Электронный журнал «Техническая акустика»
http://www.ejta.org

2016, 4

И. И. Конопацкая, М. А. Миронов, П. А. Пятаков, В. О. Фатеев

Акустический институт им. академика Н. Н. Андреева
Россия, 117036, г. Москва, ул. Шверника, 4
e-mail: ikonopatskaya@gmail.com, mironov_ma@mail.ru, ppyatakov@mail.ru, vasilfateev@mail.ru

Измерение производительности акустического фонтана

Получена 06.07.2016, опубликована 03.09.2016

Проведено экспериментальное исследование акустического фонтана, вызванного акустическим полем фокусирующего излучателя. Акустическим фонтаном называют струю жидкости над границей раздела жидкости и газа или двух жидкостей, индуцированную акустической волной. Предложен оригинальный метод измерения производительности акустического фонтана и разработана экспериментальная установка. Полученные экспериментальные результаты показывают линейность зависимости производительности акустического фонтана от акустической мощности. Показано, что при оптимальном выборе геометрического положения фокуса излучателя достигается увеличение производительности акустического фонтана на 25-30%.

Ключевые слова: акустический фонтан, фокусированный ультразвук.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при распространении акустической волны в жидкости возникает акустическое течение, вызванное поглощением звука [1, 2]. Если же направить акустическую волну на границу раздела жидкость-газ, то возникает акустический фонтан [3, 4] (так называют струю жидкости над границей раздела жидкость-газ или жидкость-жидкость, индуцированную акустической волной). Количественной характеристикой акустического фонтана является его производительность — объемная скорость переноса жидкости. Процесс образования акустического фонтана, индуцированного фокусированным ультразвуковым полем, является достаточно сложным и до настоящего времени малоизученным явлением. По нашим сведениям, на данный момент не существует ни теории, описывающей процесс образования акустического фонтана, ни количественных экспериментов, связывающих производительность фонтана с параметрами порождающего его звука.

Говоря об акустическом фонтане, чаще всего подразумевают перпендикулярную ориентацию струи относительно поверхности воды. Однако если при достаточно большой интенсивности направить акустическую волну под острым углом к

поверхности воды, можно наблюдать наклонный фонтан (рис. 1). Изменяя угол падения волны можно изменять угол выхода акустического фонтана, а изменяя интенсивность — изменять линейные размеры струи. Как показали предварительные эксперименты, наклоненный акустический фонтан позволяет эффективно очищать поверхность воды от различных загрязнений, таких как масляные или нефтяные пленки. В работах [5–7] описаны подобные эксперименты и сделан вывод об эффективности использования ультразвука. В настоящей работе экспериментально исследованы зависимости производительности акустического фонтана от интенсивности звука, угла наклона оси излучателя и координат геометрического фокуса относительно кромки сборной емкости.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для решения поставленной задачи была сконструирована экспериментальная установка (рис. 1), которая позволяла измерять производительность фонтана, индуцированного акустическим полем фокусирующего сферического излучателя в зависимости от геометрического положения излучателя. Фокусирующий сферический излучатель — это вогнутая пьезокерамическая поверхность, выполненная в виде части сферы и поэтому создающая сходящийся волновой фронт, что позволяет создавать звуковое поле высокой интенсивности на некотором (фокальном) расстоянии от поверхности излучателя в области, называемой фокальной [8]. Резонансная частота излучателя $f_{\text{р}}$ = 1 МГц, диаметр апертуры $2a$ = 65 мм, фокальное расстояние F = 70 мм. При этом фокальная область представляет собой эллипсоид вращения [9], который имеет длины осей $l = 27{,}6$ мм, $2r_0 = 3{,}9$ мм (расчет см. ниже). Положение фокусирующего излучателя, как и положение фокуса излучателя, можно было менять вдоль вертикальной оси Z (изменяя величину заглубления фокуса излучателя) и горизонтальной оси X (изменяя величину удаления фокуса излучателя от неподвижной кромки сборника) с шагом 1 мм. Нулевому уровню заглубления фокуса (Z=0) соответствовало его положение на границе раздела вода-воздух, нулевому значению удаления фокуса излучателя (X=0) соответствовало положение фокуса на кромке сборника. Также можно было изменять угол наклона фокусирующего излучателя относительно поверхности воды с точностью до 1°. Нулевому значению угла наклона соответствовало такое положение излучателя, при котором индуцированное течение было направлено параллельно границе раздела вода-воздух, а углу наклона 90° — положение, при котором индуцированный акустический фонтан был направлен перпендикулярно границе раздела вода-воздух. Величину акустической мощности W варьировали в диапазоне 21–76 Вт. Акустическая мощность излучателя измерялась стандартным радиометрическим методом [8]. Для исключения самотёка воды в сборник уровень кромки сборника устанавливали совпадающим с уровнем воды.

