

УДК 532.528

К ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ, ИЗЛУЧАЕМОГО РАЗВИТОЙ КАВЕРНОЙ

В. Т. ГРИНЧЕНКО, И. В. ВОВК, А. П. МАКАРЕНКОВ

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4
grinchenko@hydromech.com.ua*

Получено 30.10.2012

Представлены результаты исследований по формированию математической модели процесса излучения звука развитой каверной при различных числах кавитации. На основе данных о характерных физических и геометрических особенностях кавитационного течения сформирована физическая модель каверны как источника звука. Для принятой модели формы каверны предложен алгоритм оценки количественных характеристик звукового поля в частотном диапазоне от 300 до 10000 Гц. Определены характеристики направленности излучения и его влияние на работу акустических навигационных устройств. Указаны возможные способы снижения шумности кавитационной области. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния полимеров на характеристики развитых кавитационных течений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: развитая каверна, число кавитации, модель источника звука, снижение шумности, влияние полимеров на характеристики каверны.

Представлено результати досліджень, спрямованих на формування математичної моделі процесу генерації звуку розвинутою каверною при різних числах кавітації. На основі даних про характерні фізичні та геометричні особливості кавітаційної течії сформульовано фізичну модель каверни, як джерела звуку. Для прийнятої моделі форми каверни запропоновано алгоритм оцінки кількісних характеристик звукового поля в діапазоні частот від 300 до 10000 Гц. Визначено характеристики спрямованості випромінювання і його вплив на роботу акустичних навігаційних приладів. Вказано можливі способи зменшення рівня випромінювання кавітаційної області. Приведено результати експериментальних досліджень впливу полімерів на характеристики розвинених кавітаційних течій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розвинута каверна, число кавітації, модель джерела звуку, зменшення рівня шуму, вплив полімерів на характеристики каверни.

The mathematical model is developed to describe a sound emission process by cavity flow at different cavitation numbers. The model of cavity as a sound source was developed on the basis of experimental data about physical and geometrical peculiarities of cavitation flow. In scope of this model concrete geometrical form cavity was used to develop an algorithm of quantitative characteristics estimation of the sound field in the frequency range from 300 Hz to 10000 Hz. The directivity characteristics of the radiation are calculated and its effect on the acoustic navigation devices is considered. The possible ways to reduce the noise of the cavitation are discussed.

KEY WORDS: developed cavity, the cavitations number, model of sound source, decreasing of noise level.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование каверны за движущимся объектом в жидкости связано с развитием нестационарных сложных течений и, следовательно, с излучением звука. В общем случае можно говорить о двух различных механизмах генерации звука. С одной стороны, сама каверна является изменяющимся по форме объектом и может генерировать излучение со спектром, определяемым формой, размерами каверны и числом кавитации. С другой стороны, при развитом кавитационном течении на поверхности каверны и в области ее замыкания формируются различные двухфазные структуры течения с нестационарным движением. Эти особенности кавитационных течений стимулировали интерес к построению моделей источников звука, порождаемого движением тела с каверной.

Одной из интересных работ в этой области является статья Г. В. Логвиновича [1]. Основное внимание в ней уделено построению модели источника звука, связанного с изменением формы каверны. Поскольку речь идет об относительно низкочастотном излучении, Г. В. Логвиновичем предложена аппроксимация формы каверны эллипсоидом вращения. Ясно, что такая замена не вносит существенных искажений в характер излучаемого поля, как это характерно для всех работ Г. В. Логвиновича. В указанной публикации дано ясное описание физической картины течения и качественная оценка различных факторов, влияющих на его развитие. Его подходы и идеи, сформулированные в период работы в Институте гидромеханики АН УССР, успешно развиваются его учениками и последователями [2].

Понимание практической значимости исследований акустической части проблемы сложных ка-

витационных течений стимулировало постановку исследований в ЦАГИ и ЦНИИ им. А. Н. Крылова. Как подчеркивал Г. В. Логвинович, высказывались предположения о существенном обратном влиянии звукового поля на характеристики кавитационного течения. Существующие данные о влиянии звука на нестационарные течения указывают на заметный эффект лишь в случае потери устойчивости течения и, по-видимому, для развитых кавитационных течений этот эффект несущественен.

Физическое и математическое моделирование процесса излучения звука является довольно сложной задачей в связи со сложной структурой течения и отсутствием достаточно полных данных о его характеристиках. Основное внимание при анализе таких течений уделялось оценке интегральных характеристик, знания которых недостаточно для полной постановки акустической задачи. Поэтому различными авторами в различных лабораториях мира предпринимались попытки экспериментального определения характеристик излучаемого течения звука. Среди такого типа работ следует отметить публикации [3, 4]. Принципиальная трудность таких экспериментальных работ связана с тем, что течение организуется в ограниченных каналах и, следовательно, реверберационные эффекты препятствуют точным оценкам амплитудных характеристик звукового поля. Однако при этом получены важные данные о спектральных характеристиках звука. Рассматриваемый в данной работе частотный диапазон кавитационного шума выбран в соответствии с данными работы [3].

