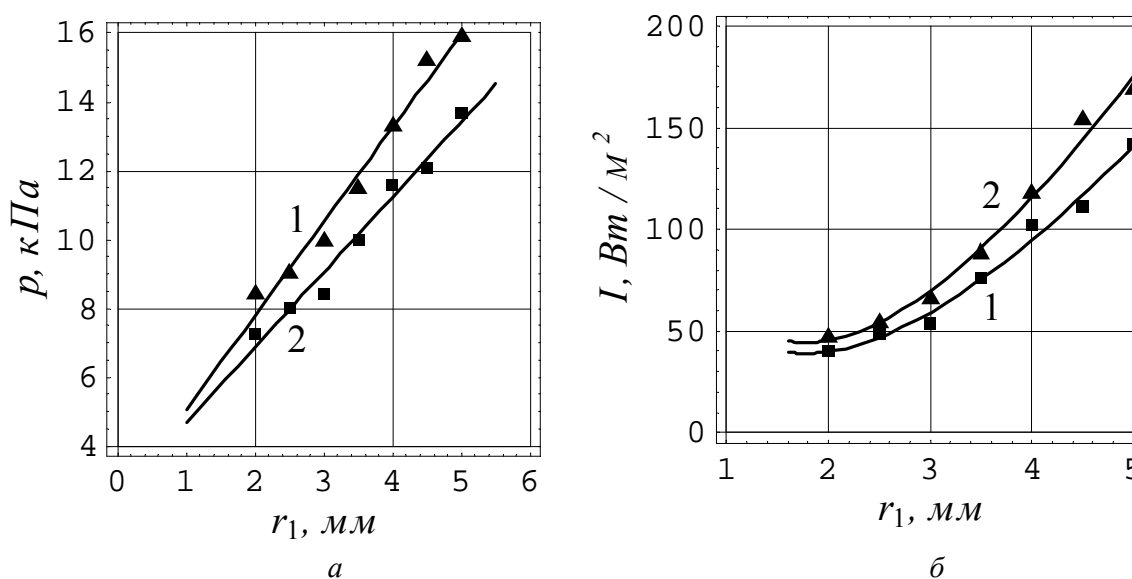


Рис. 3. Зависимости уровня (а) и интенсивности (б) сигнала, генерируемого противоточным ГДИ, от меньшего радиуса конической оболочки:
 1 – в водопроводной воде; 2 – в трансформаторном масле

На рис. 3а показана зависимость уровня, а на рис. 3б – интенсивности генерируемого акустического сигнала от меньшего радиуса конической струйной оболочки. При измерениях гидрофон располагался на расстоянии 110 мм от оси противоточного ГДИ, т. е. на расстоянии 100 мм от вторичного тороидального вихря – границы зоны звукообразования (рис. 1). Кривая 1 соответствует генерированию звука в воде, а кривая 2 – в трансформаторном масле. С увеличением радиусов оснований оболочки r_1 и $r_2 \approx (3.5 \dots 4.0)r_1$

(при оптимальной скорости струи v_{opt}) возрастает расход жидкости и, соответственно, кинетическая мощность кольцевой струи. Этим обусловлен рост зависимостей $p(r_1)$, $I(r)$. Поскольку у трансформаторного масла вязкость больше, чем у воды, то интенсивность звука ниже в связи с большей диссипацией энергии упругих волн во внутреннюю энергию жидкости.

Изменять параметр $\theta = \arctg\left(\frac{r_2 - r_1}{l}\right)$ конусности затопленной струйной оболочки

можно двумя способами. Во-первых, при неизменных основании r_1 и длине l усечённого конуса изменять радиус r_2 большего основания. В этом случае для одного отражателя используется набор сопел с одинаковыми диаметрами проходного отверстия и различными наружными диаметрами (рис. 1а). Во-вторых, при неизменных радиусах оснований можно изменять длину оболочки. В этом случае параметр θ будет зависеть от расстояния между торцами сопла и отражателя, что позволяет конструкция ГДИ. Как и в предыдущем эксперименте излучатель настраивался на максимальный уровень звука за счёт подбора оптимальной скорости струи v_{opt} . Рабочая жидкость – трансформаторное масло. Сначала конусность струйной оболочки изменялась за счёт параметра r_2 при $r_1 = const$. На рис. 4а представлены зависимости интенсивности $I_r(\theta)$ генерируемого звука от конусности струйной оболочки.

