

# ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВРЕМЕННОМ МЕТОДЕ КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ ПОТОКА

**A.H. Греков, Н.А. Греков**

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
*E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net*

*В статье приведены результаты исследования влияния скорости потока на дисперсию спектра шумов для конкретной конструкции измерительного канала скорости течения прибора ИСТ-1М. Сделана оценка временной стабильности, влияния температуры и вязкости на дисперсию спектра скорости течения в пределах чувствительности прибора.*

При акустическом методе измерения скорости течения в зависимости от конструктивных особенностей пьезопреобразователей, их местоположения в потоке, от характеристик самого потока, а также от электронных схем и соединительных кабелей могут возникать шумы различных видов. Количественный параметр шумов связан также с конечностью длины исследуемой реализации.

Известно, что обтекание тел различной формы потоком жидкости сопровождается гидродинамическим шумом [1 – 3].

Шум формируется в пограничном слое вблизи плохообтекаемых тел или находящимися под углами атаки к набегающему потоку [4]. Образованные пульсации давления перемещаются со скоростью звука и формируют акустические волны, являющиеся компонентой гидродинамического шума.

По утверждению автора [5] псевдозвуковые составляющие шума переносятся со скоростями, близкими к скорости набегающего потока, и возникают от пульсаций скорости и давления, которые генерируются вихревыми структурами.

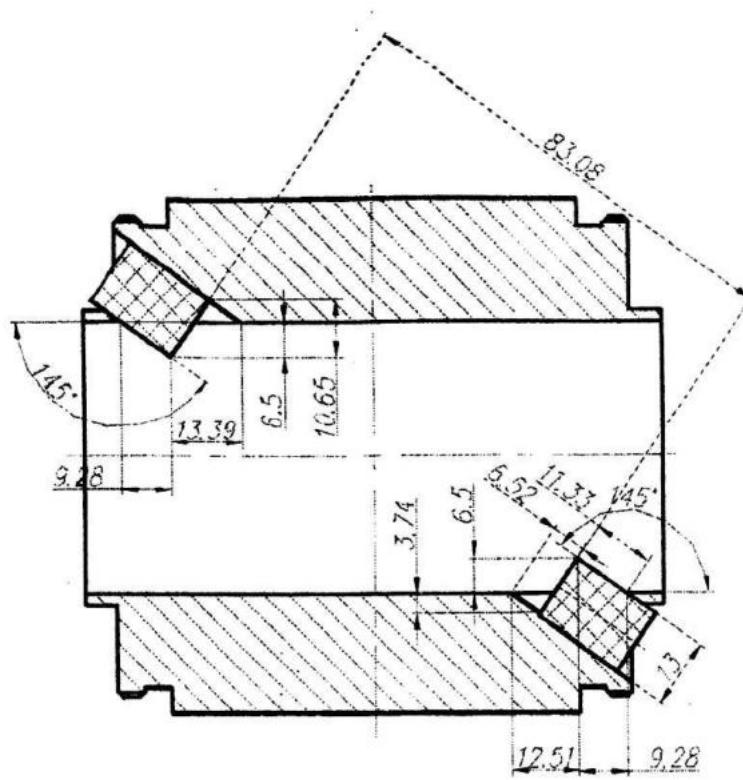
В экспериментальных исследованиях по изучению пространственно-временных характеристик псевдозвуковых ис-

точников гидродинамического шума [6] было выявлено, что пульсации скорости и давления коррелируют между собой и их корреляция зависит от источников пульсаций и их интенсивности.

Кроме перечисленных видов шумов при акустическом методе измерения скорости потока существенную помеху могут создавать газовые пузырьки, которых бывает много в поверхностном слое движущейся воды. Пузырьки являются осцилляторами и хорошо рассеивают и поглощают звук на резонансных частотах. Водная среда, содержащая множество пузырьков, обладает высоким уровнем акустической нелинейности и воздействует на акустические волны. При малой концентрации пузырьков влияние их несущественно, при больших концентрациях необходимо учитывать этот эффект. Как правило, в акустических измерителях скорости течения приводится допустимый уровень объемной концентрации газовых пузырьков (который по утверждению разработчиков [7, 8] не должен превышать 1 %).

Хорошо изучены и проведены исследования генерации псевдозвуковых пульсаций скорости и давления выполненные при обтекании овальной лунки [5]. В нашем приборе есть труба, в которую установлены пьезодатчики, со сложной плохообтекаемой пристеночной областью (рис. 1), которая генерирует шумы, и, если принять, что конструктивные характеристики прибора неизменны, возникает задача исследовать и экспериментально получить зависимости влияния температуры и вязкости на дисперсию спектра шума и оценить их количественный вклад на параметры пульсаций скорости при контроле скорости течения, а также сделать оценку временной стабильности исследуемых зависимостей.