В мировой литературе также отмечался большой интерес к различным фундаментальным и прикладным аспектам кавитационных течений. Большой объем теоретических и экспериментальных исследований выполнен в Калифорнийском технологическом институте. Сотрудники института опубликовали ряд фундаментальных работ, среди которых следует отметить монографию Бреннена [5]. В лабораториях института выполнено много работ по подготовке ряда диссертаций, многие из которых доступны в Интернет (thesis.library.caltech.edu). Практически в каждой работе, посвященной кавитационным течениям, предпринимается попытка экспериментального определения звуковых полей, порождаемых кавитацией.

Рассмотрение проблематики, связанной с определением характеристик кавитационных течений применительно к задачам судостроения, происходило и происходит на каждой ежегодной ме-

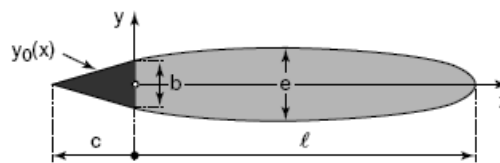


Рис. 1. Форма каверны за осесимметричным телом

ждународной конференции “Symposium on Naval Hydrodynamics”. В конце 2012 года состоялся 29 такой симпозиум. Труды большинства предыдущих (до 24 включительно) открыты для свободного доступа в Интернет. Важную роль в развитии методов прикладной гидродинамической акустики сыграли основополагающие работы Дж. Лайтхила, предложившего акустическую аналогию, исходя из уравнений Навье-Стокса. Огромный обобщающий материал по изучению механизмов генерации звука потоком содержится в монографиях [6, 7]. И все же в той области гидродинамической акустики, которая связана с изучением излучения звука развитыми кавитационными течениями, возникают серьезные проблемы при решении прикладных задач. Экспериментальные результаты довольно трудно переносить из лабораторных условий в условия свободного пространства. Теоретические схемы предполагают такой уровень знаний структуры кавитационного потока, который в современных условиях недостижим.

В данной работе строится и анализируется модель, позволяющая оценить влияние известных особенностей поверхности каверны, на которой формируется пелена из кавитационных пузырьков, на характер излучаемого звука.

1. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТОГО КАВИТАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА ЗВУКА

Одним из важных вопросов при построении математических моделей кавитационных течений является вопрос о замыкании каверны. Предложено несколько различных схем замыкания, которые позволяют надежно определять сопротивление движения тела в каверне [8]. При рассмотрении акустических аспектов течения вопрос о выборе адекватной схемы замыкания остается открытым. Здесь мы используем результат, полученный М. Тулиным в рамках линеаризован-

ной теории [9]. Соответствующая форма каверны за осесимметричным телом приведена на рис. 1. Геометрические параметры каверны определяются геометрией обтекаемого тела и числом кавитации. Принимая во внимание такую структуру каверны, при расчете характеристик звукового поля принимаем геометрию излучающей поверхности в форме, показанной сплошными линиями на рис. 2. Рассматривая плоскую задачу, считаем, что форма каверны аналогична осевому сечению осесимметричной, показанной на рис. 1.

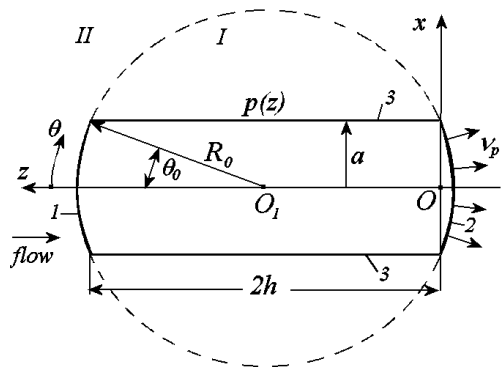


Рис. 2. Модель каверны и принятые обозначения: 1 – носовая крышка, 2 – кормовая поверхность, 3 – боковая поверхность

Носовая поверхность объекта предполагается жесткой и на ней расположена акустическая навигационная аппаратура.

После выбора геометрии излучающей области формирование математической модели источника звука завершается заданием граничных условий на его поверхности. При этом используем две системы координат, декартову и полярную, показанные на рис. 2.