Следует отметить, что существуют естественные ограничения на взаимное расположение излучателя относительно поверхности воды и кромки сборника. При достижении некоего критического значения одного из геометрических параметров

значение производительности падает до нуля. Например, если очень сильно удалить фокус излучателя от кромки сборника, то акустический фонтан (при неизменном значении интенсивности) может не достичь сборника. Аналогично, если очень сильно заглубить фокус излучателя без изменения значения интенсивности излучения, акустический фонтан исчезнет. Критические значения углов наклона излучателя определяются, опять же, выбранной интенсивностью акустической волны. При малых значениях интенсивности и малых значениях угла наклона излучателя акустический фонтан не образуется. Вместо акустического фонтана наблюдается некое подобие «водяного горба». Логично предположить, что с повышением интенсивности увеличивается диапазон допустимых углов. Учитывая эти ограничения, был выбран следующий диапазон изменения положения излучателя: расстояние фокуса от кромки сборника $X \in [0,25]$ мм, диапазон изменения заглубления фокуса относительно поверхности воды $Z \in [0,8]$ мм, диапазон изменения углов наклона оси излучателя $\varphi \in [27°,50°]$.

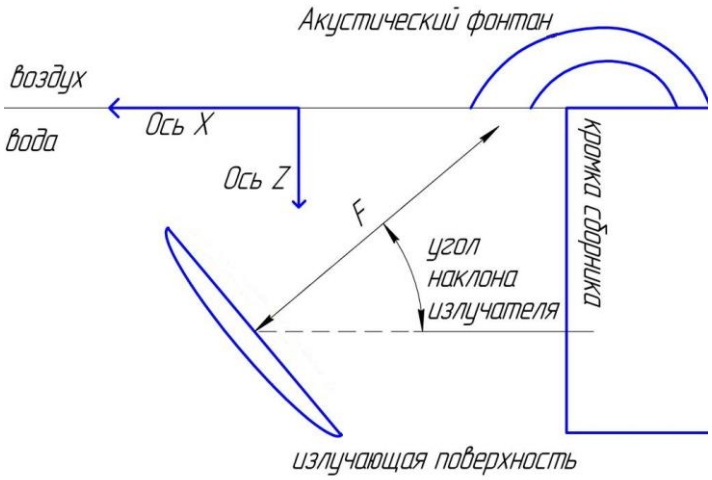

Рисунок 1. Схема экспериментальной установки, F — фокусное расстояние. Удаление фокуса излучателя от кромки сборника соответствует увеличению координаты *X*, заглубление фокуса излучателя соответствует увеличению координаты *Z*. Значение *X*=0 соответствует положению фокуса на кромке сборника, значение *Z*=0 соответствует положению фокуса на границе раздела вода-воздух

Измерения производительности выполнялось следующим образом. Сначала фиксировались значение угла наклона фокусирующего излучателя и величина заглубления фокуса. Затем излучатель перемещался вдоль горизонтальной оси с шагом 1 мм в выбранном диапазоне. В каждой точке определялось среднее по четырем измерениям значение объема забираемой фонтаном жидкости за фиксированное время. Далее изменялось заглубление на 0,5 мм. Измерения повторялись при перемещении излучателя вдоль горизонтальной оси. В следующей серии измерений угол наклона излучателя изменялся на 1° и измерения производительности проводились по той же методике.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведенные эксперименты показали, что существует оптимальное значение удаления фокуса излучателя от кромки сборника $X_{\text{опт}}$ и оптимальное значение заглубления фокуса излучателя относительно поверхности воды $Z_{\text{опт}}$, при которых производительность достигает наибольшего значения. На рис. 2 показано изменение значения производительности Q в зависимости от величины удаления фокуса излучателя X для пяти значений углов наклона излучателя φ при фиксированной акустической мощности W = 21 Вт и фиксированной нулевой величине заглубления фокуса излучателя Z = 0.