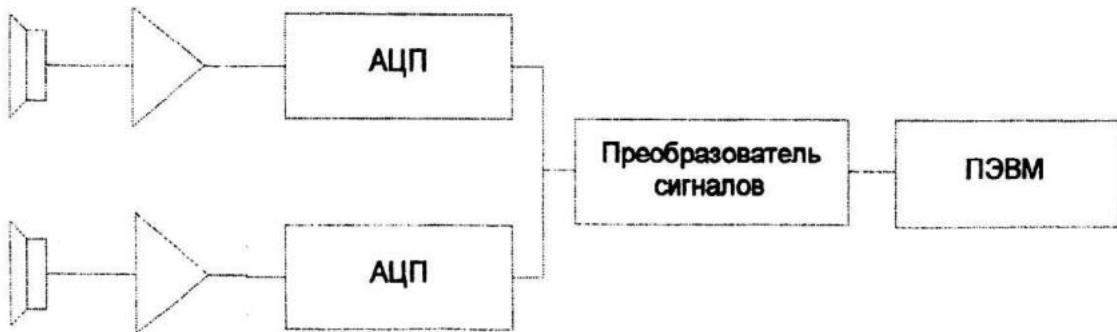
Первые работы по исследованию влияния потока на дисперсию спектра шумов при дифференциально-фазовом методе контроля скорости течения были опубликованы в [9, 10]. На этот метод был получен патент UA N88702 [11].



Р и с. 1. Характерные размеры выступов пьезопреобразователей и их взаимное расположение

Вначале экспериментов исследовались пульсации давления. Исследование пульсаций давления проводилось с помощью пьезокерамических датчиков,

расположенных в канале скорости течения (см. рис. 1), которые присоединялись с помощью шлейфов к входу усилителя, а далее на АЦП и ПЭВМ (рис. 2).



Р и с. 2. Структурная схема измерительной установки

Скорость течения в эксперименте менялась в диапазоне от 0 до 2 м/с. При максимальной скорости потока отдельные всплески сигнала, снимаемых с пьезодатчиков, не превышали 100 мкВ. В остальном, уровень шума колебался в пределах 10 мкВ. Исследованию взаимно корреляционных пульсаций скорости

и пристеночного давления посвящена работа [3], в которой сделаны оценки взаимосвязи между полями скорости и давления для конкретного вихревого движения, образованного полусферическим углублением. В нашем случае при пассивном методе контроля использовать пристеночные пульсации давления

для измерения скорости потока проблематично.

В технике известен пассивный метод определения расхода [12] при непрерывном движении жидкости в трубопроводе, заключающийся в определении скорости прохождения жидкости через фиксированное сечение трубопровода посредством измерения акустических шумов, создаваемых движением жидкости. Акустические шумы преобразуют в электрические сигналы со спектром частот в диапазоне 20 Гц – 12 кГц и определяют амплитуды сигналов на двух рабочих частотах в указанном диапазоне частот, а скорость движения жидкости определяют по разнице этих амплитуд.

При активном акустическом методе, когда излучаются и принимаются сигналы от пьезопреобразователей необходимо контролировать вначале фронт акустического сигнала, амплитуда которого в приборе составляет  $\approx 40$  мВ, а затем временной интервал на конкретной базе. Интервал времени в приборе измеряется с чувствительностью  $\approx 50$  пс на базе 7 см, что позволяет контролировать пульсации неоднородностей с размерами доли мм/с. Основные соотношения для скорости течения  $V$  и скорости звука  $C$  при временном методе контроля скорости потока выглядят так

$$V = \frac{D(\tau_2 - \tau_1)}{\tau_1 \tau_2 \sin 2\alpha}, \quad (1)$$

$$C = \frac{D(\tau_2 + \tau_1)}{\tau_1 \tau_2 \sin 2\alpha}, \quad (2)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  – время распространения ультразвуковых импульсов по направлению движения жидкости и против него;  $D$  – диаметр канала;  $\alpha$  – угол, под которым располагаются пьезопреобразователи в канале относительно оси.

Для оценки временной стабильности зависимости дисперсии спектра шумов от скорости потока в отделе ОАОИ МГИ НАНУ проводились лабораторные эксперименты. В течение четырех месяцев через определенные промежутки времени снимались характеристики шумов канала скорости прибора ИСТ-1М при

различных скоростях потока. Прибор помещался в гидролоток последовательно с образцовой вертужкой. Вода, находящаяся в гидролотке, имела постоянную температуру и соленость. Скорость потока в гидролотке изменялась от 0 до 2 м/с. В каждом эксперименте дискретно снимались характеристики скорости течения совместно с шумами при увеличении и уменьшении скорости потока в лотке.

В среднем за один эксперимент получали около 30 выборок. Время измерения для получения одной реализации составляло около 200 с. Затем проводилась обработка полученных данных на ПЭВМ, используя уравнение для расчета дисперсии спектра  $\sigma^2$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{k=0}^K (X_k - \bar{X})^2}{K-1}, \quad (3)$$

где  $\bar{X}$  – математическое ожидание спектра  $X_k$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i k n}{N}}, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (4)$$