Полагая, что задача – плоская и симметричная относительно оси Oz , на боковой поверхности 3 имеем очевидное граничное условие

$$\Phi(z) = \frac{p(z)}{-j\omega\rho}; \quad x = a, \quad 0 \leq z \leq 2h, \quad (1)$$

где $\Phi(z)$ – потенциал скорости; ω – круговая частота; $p(z)$ – некоторое звуковое давление на боковой поверхности каверны. На носовой части должно выполняться условие

$$-\frac{\partial\Phi(z)}{\partial R} = 0; \quad R = R_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_0. \quad (2)$$

Что касается поверхности кормовой части 2 каверны, то примем гипотезу, что здесь колебательная скорость v_p определяется такой же величиной

звукового давления, как и на боковой поверхности 3. Тогда получим

$$v_p = \frac{p(z)}{\rho c}; \quad R = R_0, \quad \pi - \theta_0 \leq \theta \leq \pi. \quad (3)$$

Имея граничные условия на всех поверхностях каверны, можно приступить к аналитическому решению уравнения Гельмгольца. В качестве метода решения сформулированной граничной задачи выберем метод частичных областей, который достаточно широко используется для решения волновых задач акустики, механики и электродинамики и является весьма эффективным с точки зрения получения количественных результатов [9, 10]. Зависимость от времени примем в форме $\exp(-j\omega t)$. Этим заканчивается формальное построение математической модели каверны, как источника звука. Для практического использования этой модели и проверки ее адекватности реальному процессу необходимо указать способы конкретизации функции $p(z)$ на поверхностях каверны. Следует также отметить, что принятая математическая модель не дает возможности прямой оценки излучения за счет колебаний объема каверны. Этот вопрос следует рассматривать отдельно, имея в виду то обстоятельство, что такие колебания реализуются в области существенно более низких частот [1], чем частоты, выбранные для анализа в данной работе.

2. ВЫБОР ФУНКЦИИ $p(z)$, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ДАВЛЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТЯХ КАВЕРНЫ

Во введении мы уже обращали внимание на то, что в кавитационных трубах практически невозможно получить достоверные экспериментальные оценки уровней звуковых полей и их спектров, возникающих на поверхности каверн при обтекании тел в режимах развитой кавитации. Это связано с тем, что в трубах конечных размеров всегда существуют многократные отражения звуковых волн, в результате чего образуются стоячие волны, способные существенно повлиять на измеряемые уровни звуковых полей и их спектры. Чтобы избежать такого рода нежелательных явлений, эксперименты необходимо проводить в очень больших акустически заглушенных бассейнах или в речных, озерных или морских водоемах. К сожалению, такие эксперименты очень сложны и требуют огромных затрат. Тем не менее, в некоторых модельных экспериментах, проводимых в условиях

относительно большой акватории, удается получить достаточно адекватные оценки уровней звуковых давлений и их спектров. В этом отношении заслуживает большого внимания работа [11], содержащая данные об эксперименте на реке Темзе (Великобритания). В этих условиях автору удалось получить достаточно достоверные экспериментальные оценки уровней звукового давления в режимах развитой гидродинамической кавитации в диапазоне частот от 300 до 10000 Гц.

На рис. 3 представлен осредненный спектр шума, заимствованный из [11], приведенный к поверхности каверны, образовавшейся вокруг вращающегося стержня. Хорошо видно, что на низких частотах уровень звука быстро растет с повышением частоты. Далее, в диапазоне частот от 1000 до 6000 Гц наблюдаются значительные осцилляции звукового уровня, в результате чего появляются пики давления на частотах 1130, 2380 и 5300 Гц. Природа таких пиков в спектре не ясна. На более высоких частотах, после 6000 Гц, уровень давления начинает падать пропорционально $1/f$, т. е. скорость падения уровня составляет примерно 6 дБ на октаву. В целом такая зависимость давления от частоты характерна для гидродинамической кавитации и, в самых общих чертах, прогнозировалась в [12, 13]. Именно такую частотную зависимость давления на поверхности каверны в принятой нами модели мы будем использовать в дальнейших расчетах.

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Указанный выше алгоритм численных расчетов [9, 10] был тщательно протестирован с целью выбора необходимого числа функций для аппроксимации характеристик поля с достаточной точностью. Не останавливаясь на деталях тестирования алгоритма, обратимся к анализу некоторых конкретных количественных оценок.