Выбранный нами диапазон изменения положения фокуса относительно кромки сборника $X \in [0,25]$ можно разбить на три части, каждую из которых следует рассмотреть отдельно. Первый диапазон соответствует значениям $X \in [X_2, 25]$ и такому положению излучателя, при котором индуцированный акустический фонтан не касается кромки сборника. Для определенности будем называть такой акустический фонтан *«свободным»*. Производительность в данном диапазоне принимает постоянное значение $Q_{\text{своб}}$. Второй диапазон соответствует значениям $X \in [0, X_1]$, при которых часть фокальной области перекрывается кромкой сборника и характеризуется пониженным значением производительности. Третий диапазон $X \in [X_1, X_2]$ соответствует случаю соприкосновения акустического фонтана в момент образования с кромкой сборника и характеризуется наличием экстремума производительности. Значения X_1 и X_2 зависят от выбора используемой акустической мощности и мало зависят от угла наклона излучателя и величины заглубления фокуса излучателя. Для случая, показанного на рис. 2, для всего представленного диапазона углов наклона излучателя φ $X_1 \cong 6$ мм, $X_2 \cong 16$ мм. Увеличение производительности в диапазоне $X \in [X_1, X_2]$ наблюдается для всех исследованных углов наклона из диапазона $\varphi \in [27°, 50°]$ и превышает $Q_{\text{своб}}$ на 15–20%. Так, при фиксированном значении угла наклона φ=36° производительность $Q_{\text{своб}} \cong 10{,}7$ мл/с, а в точке X = 10 мм значение производительности $Q \cong 13{,}3$ мл/с, что превышает значение $Q_{\text{своб}}$ на 20%.

Итак, можно сделать вывод, что для каждого фиксированного угла наклона излучателя φ, при фиксированной акустической мощности, существует оптимальное значение удаления фокуса излучателя от кромки сборника $X_{\text{опт}}$, при котором производительность имеет наибольшее значение.

На рис. 3 показано изменение значения производительности в зависимости от величины заглубления фокуса излучателя Z для тех же значений углов наклона излучателя φ и той же акустической мощности W = 21 Вт, что и на рис. 2. Причем, значение удаления фокуса излучателя от кромки сборника фиксировалось и выбиралось оптимальным $(X = X_{\text{опт}})$. И в данном случае следует разбить рабочий диапазон изменения величины заглубления фокуса излучателя относительно

поверхности воды $Z \in [0,8]$ на три части. Диапазоны $Z \in [0, Z_1]$ и $Z \in [Z_2, 8]$ характеризуются постепенным уменьшением производительности до нуля. Это объясняется тем, что при положении фокуса излучателя непосредственно на границе вода-воздух или вблизи неё ($Z \approx 0$), часть акустической энергии теряется, а при очень больших значениях заглубления акустический фонтан не образуется. Это обуславливает наличие экстремума производительности в диапазоне $Z \in [Z_1, Z_2]$. Величины Z_1 и Z_2 определяются экспериментально. Например, для фиксированного значения угла наклона $\varphi = 36°$ согласно рис. 4 $Z_1 \cong 1$ мм, $Z_2 \cong 5$ мм, а при $Z = 3$ мм наблюдается максимум производительности $Q_{max} \cong 15{,}2$ мл/с. Как было показано выше (см. рис. 2), при $\varphi = 36°$ производительность свободного фонтана составляет $Q_{своб} \cong 10{,}7$ мл/с, следовательно Q_{max} превосходит $Q_{своб}$ на 30%.