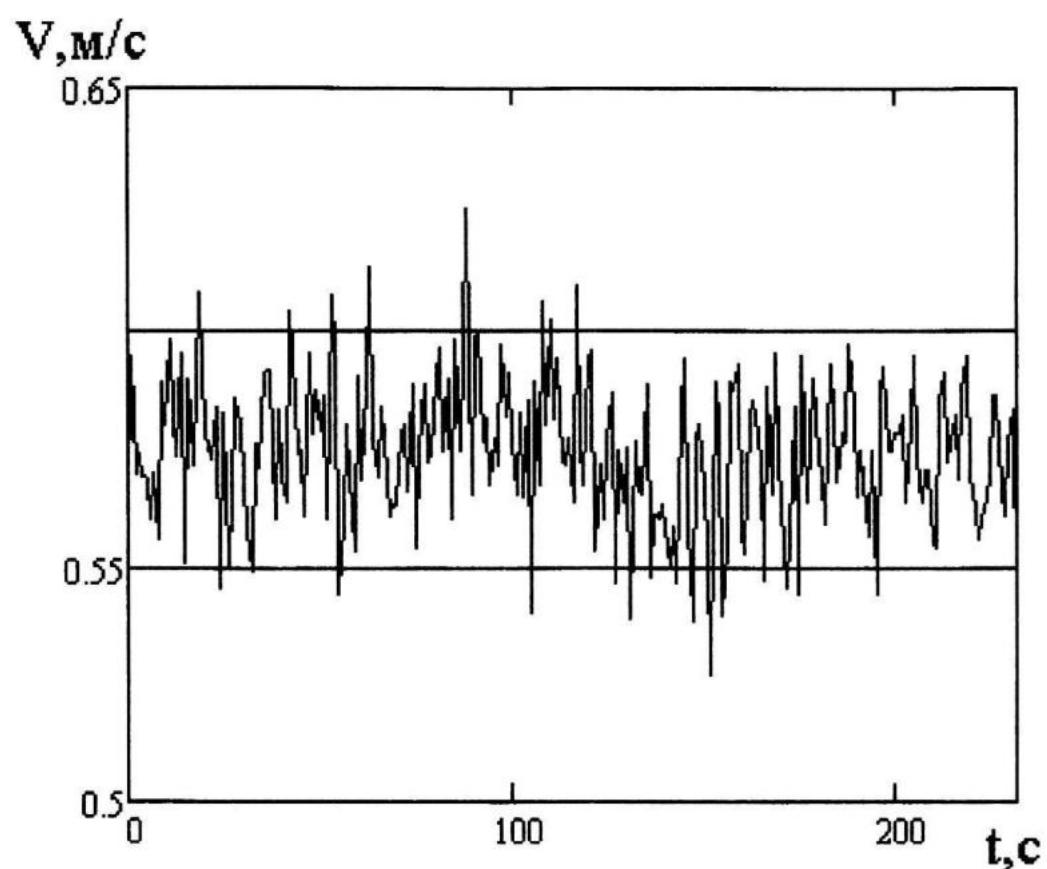
где  $x_n$  – исходная последовательность данных;  $i$  – это мнимая единица;  $N$  – количество значений в последовательности.

Дополнительно вычислялась средняя скорость течения по дискретным данным по формуле

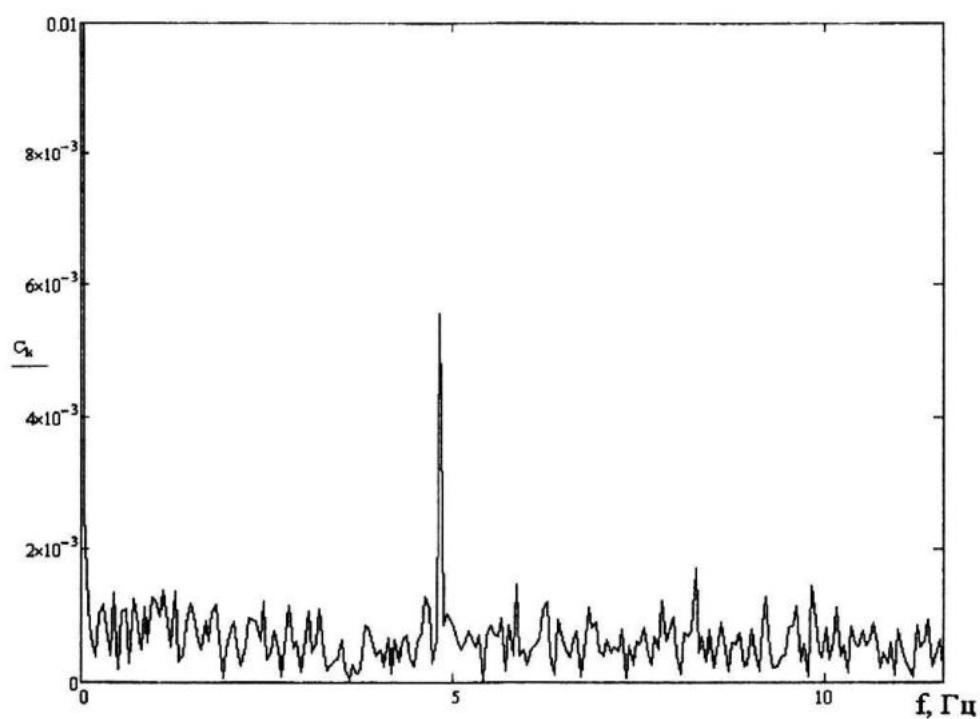
$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \quad (5)$$

Фактически в вычисленные средние значения скорости  $\bar{V}$  входит и сглаженная шумовая составляющая. И если шум возрастает, то при определенных значениях он может существенно повлиять на точность определения скорости потока.

Для примера на рис. 3 представлен исходный сигнал шума для скорости течения 0,57 м/с, а на рис. 4 – спектр этого сигнала. Ширина представленного спектра – 12 Гц.