Прежде всего, остановимся на некоторых особенностях, связанных с процедурой проведения расчетов. При фактическом задании граничных условий была предпринята попытка учесть некоторые физические особенности кавитационных течений. В первую очередь мы пытались учесть то обстоятельство, что часть поверхности каверны образована пеленой из паровых пузырьков. Причем, площадь такой пузырьковой пелены зависит от скорости движения кавернообразующего объекта. Выше мы подчеркивали, что спектр кавитационного шума, приведенный на рис. 3, являе-

тся осредненным. Фактически значительная часть высокочастотного излучения каверны формируется в результате схлопывания паровых пузырьков в случайно распределенные моменты времени. Поэтому для отражения в расчетах этого фактора боковая поверхность модели, изображенной на рис. 1, делилась на M одинаковых частей. При этом модуль давления на всех частях задавался одинаковым, в соответствии с данными на рис. 3, а фаза давления задавалась случайной. Таким образом, у нас появлялась возможность просчитывать несколько реализаций и затем проводить осреднение полученных результатов.

Некоторые характерные формы каверн за диском приведены на рис. 4. Возможны как случаи полного покрытия пеленой поверхности каверны, так и полное отсутствие паровых пузырьков на ее поверхности.

В связи с этим ограничимся тремя вариантами расчетов. Первый вариант предполагал, что кавитационными пузырьками покрыта вся поверхность каверны, второй вариант – половина поверхности и третий вариант – пузырьки покрывают только ее кормовую часть.

Поскольку одна из возможных важных практических задач – обеспечение условий для эффективного функционирования навигационных акустических устройств на носителях, движущихся в режимах с кавитацией, важнейшим вопросом становится оценка звукового давления на поверхности носовой крышки 1 (см. рис. 2). Ибо это место является наиболее перспективным и рациональным с точки зрения размещения здесь указанных акустических устройств и звуковое давление, возникающее за счет кавитационных явлений, по сути, будет служить помехой для устойчивой работы этих устройств. Принимая во внимание это обстоятельство, в качестве основного расчетного параметра была выбрана величина $\frac{\bar{p}}{|p(z)|}$, где \bar{p} – осредненное звуковое давление на поверхности носовой крышки по нескольким реализациям расчетов, при этом величина M принималась равной 10. На рис. 5 показаны частотные зависимости относительного звукового давления $\frac{\bar{p}}{|p(z)|}$ на носовой крышке 1 для трех возможных покрытий поверхности каверны кавитационными пузырьками. Как и следовало ожидать, наиболее высокий уровень звукового давления на носовой крышке наблюдается в случае, когда кавитационные пузырьки заполняют всю боковую поверхность каверны и ее кормовую часть, см. рис. 5, а. Здесь отчетливо виден пик, который достигает величи-