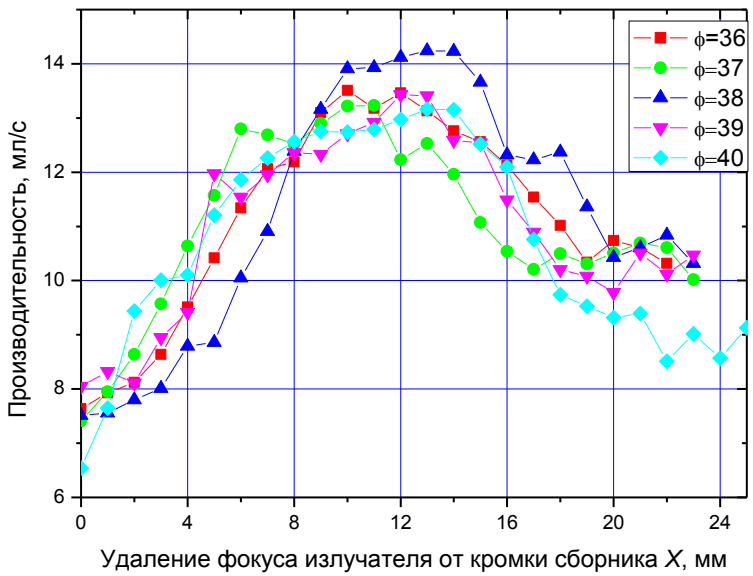

Рисунок 2. Зависимость производительности акустического фонтана от величины удаления фокуса излучателя от кромки сборника, $Z = 0$, φ — угол наклона излучателя в градусах, $W = 21$ Вт. В диапазоне $X \in [6{,}16]$ мм находится экстремум производительности $Q_{экст}$. При $X > 16$ мм производительность стремится к постоянному значению $Q_{своб}$. Причем $Q_{экст}$ превышает $Q_{своб}$ на 15–20%

Итак, можно сделать вывод, что для каждого фиксированного угла наклона излучателя φ при фиксированной акустической мощности W и фиксированной оптимальной величине удаления фокуса излучателя от кромки сборника $X_{опт}$ существует оптимальная величина заглубления фокуса излучателя $Z_{опт}$, при которой производительность достигает максимального значения Q_{max}.

На рис. 4 показано изменение производительности при фиксированном значении угла наклона φ = 40º и фиксированной акустической мощности W = 21 Вт в зависимости от изменения величины удаления фокуса излучателя от кромки сборника X при различных величинах заглубления фокуса излучателя Z. Рис. 4 подтверждает, что существуют такие значения $X_{\text{опт}}$ и $Z_{\text{опт}}$ при которых производительность достигает максимального значения. Соответствующие значения $X_{\text{опт}}$ и $Z_{\text{опт}}$ были получены еще для трех значений акустической мощности (31 Вт, 45 Вт и 76 Вт). Это означает, что при различной акустической мощности для фиксированного значения угла наклона излучателя φ, существуют такие значения величины удаления фокуса излучателя от кромки сборника $X_{\text{опт}}$ и значения заглубления фокуса излучателя относительно поверхности воды $Z_{\text{опт}}$, при которых производительность достигает максимума $Q_{\max}$. Причем $Q_{\max}$ превосходит производительность «свободного» акустического фонтана $Q_{\text{своб}}$ на 25–30%.

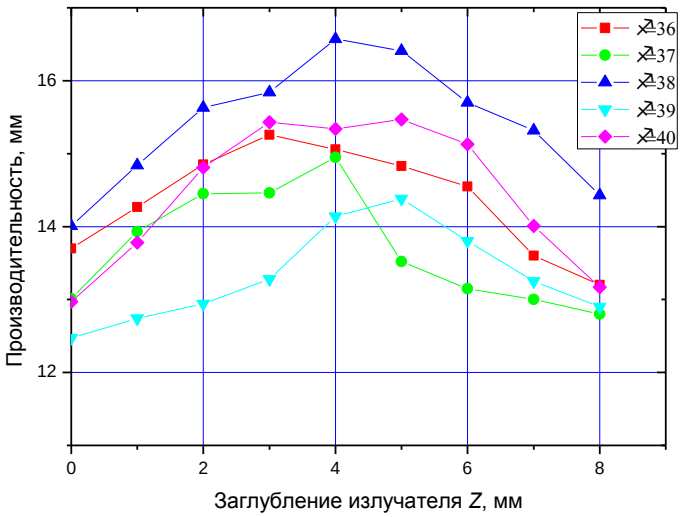

Рисунок 3. Зависимость производительности акустического фонтана (W=21 Вт) от величины заглубления фокуса излучателя относительно поверхности воды Z при $X = X_{\text{опт}}$ и различных значениях угла наклона излучателя φ. В диапазоне $Z \in [2,6]$ мм находится экстремум производительности $Q_{\max}$, причем значение $Q_{\max}$ превышает значение производительности свободного фонтана $Q_{\text{своб}}$ на 25–30%