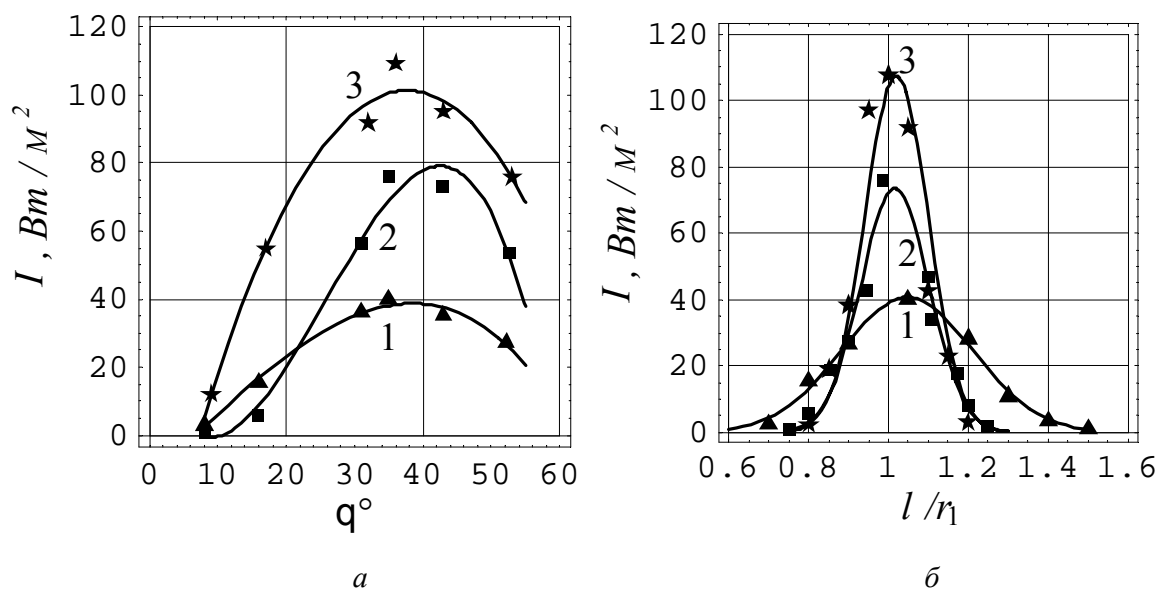


Рис. 4. Зависимости сигнала, генерируемого противоточным ГДИ, от конусности (а) и от длины (б) струйной оболочки:
 1 – $r_1 = 2\text{ мм}$; 2 – $r_1 = 3.5\text{ мм}$; 3 – $r_1 = 4.5\text{ мм}$

Затем были исследованы зависимости уровня и интенсивности генерируемого звука от длины l конической струйной оболочки. При этом, как и в предыдущем случае, изменяется конусность θ оболочки. Использованы излучатели с теми же тремя отражателями,

задаючими радіус меншого основания $r_1 = \{2; 3.5; 4.5\} \text{ мм}$. Кожний отражатель применялся в паре с соответствующим соплом, забезпечиваючим оптимальне співвідношення r_2/r_1 – по результатам предыдущих исследований [12]. Параметр l можно регулировать, плавно изменяя расстояние между соплом и отражателем. Зависимости интенсивности акустического сигнала от длины конической струйной оболочки $I(l/r_1)$ представлены на рис. 4б. Видно, что в одинаковом диапазоне изменения относительной длины l/r_1 конической струйной оболочки уровень акустического сигнала значительно понижается при больших радиусах оснований.

Влияние гидродинамических параметров на интенсивность сигнала. Как было показано (рис. 2а), существует оптимальная скорость струи, при которой имеет место максимальная интенсивность поля акустических волн. Изменяя гидродинамический параметр скорости, можно регулировать частоту основного тона генерируемого звука [12]. Однако при этом уменьшается мощность акустических волн, вплоть до полного прекращения процесса излучения тонального акустического сигнала. Применялись пары сопло – отражатель, задающие различные радиусы r_1 меньшего основания усечённой конической струйной оболочки при оптимальном значении соотношения радиусов r_2/r_1 и оптимальной длине l .

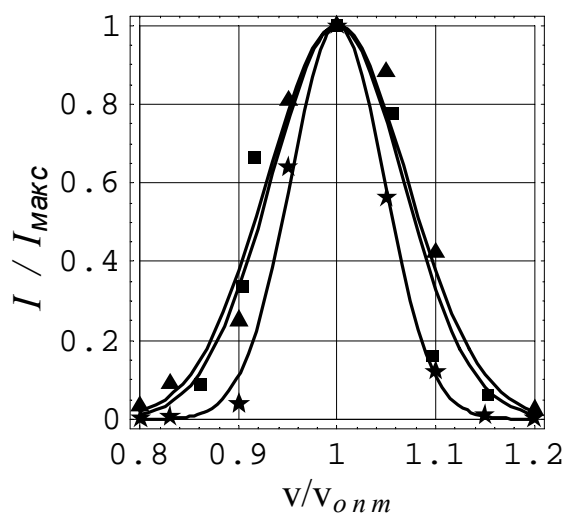


Рис. 5. Зависимости интенсивности сигнала от скорости струи:

- ▲ – $r_1 = 2.5 \text{ мм}$; $v_{opt} = 33.5 \text{ м/с}$;
- – $r_1 = 3.5 \text{ мм}$; $v_{opt} = 36.0 \text{ м/с}$;
- * – $r_1 = 4.5 \text{ мм}$; $v_{opt} = 38.5 \text{ м/с}$

На рис. 5 представлены в относительных единицах зависимости интенсивности акустических полей, как функции относительной скорости. Как видно из исследования характеристик противоточных ГДИ, рабочие скорости потока жидкости ограничены диапазоном значений от $0.8 v_{opt}$ до $1.2 v_{opt}$. При слишком малых значениях скорости ($v < 0.5 v_{opt}$) исчезает явление кавитации в первичном тороидальном вихре, что приводит к срыву процесса гидродинамического звукообразования. При чрезмерно больших скоростях истечения жидкости из сопла ($v > 1.5 v_{opt}$) кавитация возникает в канале кольцевого сопла и сплошное облако микрокаверн выходит наружу в виде “пены”. Вследствие этого разрушаются струйная оболочка и первичный концентрированный вихрь. В результате исчезает тональный сигнал и генерируется широкополосный шумовой сигнал.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы

1. Исследовано влияние геометрических параметров затопленных струйных оболочек на интенсивность акустического сигнала, генерируемого осесимметричными ГДИ. Выявлено оптимальное их соотношение.
2. Исследовано влияние гидродинамических параметров затопленных струйных оболочек на интенсивность акустического сигнала, генерируемого осесимметричными ГДИ. Выявлено оптимальное значение скорости струи на выходе сопла.
3. В жидкости с большей вязкостью генерируется звук меньшей интенсивности при прочих равных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *McCann C.* Compressional wave attenuation in concentrated clay suspensions. *Acustica*, № 22.– 1969–70.– P. 352–356.
2. *Kramer F.S., Peterson R.A., Walter W.C.* Seismic Energy Sources. 1968 Handbook. Bendix/United Geophysical Corporation.
3. *Edelman H.A.K.* Applications of Air Gun Energy Source for Offshore Seismic Work. OTC 2513:937, 1976.
4. *N.N. Flexichoc.* A High Resolution Implosion Seismic Source. Brochures from Geomecanique, Rueil, France, 1976.
5. *French W.S., Henson C.G.* Signature Measurements on the Water Gun Marine Seismic Source. OTC 3124:631, 1978.
6. *N.N.* Fundamentals of High Resolution Seismic Profiling. The Environmental Equipment Div. EG&G, Waltham (Mass.), 1977.
7. *Назаренко А.Ф.* Гидродинамические излучатели. В кн.: Ультразвук. Маленькая энциклопедия.– М.: "Советская энциклопедия", 1977.– С. 79–81.
8. *Дудзінський Ю. М., Сухарьков О. В.* Спектр звуку, генерованого зануреною осесимметричною струминною оболонкою // Мат. методи та фізико-мех. поля. – 2007.– **50**, № 2.– С. 129 – 134.
9. *Дудзінський Ю. М.* Динаміка струминної оболонки і спектр акустичного сигналу // Вісник Київського ун – ту, серія: фізико-мат. науки.– 2006.– **3**.– С. 89 – 97.
10. *Дудзинский Ю. М.* Динамика затопленных струйных оболочек испектр акустического сигнала / 9-я междунар. конф. “Dynamical System Modeling and Stability Investigation” – “DMSMI – 2007”: Тез. докл.– Киев, 2007.– С. 287.
11. *Дудзинский Ю. М., Назаренко О. А., Маничева Н. В.* Кавитационная эрозия при избыточном статическом давлении // Тр. Одес. политехн. ун-та.– 2001.– Вып 3(15).– С. 114 – 118.
12. *Дудзинский Ю. М., Маничева Н. В., Назаренко О. А.* Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений // Акуст. вісн.– 2001.– **4**, №2.– С. 38 – 46.
13. *Дудзінський Ю. М., Манічева Н. В.* Кавітаційна ерозія металу в потужних акустичних полях за умов надмірного статичного тиску / 6-й міжнар. симп. Українських інженерів-механіків у Львові: Тези доп.– Львів, 2003.– С. 159.