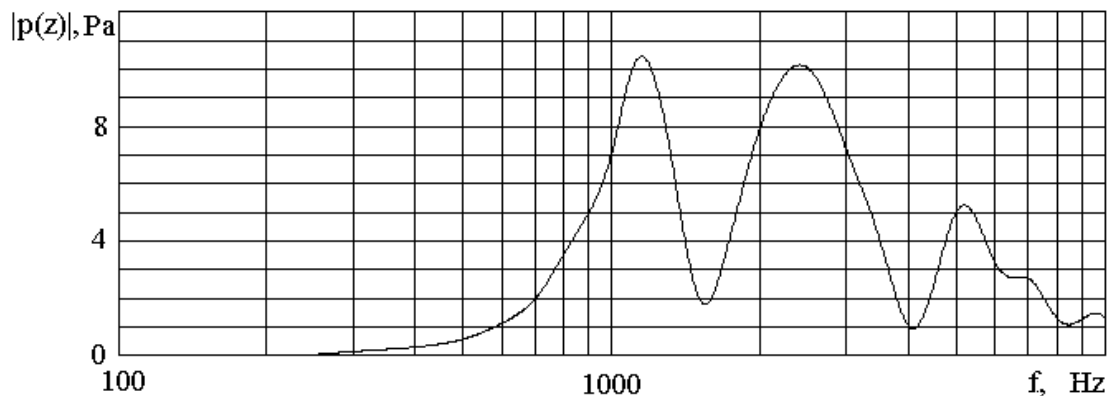


Рис. 3. Спектр шума кавитационных пузырьков, приведенный к поверхности источника

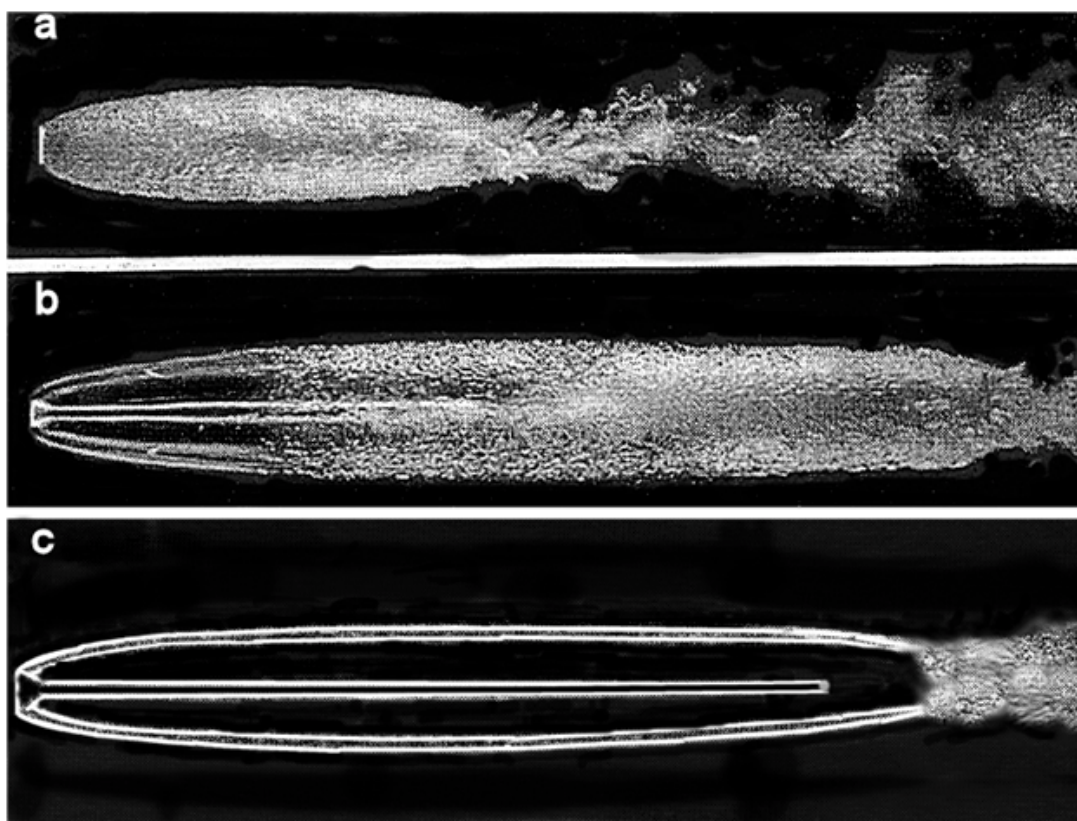


Рис. 4. Кавитации в потоке за пластиной:
a – каверна полностью покрыта пузырьками; *b* – каверна частично покрыта пузырьками (передняя часть каверны прозрачна); *c* – каверна полностью прозрачна, пузырьки наблюдаются только в ее кормовой части

ны 0.5 и совпадает с первым максимумом частотной зависимости исходного давления, изображенной на рис. 5, хотя среднее значение величины

$\frac{\bar{p}}{|p(z)|}$ во всем диапазоне частот не превышает значения 0.15. Если же пелена кавитационных пу-

зырьков занимает только половину каверны и ее кормовую часть (см. рис. 5, b), то среднее значение величины $\frac{\bar{P}}{|p(z)|}$ снижается примерно до 0.1.

Однако небольшие отдельные пики на частотной характеристике продолжают наблюдаться.

Такое снижение среднего уровня относительно давления на передней крышке можно объяснить двумя факторами: снижением общей акустической мощности кавитационных пузырьков, поскольку площадь, занимаемая ими, уменьшилась в два раза, и тем, что передняя часть поверхности каверны, по сути, стала акустически мягкой, т. е. звуковое давление на ней оказалось равным нулю.

4. ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА

Изучению возможностей использования водных растворов полимеров для снижения гидродинамического сопротивления движущихся объектов посвящена обширная литература. Гораздо меньше внимания уделялось изучению влияния полимеров на кавитационные процессы в потоке. В работе [14] при исследовании снижения сопротивления струям рассмотрено влияние полимеров на кавитацию в терминах снижения числа кавитации. Основной вывод статьи заключается в том, что добавки полимеров в воду стимулируют один и тот же механизм для снижения сопротивления и подавления кавитации. К работам, связанным с влиянием полимеров на характеристики потока, интерес в Институте гидромеханики также стимулировал Г. В. Логвинович. При его поддержке в институте был выполнен большой объем экспериментальных исследований в этом разделе механики жидкости [17]. При этом использовался, как и в работе [14], полимер “Ролуох – 301”.