Р и с. 3. Исходный сигнал шума для скорости течения 0,57 м/с



Р и с. 4. Спектр сигнала шума для скорости течения 0,57 м/с

В спектре сигнала в районе 5 Гц наблюдается остроконечный пик, который можно характеризовать как генерацию вихрей на этой скорости.

Совокупность 30 выборок для одного эксперимента, где отражены зависимо-

сти дисперсии спектра шума от скорости потока, снятые при увеличении скорости течения и при её уменьшении представлена на рис. 5.

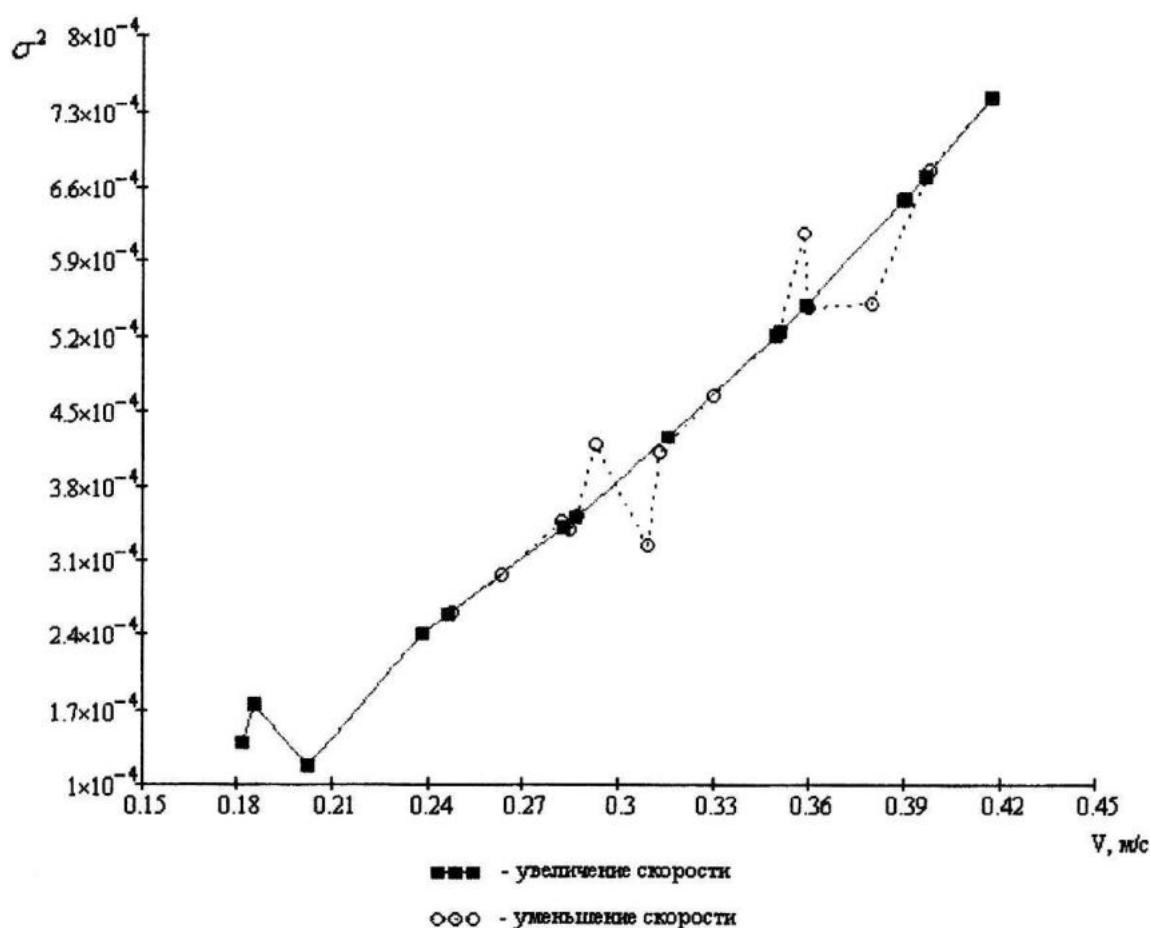


Рис. 5. Совокупность 30 выборок для одного эксперимента

Используя метод наименьших квадратов, зависимости дисперсии спектра от скорости потока аппроксимировались с помощью полиномов 1-ой и 2-ой степени. Хорошие результаты дает аппроксимация полиномом 2-ой степени

$$V = V_0 + aD + bD^2, \quad (6)$$

где  $D$  – дисперсия спектра;  $V_0$  – начальная скорость;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты полинома.

Для этого эксперимента кривые, снятые при увеличении и уменьшении скорости потока, имеют отклонение между графиками  $\pm 0,004$  м/с.

Результаты исследований, заключающихся в проведении многократных экспериментов по определению зависимости дисперсии спектра шумов от скорости потока, представлены на рис. 6. Анализируя представленные графики, можно сделать следующие выводы. Для прибора ИСТ-1М, дисперсия спектра

шумов может использоваться для контроля скорости потока.

Среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от регрессионной кривой 2ой степени с коэффициентами  $a = 387,87$ ,  $b = -0,000599$  составляет  $0,00759$  м/с в течение четырех месяцев, что и отражает величину временной нестабильности дисперсии спектра шумов в диапазоне скоростей  $0,15 - 1$  м/с. Начиная со скорости  $0,5$  м/с, отклонение экспериментальных точек дисперсии спектра от аппроксимированной кривой возрастает и, видимо, связа-

но с физическими процессами шумов для конкретной конструкции акустического канала скорости течения.