На рис. 5 показана зависимость производительности $Q_{\max}$ от величины угла наклона излучателя φ при различных значениях акустической мощности W. Условная линейность полученных кривых позволяет сделать вывод об отсутствии зависимости $Q_{\max}$ от величины угла наклона излучателя. То есть, максимальная производительность акустического фонтана, достигаемая при значениях координат $X_{\text{опт}}$ и $Z_{\text{опт}}$, является функцией только акустической мощности.

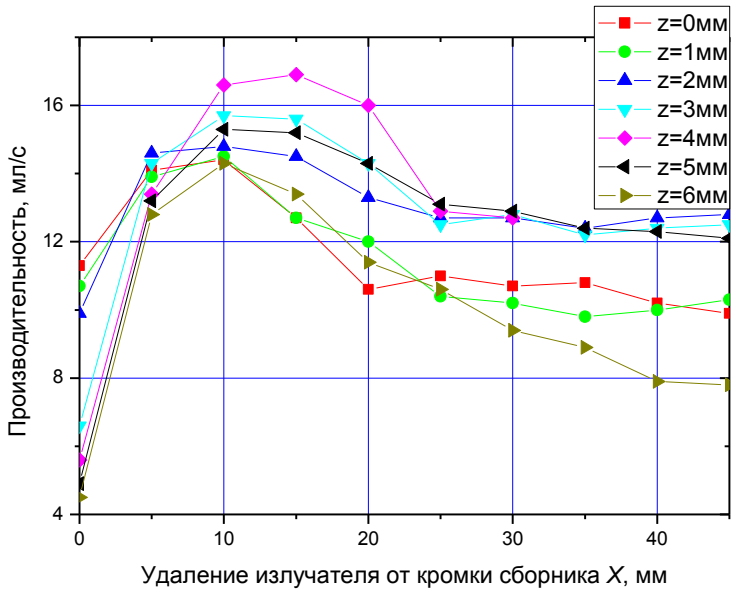

Рисунок 4. Зависимость производительности акустического фонтана Q от величины удаления фокуса излучателя от кромки сборника X при различных величинах заглубления фокуса излучателя Z и фиксированном значении $\varphi = 40°$

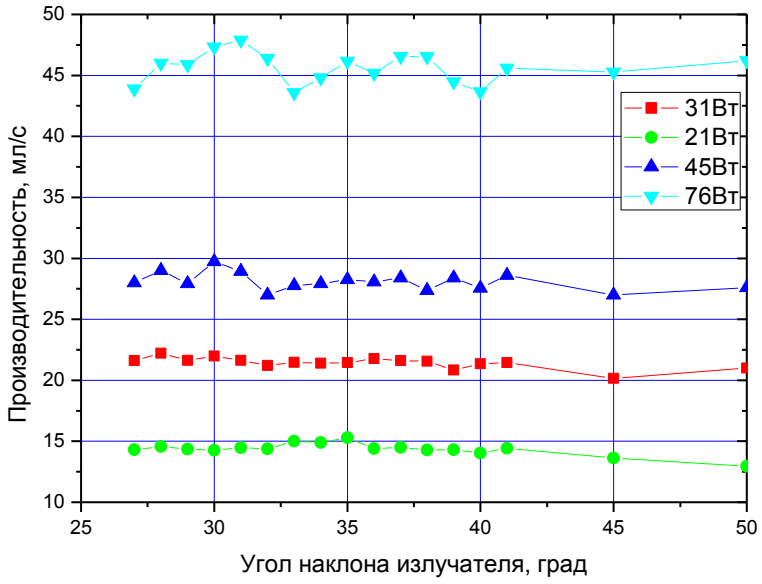

Рисунок 5. Зависимость производительности акустического фонтана Q_{max} от величины угла наклона излучателя φ при различных значениях акустической мощности

3. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Связь величин оптимального удаления и заглубления фокуса излучателя с размерами фокального пятна

Как показали эксперименты, процесс образования акустического фонтана (как и его производительность) зависит от положения фокуса излучателя относительно границы раздела вода-воздух. Как известно [9], фокальная область фокусирующего сферического излучателя представляет собой эллипсоид вращения с полуосями

$$\frac{l}{2}=\frac{\lambda}{1-\cos\alpha_{\text{м}}}, r_0=\frac{0{,}61\lambda F}{a} \ ,$$

где $l/2$ — большая полуось, r_0 — малая полуось, λ — длина волны, $\alpha_{\text{м}}$ — половина угла раскрытия излучателя, a — радиус пластины, F — фокусное расстояние.

В нашем случае $\lambda = c/f_{\text{р}} = 1{,}5$ мм, где c — скорость звука в воде, $f_{\text{р}}$ = 1 МГц — частота ультразвука, $\alpha_{\text{м}} = 27°$, $2a$ = 65 мм, F = 70 мм, и, следовательно,

$l/2 = 13{,}8$ мм, $r_0 = 1{,}97$ мм

или в длинах волн

$l/2 = 9{,}2\lambda, r_0 = 1{,}3\lambda$.

Если предположить, что наибольшее значение производительности соответствует случаю полного погружения фокальной области в воду, то при перпендикулярном падении ультразвука на границу раздела вода-воздух (φ=90°) для полного погружения фокальной области необходимо заглубить фокус излучателя на величину $Z_{\text{теор}} = l/2 = 13{,}8$ мм. В случае наклонного падения ультразвука (φ≠90°), фокус излучателя необходимо заглубить на величину $Z_{\text{теор}} = l/2 \cdot \sin\varphi$. Также, необходимо исключить возможность соприкосновения фокальной области и кромки сборного устройства, что обеспечивается смещением фокуса излучателя от кромки на величину $X_{\text{теор}} = l/2 \cdot \cos\varphi$, при $l/2 \cdot \cos\varphi > r_0 \cdot \sin\varphi$, или на величину $X_{\text{теор}} = r_0 \cdot \sin\varphi$, при $l/2 \cdot \cos\varphi < r_0 \cdot \sin\varphi$. Рабочий диапазон углов наклона излучателя $\varphi \in [27°–50°]$ соответствует случаю $l/2 \cdot \cos\varphi > r_0 \cdot \sin\varphi$, а значит, полное погружение фокальной области достигается при заглублении фокуса излучателя на

$$Z_{\text{теор}} = [\frac{l}{2}\sin 27^\circ, \frac{l}{2}\sin 50^\circ] = [6{,}3 \text{ мм}, 10{,}6 \text{ мм}] = [4{,}2\lambda, 7\lambda]$$

и удалении фокуса излучателя от кромки сборника на

$$X_{\text{теор}} = [\frac{l}{2}\cos 27^\circ, \frac{l}{2}\cos 50^\circ] = [12{,}3 \text{ мм}, 8{,}9 \text{ мм}] = [8{,}2\lambda, 6\lambda].$$

Например, для угла наклона излучателя φ=40° фокальная область будет полностью заглублена при помещении фокуса излучателя в точку (X = 10,6 мм, Z = 8,9 мм). Однако, как следует из рис. 4, максимальное значение производительности достигается при помещении фокуса излучателя в точку $X_{\text{опт}} = 16$ мм, $Z_{\text{опт}} = 4$ мм. На рис. 6 показано

положение фокальной области при помещении фокуса излучателя в точку $(X_{\text{опт}}, Z_{\text{опт}})$. Интересно отметить, что в начальный момент падения волны на границу раздела, до образования акустического фонтана, часть фокальной области оказывается не погруженной в воду, и максимальное значение производительности достигается только тогда, когда существенная часть фокальной области находится внутри струи фонтана.