Общий анализ соотношений между интенсивностью турбулентности и характеристиками трения позволяет сделать вывод о том, что воздействие на поток с целью снижения сопротивления будет одновременно вызывать снижение шумности пограничного слоя. Все известные способы снижения гидродинамического шума турбулентного пограничного слоя можно разделить на два вида: пассивные и активные [15, 16]. Пассивные способы снижения - это способы, которые при своей реализации не требуют подвода к турбулентному пограничному слою дополнительной энергии. К ним относятся: выбор формы обтекаемой поверхности тела, т. е. обеспечение благоприятного градиента

давления, обеспечение гидравлической гладкости обтекаемой поверхности, использование профилированных элементов (риблет), утопленных в вязком подслое турбулентного пограничного слоя, модификация поверхности с помощью демпфирующих и водорастворимых покрытий, установка во внешней области турбулентного пограничного слоя специальных тандемно-ориентированных пластин и другие способы.

Применение активных способов снижения гидродинамического сопротивления требует дополнительные затраты энергии. К таким способам относятся: отсос пограничного слоя, вдув пузырьков воздуха в турбулентный пограничный слой, нагрев обтекаемой поверхности, а также организация развитого кавитационного обтекания, подача водных растворов высокомолекулярных линейно-цепочных полимеров. Наиболее эффективным активным способом, как показали многочисленные исследования, является способ подачи полимерных растворов в турбулентный пограничный слой, позволяющий снижать сопротивление трения до 70%.

По-нашему мнению, молекулы полимеров, попадая в турбулентный пограничный слой и сносимые на поверхность каверны, могут оказывать воздействие как на шумы пограничного слоя, так и на амплитуды колебаний поверхности каверны, которые ответственны за определенные частотные компоненты в спектре кавитационного шума.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА РАЗВИТОЙ КАВЕРНЫ

Проведенные в Институте гидромеханики эксперименты показали принципиальную возможность снижения сопротивления движущихся тел путем введения растворов полимеров в пограничный слой. В связи с этим представляет значительный интерес постановка эксперимента, направленного на выяснения возможности снижения шума каверны при обтекании ее потоком с полимерными добавками. Исследования проводились в гидродинамической трубе при скорости потока 10 м/с. Модель выполнена в виде удлиненного тела вращения диаметром 60 мм и длиной 1200 мм. Носовая часть модели – это полуэллипсоид вращения с соотношением продольной оси к диаметру 4:1. Центральная цилиндрическая часть модели имела длину 600 мм, которая затем плавно переходила в концевую с диаметром 25 мм, где

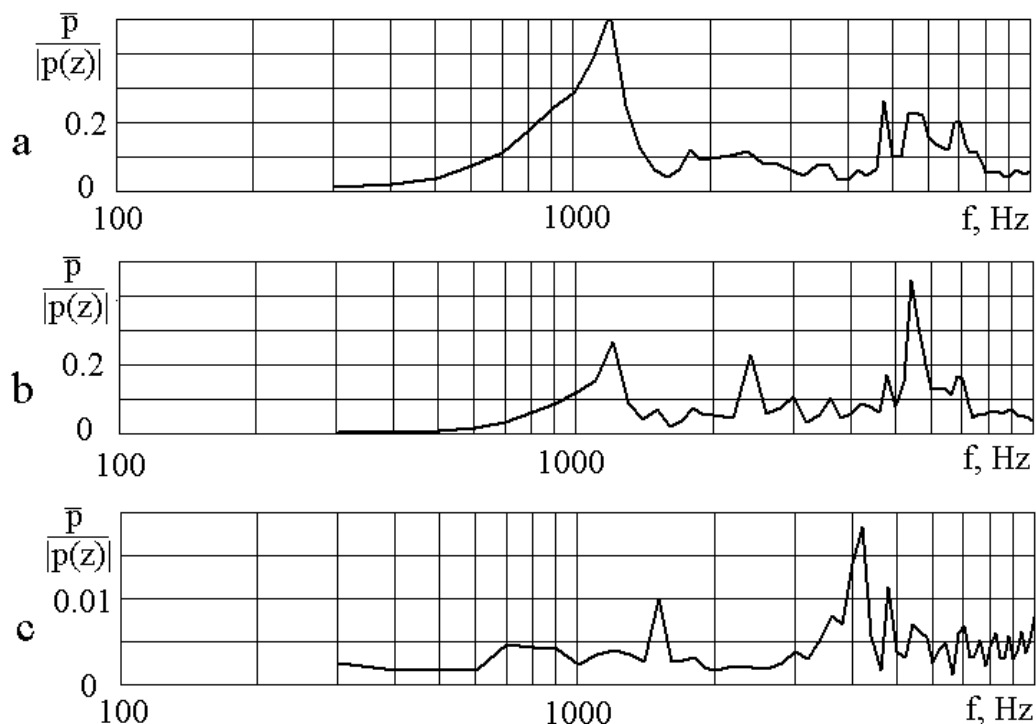


Рис. 5. Частотные зависимости относительного звукового давления на носовой крышке тела: *a* – кавитационными пузырьками покрыта вся боковая поверхность каверны и ее кормовая часть; *b* – пузырьками покрыта задняя половина боковой поверхности и кормовая часть; *c* – пузырьками покрыта только кормовая часть каверны

располагался тонкий нож. На расстоянии 300 мм от носовой части модели находились две кольцевые щели шириной 0.5 мм и с углом наклона к поверхности 30° , отстоящие друг от друга на 10 мм. Через переднюю щель, проводилась подача полимерных растворов, а через заднюю – вдув воздуха, который формировал “искусственную” каверну. Схема экспериментальной установки приведена на рис.6.