Для исследования влияния температуры на дисперсию спектра шумов было выполнено несколько экспериментов.

При скорости течения  $V = 1$  м/с,  $V = 0,6$  м/с и нулевой скорости в диапазоне температур от  $20$  до  $38$  °C снимали зависимости дисперсии спектра шумов от температуры  $D_V = f(T)$  при постоянной скорости течения  $V = \text{const}$ .

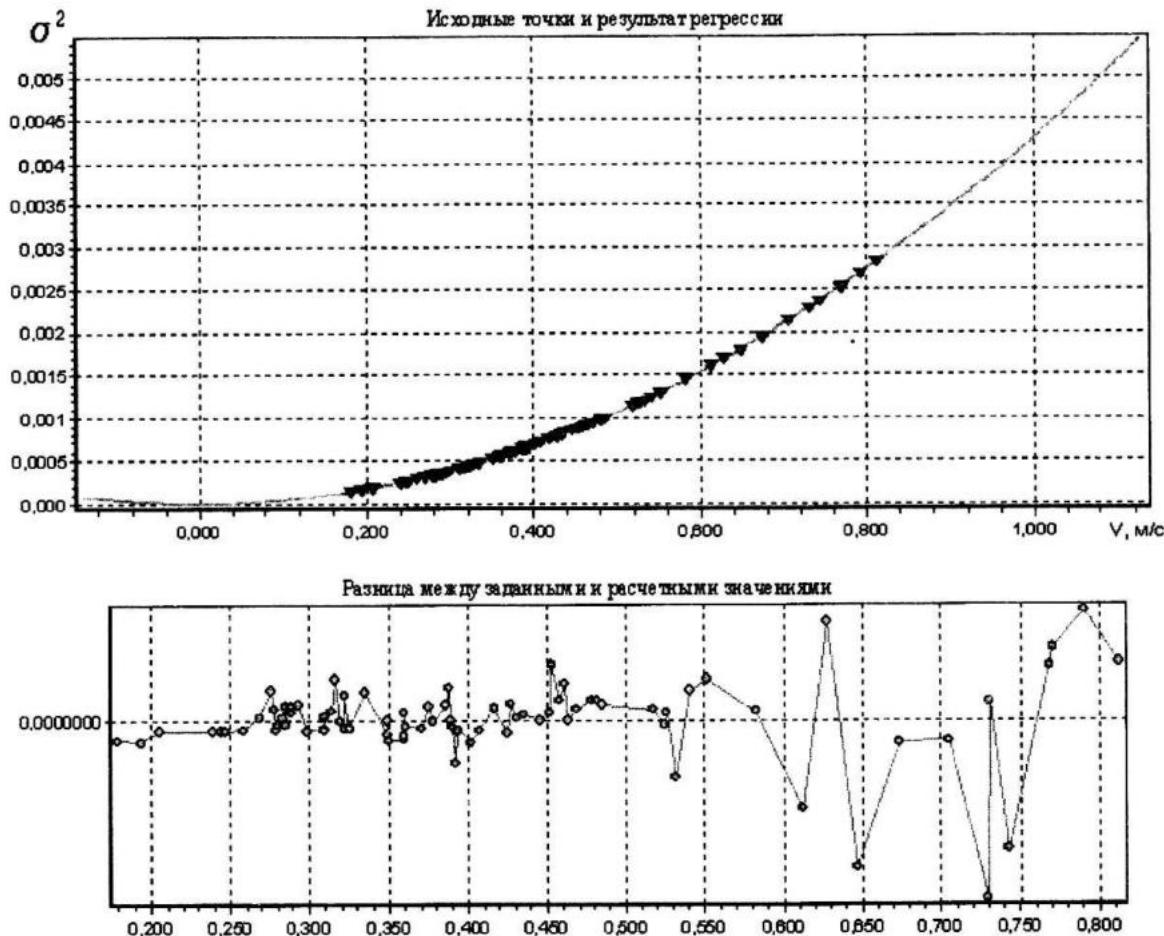
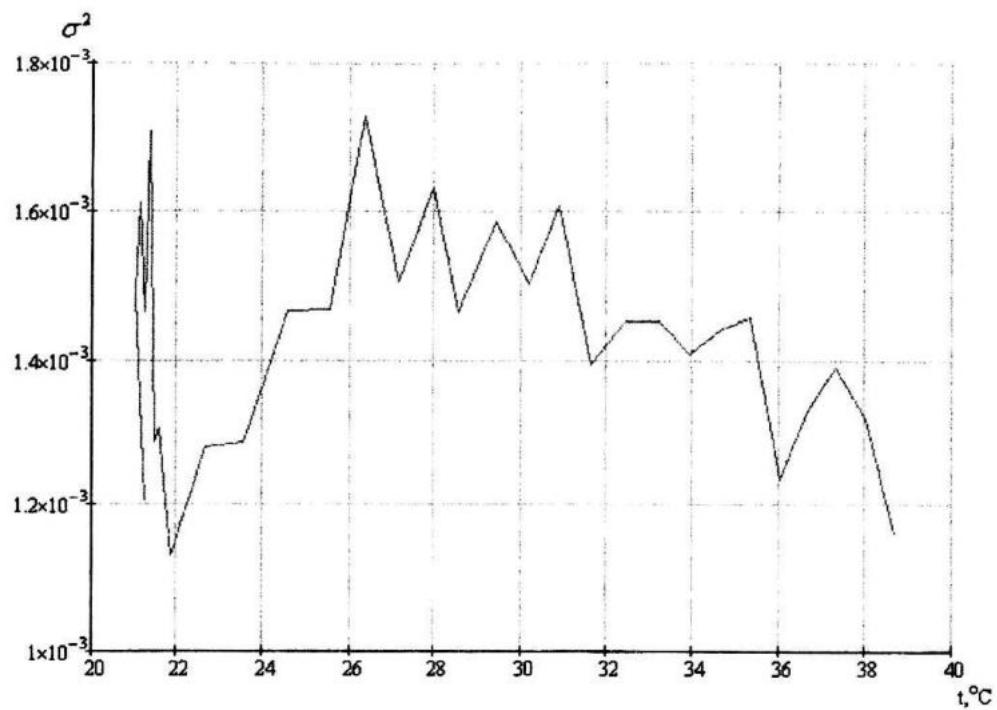