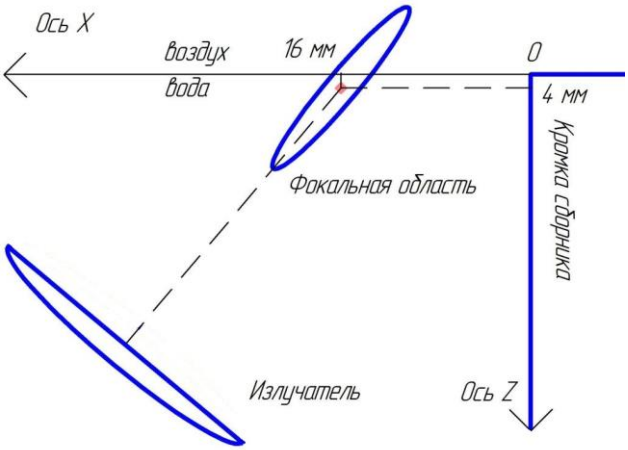

Рисунок 6. Расположение фокальной области при помещении фокуса излучателя в точку ($X_{\text{опт}} = 16$ мм, $Z_{\text{опт}} = 4$ мм), в которой производительность принимает максимальное значение. До образования акустического фонтана существенная часть фокальной области оказывается не погруженной в воду

3.2. Механизм образования экстремума

Как следует из зависимостей, представленных на рис. 2–4, при определенном расположении излучателя производительность достигает максимальных значений. Дадим объяснение наблюдаемой закономерности на основе простой физической модели.

После возникновения не «свободного» акустического фонтана (когда струя в момент образования находится в соприкосновении с кромкой сборника) граница раздела воды и воздуха деформируется определенным образом. А именно, у края сборника появляется водяной горб, подобный выпуклому мениску, шириной равной диаметру фонтана. При отсутствии акустического фонтана при повышении уровня воды (см. рис. 7) появился бы сток воды, производительность которого можно оценить следующим образом. Пусть цилиндр диаметром *2R* окружен водой так, что вокруг образовался мениск высотой *H*. При повышении уровня воды без появления волнения начнется сток жидкости в цилиндр со скоростью

$$v = \sqrt{2gH},$$

где $g = 9{,}81\ \text{м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

Тогда добавочную производительность можно оценить как

$$Q_{доб} = v \cdot S = \int \sqrt{2gH} \cdot L \cdot dH = \frac{2}{3}\sqrt{2g}LH^{\frac{3}{2}} \ \ [м^3/c],$$

где $S = L{\cdot}H$ — площадь над цилиндром, с которой происходит сток, L — рабочая длина окружности цилиндра, вдоль которой происходит сток воды.

Для данных, показанных на рис. 4, рабочая часть длины окружности, ограниченная диаметром струи, была определена экспериментально и составила $L = 2R_{струи} \approx 1$см. Следует отметить, что рабочая часть длины окружности L, строго говоря, является функцией X – удаления фокуса излучателя от кромки сборника. В таблице 1 приведены значения производительности $Q_{доб}$, рассчитанные при различных значениях H. Жирным шрифтом выделены такие значения добавочной производительности $Q_{доб}$, которые, согласно данным рис. 4, хорошо согласуются с экспериментально измеренными величинами. Действительно, если из максимальной величины производительности $Q_{max} \cong 15{,}2$ мл/с (для φ=36°) вычесть вычисленную добавочную величину $Q_{доб}$= 4,8 мл/с, то получим значение, близкое к $Q_{своб} \cong 10{,}7$ мл/с, соответствующее производительности «свободного» фонтана. Высота мениска H, обеспечивающая добавочный слив жидкости, совпадает с наблюдаемыми в эксперименте величинами.

Разумеется, это рассуждение не является строгим доказательством и носит характер качественного объяснения эффекта.