Измерение шума каверны было выполнено с помощью двух гидрофонов, установленных заподлицо с поверхностью верхней стенки рабочего участка трубы, в диапазоне частот 0.1–20 кГц. С целью снижения структурных помех гидрофоны располагались в специальных вибропоглощающих вставках. Для исключения воздействия архимедовых сил модель устанавливалась в потоке под небольшим постоянным углом.

Эксперимент организован следующим образом:

а) на установившемся режиме ($V=10$ м/с) через вторую щель модели подавался воздух с фиксированным расходом. Для характеристики ра-

схода использовался безразмерный параметр $C_q = \frac{4Q_g}{V_0 \pi D^2}$. При выходе воздуха образовалась “искусственная” каверна определенной длины. Расход воздуха варьировался при изменении коэффициента C_q в пределах от $2.7 \cdot 10^{-3}$ до $4.7 \cdot 10^{-3}$;

б) осуществлялась регистрация шума и фотосъемка каверны;

в) затем через первую щель подавалась вода и повторялись действия, указанные в предыдущем пункте;

г) далее через первую щель на поверхность каверны вводился раствор полимера “Polyox-301” концентрации 1000 ppm с постоянным расходом. От опыта к опыту расход варьировался в пределах от 40 до 90 см³/с;

д) повторялась регистрация шума и фотосъемка каверны.

По изменению геометрических и визуальных параметров каверны и уровня гидродинамического шума, измеряемого гидрофонами, определялся эффект воздействия полимерных растворов на развитое кавитационное течение. Установлено, что

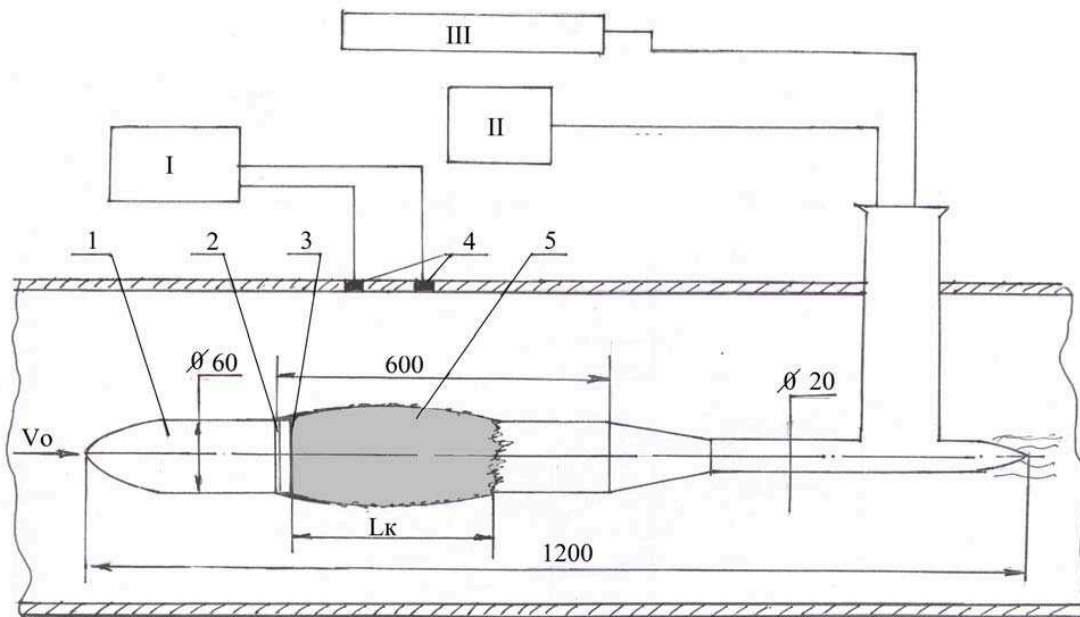


Рис. 6. Схема установки:

1 – модель; 2 – щель для подачи полимеров; 3 – щель для подачи воздуха; 4 – гидрофоны; 5 – кавитационная каверна;

I – система регистрации шумов, II – система поддува воздуха, III – система подачи полимеров