Рис. 6. Исходные точки и результаты регрессионного анализа для полученных экспериментальных зависимостей дисперсии спектра шумов от скорости течения

При нулевой скорости течения дисперсия спектра была близка к нулю. Фактически на нулевой скорости проявляются шумы от электронных схем и соединительных кабелей. Для средней скорости течения  $\sim 0,6$  м/с на рис. 7 построена зависимость дисперсии спектра

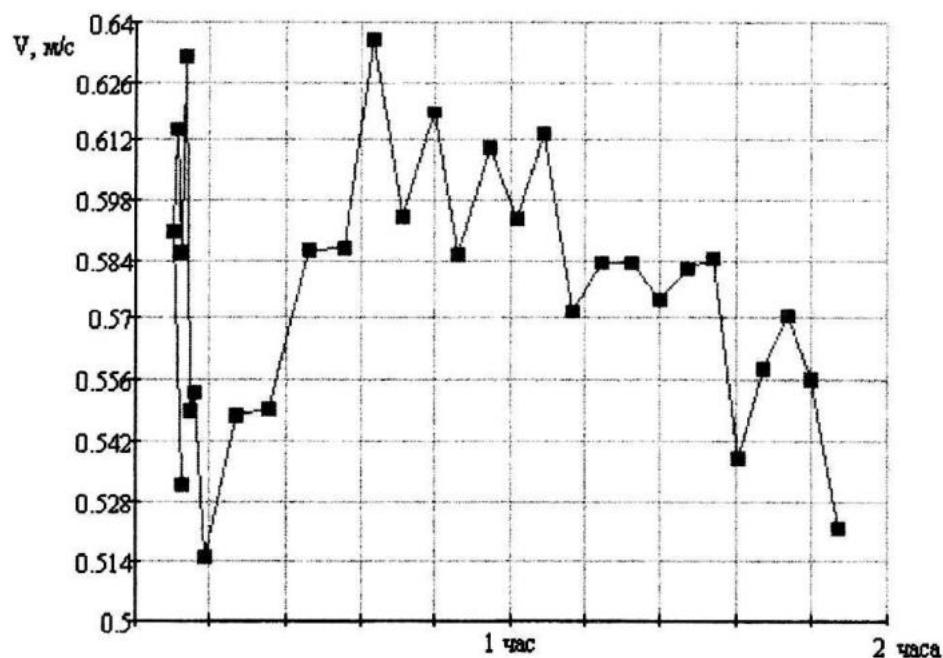
от температуры. Ломаный характер кривой вызван нестабильностью скорости потока, которую не удалось сохранить постоянной в течение всего периода измерения. Период измерения составлял около двух часов и связан с медленным нагревом воды в гидролотке.



Р и с. 7. Зависимость дисперсии спектра от температуры при средней скорости  $V = 0,6 \text{ м/с}$

Одновременно с температурой проводились измерения скорости течения. График, отражающий изменения скорости потока от времени, представлен на рис. 8. Сравнивая эти графики можно сделать заключение, что на рис. 7 измене-

нение дисперсии спектра однозначно отражает изменение скорости потока, а, следовательно, взаимосвязь дисперсии спектра от температуры не проявляется в пределах чувствительности измерительных каналов.



Р и с. 8. Зависимость изменения скорости потока от времени при средней скорости  $V = 0,6 \text{ м/с}$

Исследованию влияния вязкости на гидроакустические шумы посвящены работы [13 – 15]. В основном это экспериментальные исследования о влиянии растворов высокомолекулярных полимеров, вязкость которых в сотни раз выше вязкости воды, на структуру турбулентного пограничного слоя.

Под действием полимерных молекул интенсивность поля пульсаций давления в области высоких частот существенно уменьшается при увеличении скорости обтекания, что приводит к уменьшению акустического шума.

В нашем эксперименте мы изменяли вязкость с помощью моющих шампуней, что соответствует загрязнению вод антропогенными веществами.

Для исследования влияния вязкости жидкости на дисперсию спектра нами был проведен следующий эксперимент. Вначале снималась зависимость дисперсии спектра шумов от скорости течения (рис. 9) для водопроводной воды при фиксированной температуре.