Таблица 1. Добавочная производительность $Q_{доб}$ за счет стока воды, под действием силы тяжести, в зависимости от высоты образовавшегося мениска H

H, мм	$Q_{доб}$, мл/с
1	0,9
1,5	1,7
2	**2,6**
2,5	**3,7**
3	**4,8**
3,5	6,1
4	7,5
4,5	8,9
5	10,4

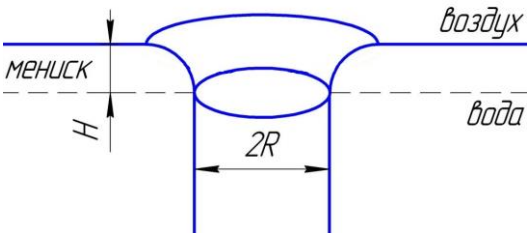

Рисунок 7.
Образование мениска у кромки сборника. При дальнейшем повышении уровня воды без воздействия ультразвука начнется сток

3.3. Линейность зависимости производительности от акустической мощности

Как следует из рис. 5, производительность фонтана слабо зависит от угла, флуктуируя около соответствующих средних значений при всех использованных значениях акустической мощности. На рис. 8, на основе данных рис. 5, построена зависимость производительности от акустической мощности. С большой степенью точности эту зависимость можно аппроксимировать линейной функцией. На данный момент считается, что акустический фонтан возникает благодаря наличию радиационной силы, или радиационного давления — среднее по времени избыточное давление на препятствие, помещенное в звуковое поле [9]. Поскольку величина радиационной силы линейно зависит от интенсивности акустической волны [1], то можно предположить, что именно радиационная сила ответственна за образование акустического фонтана.

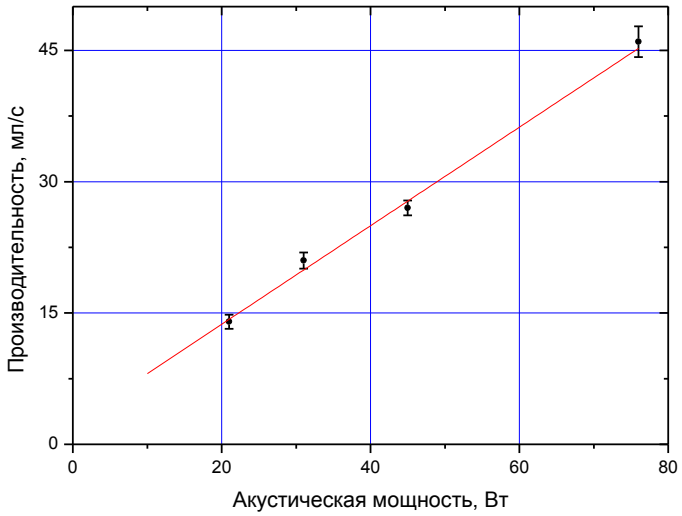

Рисунок 8. Зависимость производительности акустического фонтана Q_{max} от акустической мощности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- впервые измерена производительность акустического фонтана;
- показано, что производительность акустического фонтана линейно связана с акустической мощностью фокусированного ультразвука;
- при фиксированной акустической мощности производительность акустического фонтана зависит от удаления фокуса излучателя от кромки сборника и от заглубления фокуса излучателя относительно поверхности воды. Эти зависимости имеют экстремум. В точке экстремума наблюдается максимальное значение производительности, превышающее производительность «свободного» фонтана на 25-30%.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Красильников, В. В. Крылов. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984 г. – 403 с.
2. В. Ниборг. Акустические течения // Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1969 г. Т. 2, ч. Б. 420 с.
3. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике / Под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга, изд. 2.М.: изд. иностранной литературы, 1957 г. – 728 с.
4. О. К. Экнадиосянц. Получение аэрозолей // Физика и техника мощного ультразвука, т.3 Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л. Д. Розенберга, ч. V. М.: Наука, 1970 г. – 688 с.
5. J. N. Koblanski. Method and apparatus for ultrasonically removing contaminants from water // US Patent, June 28, 1977.
6. J. N. Koblanski An acoustical method of burning and collecting oil spills on cold pen water surfaces. Oil spill conference: Papers San-Antonio, Texas, SU, 1983.
7. И. С. Грудзинская. Акустический метод удаления жировых пленок с поверхности жидкости. Судостроительная промышленность, серия АКУСТИКА, 1987, выпуск 2, с. 75 – 79.
8. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под. ред. И. П. Голяминой. М.: «Советская энциклопедия», 1979 г. – 400 с.
9. Л. Д. Розенберг. Фокусирующие излучатели ультразвука // Физика и техника мощного ультразвука, т.1 Источники мощного ультразвука / Под ред. Л. Д. Розенберга, ч. III. М.: Наука, 1967 г. – 380 с.