при безразмерном увеличении коэффициента C_q поддува воздуха от $2.7 \cdot 10^{-3}$ до $4.7 \cdot 10^{-3}$ наблюдалось увеличение длины каверны в 1.5 раза. Ввод воды на поверхность каверны практически не изменял микроструктуру ее поверхности. На частотах более 7 кГц отмечалось незначительное (~ 2 дБ) снижение уровня спектральных составляющих шума. В случае подачи полимерных растворов на поверхность каверны были выявлены следующие эффекты:

- длина каверны существенно возросла. Каверна становилась более прозрачной, высота элементов микроструктуры поверхности уменьшалась в 2 – 2.5 раза;

- существенное снижение гидродинамического шума каверны во всем исследуемом диапазоне частот 0,1 – 20 кГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены данные о возможностях расчета и контроля звукового излучения развитого кавитационного течения. Эта проблема привлекала и будет привлекать большое внимание в связи со своей практической значимостью и принци-

пиальными сложностями фундаментального плана. Анализ физических особенностей такого течения четко показывает те огромные проблемы, которые следует преодолеть при построении математической модели такой акустической задачи. В связи с этим, представленные результаты следует рассматривать как один из шагов на пути к решению сложной задачи без претензий на ее моделирование в широких диапазонах изменения параметров. Здесь предложен подход к учету с акустической точки зрения важного физического фактора кавитационного течения – наличие пузырьковой пелены на части поверхности каверны. При этом развит алгоритм расчета характеристик звукового поля, который достаточно хорошо учитывает геометрические особенности области излучения. Одним из направлений дальнейшей работы представляется построения адекватной модели акустического источника в области замыкания каверны как для естественной кавитации, так и кавитации с поддувом газа. Важным результатом экспериментальных исследований является проиллюстрированная возможность контроля излучения каверны путем введения полимерных растворов в область кавитационного течения.

1. *Логвинович Г. В.* О пульсации каверн и акустическом излучении эллипсоида вращения. // Тр. ЦАГИ. – 1985, – 2272, С. 9–18.
2. *Nesteruk I.* (Ed.) Supercavitation. Advances and Perspectives. // Springer. – 2012. – 230 p.
3. *Ильин В.П.* Экспериментальное исследование шума кавитирующего крыла. // Тр. ЦНИИ им. академика А.Н.Крылова, 1968, – Выпуск 241, – С. 93–98.
4. *Калашников Ю.Н., Кузнецов Г.Н.* Возникновение и развитие кавитации и кавитационного шума при поперечном обтекании цилиндра, пластины и диска. // Тр. ЦАГИ, – Л.: “Судостроение”, 1970, – Вып. 258, – С. 120–131.
5. *Brennen C. E.* Cavitation and Bubble Dynamics. // Oxford University Press. – 1995. – 294 p.
6. *Howe M. S.* Theory of Vortex Flow. // Cambridge University Press. – 2003. – 232 p.
7. *Howe M. S.* Hydrodynamics and Sound. // Cambridge University Press. – 2006. – 463 p.
8. *Логвинович Г. В.* Гидродинамика течений со свободными границами. – Киев: Наукова думка. 1969, – 208 с.
9. *Гринченко В.Т., Вовк И.В.* Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках – Киев: Наукова думка. 1986, – 240 с.
10. *Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацапура В.Т.* Основы акустики. – Київ: Наукова думка. 2007. – 640 с.
11. *Mellen R.H.* Ultrasonic spectrum of cavitation noise in water // JASA. – 1954. – V.26, N 3. – P. 356–360.
12. *Ильичев В.И., Лесуновский В.П.* О спектрах шумов при гидродинамической кавитации // Акуст. Журн. – 1963. – Т. 9, Вып. 1. – С. 32–36.
13. *Lebreuilly G., Godefroy V., Breancon-Marjollet L.* Numerical simulation of bubbles cavitation noise on a two dimensional hydrofoil // Proc. Vol. 2, Third International Symposium on Cavitation. – Grenoble, France, April 1998. – P. 95–100.
14. *Ting R. Y.* Cavitation Suppression by Polymer Additives: Concentration Effect and Implication on Drag Reduction. // AIChE Journal. – 1974. – Vol. 20. – N. 4. – P. 827–828.
15. *Kim J.* Control of turbulent boundary layer // Phys. Fluids – 2003. – 15, №5. – P. 1093–1105.
16. *Корнилов В.Н.* Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофиз. аэромех. – 2005. – Т. 12, №2. – С. 183–189.
17. *Скрипачев В.В., Виноградный Г.П., Канарский В., Макаренко А.П.* Влияние полимерных добавок на пульсации давления в пограничном слое. // Инженерно-физический журнал. – 1973ю – №6, С. 1006–1009.