Затем в воду добавили шампунь и вновь при той же температуре сняли зависимость дисперсии спектра шумов от скорости течения (рис. 10).

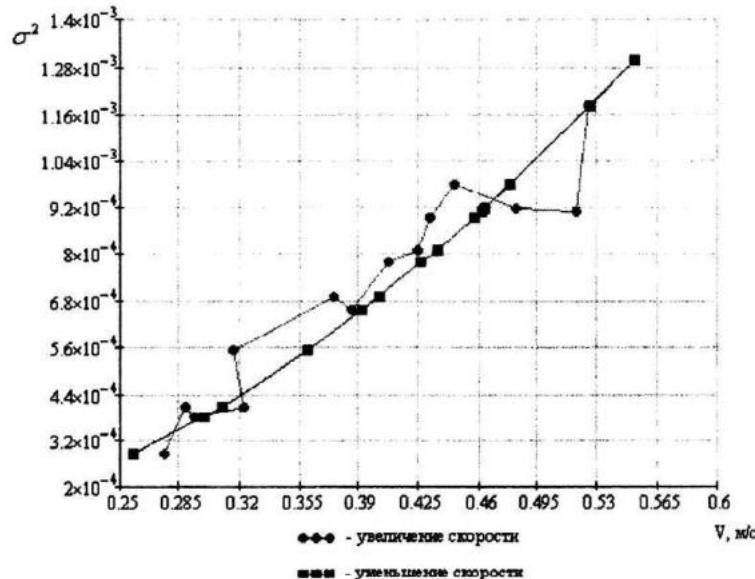


Рис. 9. Зависимость дисперсии спектра шумов от скорости течения для водопроводной воды

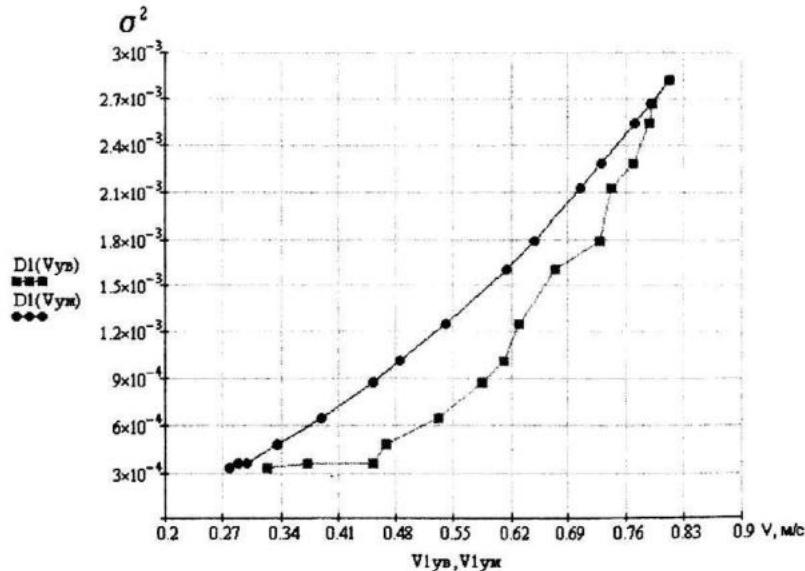


Рис. 10. Зависимость дисперсии спектра шумов от скорости течения при добавлении в воду шампуней

Полученное множество точек аппроксимировали полиномом второй степени (рис. 11). Расхождение графиков для нулевой дисперсии не превышали 0,04 см/с по скорости. Среднее квадратическое отклонение аппроксимирующих кривых от полученных зависимостей не превышало 0,5 см/с.

Учитывая, что кинематическая вязкость зависит от плотности жидкости, которая в свою очередь зависит от температуры, и, опираясь на результаты,

полученные ранее, можно сделать вывод, что вязкость воды с примесями в диапазоне температур от 10 до 40 °C не влияет на дисперсию спектра шумов, во всяком случае, в пределах чувствительности прибора.

На рис. 12 представлена величина ошибки между экспериментальными точками скорости и дисперсии скорости и расчетными значениями, полученными с использованием полинома второй степени (5).

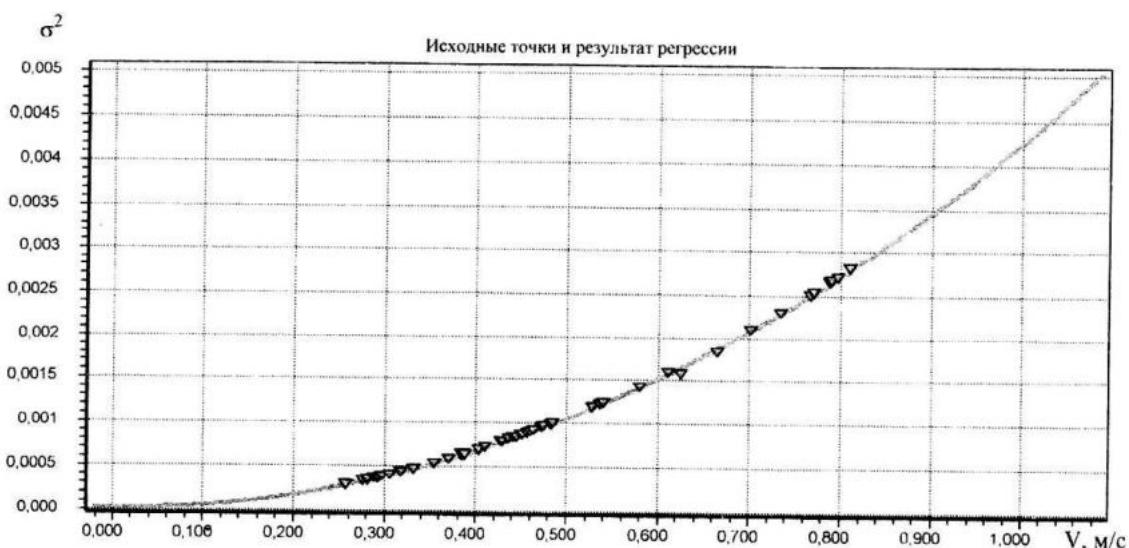


Рис. 11. Аппроксимированная кривая дисперсии спектра шумов от скорости течения



Рис. 12. Величина ошибки между экспериментальными точками и расчетными значениями

**Выводы.** При контроле скорости течения жидкости можно использовать градуировочные характеристики: среднюю скорость течения, определяемую по формуле (5), и дисперсию спектра шумов, определяемую по формулам (3) и (4). В средней скорости прибора присутствуют шумы, которые осредняются. Вторая характеристика характеризует

скорость потока с шумами. Получая эти градуировочные характеристики, можно осуществлять фильтрацию выбросов, которые имеют различное происхождение и существенно влияют на точность контроля скорости. Такие выбросы хорошо видны на рис. 12 при скоростях 0,625 м/с и 0,66 м/с.

Временная нестабильность дисперсии спектра шумов в течение четырех месяцев в диапазоне скоростей 0,15 – 1 м/с не превышает 0,8 см/с.

Дисперсия спектра шумов зависит квадратично от скорости течения и не зависит от вязкости воды и температуры в пределах чувствительности прибора.

*Авторы выражают благодарность магистрантам О.В. Ефременкову и В.В. Погореловой за участие в проведении экспериментов.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смольяков А.В. Шум турбулентных потоков. – С.-Пб.: ЦНИИ им. Акад. А.И. Крылова, 2005. – 321 с.
2. Blake W.K. Mechanics of flow-induced sound and vibration: in 2 vols. – New York: Academic Press, 1986. – 974 p.
3. Воропаев Г.А., Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Гринченко В.Т., Исаев С.А., Розумюк Н.В. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки // Акустичний вісник, 2008. – 11, № 3. – С. 27 – 49.
4. Воскобойник В.А., Гринченко В.Т., Макаренков А.П. Скорости переноса когерентных вихревых структур в турбулентном пограничном слое на цилиндре // Акустичний вісник, 2000. – 3, № 4. – С. 21 – 29.
5. Воскобойник В.А. Поле пульсации пристеночного давления внутри и вблизи овальной лунки при малой скорости обтекания // Вісник донецького національного університету, 2010. – Вип. 1. – С. 42 – 51.
6. Воскобойник В.А., Воскобойник А.А., Воскобойник А.В. Взаимные корреляционные и спектральные характеристики пульсаций скорости и давления в полусферической лунке // Акустичний симпозіум-Консонанс 2009. – К.: ІГМ НАН України, 2009. – С. 343 – 348.
7. C. Clay, H. Medwin, Acoustical oceanography: principles and applications. John Wiley & Sons, New York, 1977.
8. H. Medwin, Counting bubbles acoustically. Review, Ultrasonics, 1977, v.15, – P. 7 – 13.
9. Греков Н.А., Греков А.Н., Данченко М.Я., Жемков Е.И. Исследование акустического канала измерителя скорости течения // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – С. 28 – 31.
10. Греков Н.А., Греков А.Н. Информативность дисперсии спектра турбулентных шумов в акустических измерениях // Автоматизация процессов и управление. Вестник СевГТУ № 95. Севастополь, 2009. – С. 61 – 64.
11. Патент України № 88702. Способ визначення швидкості потоку та витрат рідких і газоподібних продуктів. Греков Н.А., Греков А.Н.; заявитель и патентообладатель Морской гидрофизический ин-т. – Опубл. 10.11.2009. Бюл. № 21.
12. Патент РФ № 2132510. Способ диагностики течей в арматуре, трубопроводах, сосудах давления и устройство для его осуществления. Бельтиюк В.А., Воробьев А.И., Жиганов П.Г. и др.: заявитель и патентообладатель Производственное объединение «Маяк» – Опубл. 27.06.1999.
13. Воскобойник В.А., Гринченко В.Т., Макаренков А.П. Снижение гидродинамических шумов растворами высокомолекулярных полимеров // Акустичний вісник, 2007. – 10, № 2. – С. 33 – 42.
14. Ptasinski P.K., Nieuwstadt F.T.M., Van den Brule B.H.A.A., Hulsen M.A. Experiments in turbulent pipe flow with polymer additives at maximum drag reduction // Flow, Turbulence Combust. – 2001. – 66, № 2. – P. 159 – 182.
15. Dubief Y., Terrapon V.E., White C.M. and al. New answers on the interaction between polymers and vortices in turbulent flows // Flow, Turbulence and Combustion. – 2005. – 74, № 3. – P. 311 – 329.