

А. С. Митряков, И. В. Литвинов, С. И. Шторк

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

*Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

andrej.mitryakov@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСТАЦИОНАРНОГО ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОТБОРНИКОВ ДАВЛЕНИЯ *

Использование специальных отборников совместно с измерительными микрофонами позволяет проводить локальные измерения пульсаций давления, при этом минимально возмущая исследуемое течение. Для восстановления исходного сигнала пульсаций давления необходима информация о передаточной характеристике отборника давления. В данной работе представлена методика получения передаточной характеристики отборника, апробирована теоретическая оценка данной характеристики на основе аналитической модели, а также продемонстрировано восстановление реального сигнала пульсаций давления, полученного в нестационарном течении на выходе вихревой тангенциальной камеры.

Ключевые слова: акустические отборники давления, передаточная характеристика, измерительные микрофоны.

Введение

Измерительные микрофоны широко используются для регистрации сигнала пульсаций давления в аэродинамическом эксперименте, но на практике возникает ряд проблем. Во-первых, среда может быть химически агрессивна к диафрагме микрофона, или измерения нужны в области высоких температур, также опасных для микрофона [1; 2]. Во-вторых, микрофон, обладая достаточно большими размерами по сравнению с характерными структурами в потоке, может значительно его возмущать [3; 4]. Решением такого рода проблем может быть использование миниатюрных отборников давления, присоединенных к микрофону, которые по-

зволяют защитить диафрагму микрофона, а также проводить более локальные измерения пульсаций давления, минимально возмущая поток.

Обычно отборники представляют собой металлические насадки – зонды цилиндрической геометрии [5; 6]. В самом простом случае это капиллярная трубка малого диаметра, соединенная с головкой микрофона через переходник [7]. Также в литературе встречается описание гибких отборников [8] для проведения измерений в человеческом ухе.

Следует иметь в виду, что использование отборника искажает регистрируемый сигнал, а именно происходит изменение амплитуды сигнала и его сдвиг по фазе [6; 9; 10].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00487).

Это делает необходимым определение передаточной характеристики отборника, на основе которой реальный сигнал пульсаций давления может быть восстановлен.

Исходя из сказанного целью данной работы является отработка экспериментального способа определения передаточной характеристики отборника и апробация теоретической оценки этой характеристики с использованием аналитической модели из работы [10]. Найденные передаточные характеристики отборника использованы затем для восстановления спектра пульсаций давления потока на выходе из вихревой камеры – модели тангенциального горелочного устройства.

Экспериментальная методика определения передаточной характеристики отборника

На рис. 1, *a* представлена схема отборника, изготовленного из дюрали. Отборник состоит из переходника с конической полостью и соединенной с ним тонкой трубки. Для исходной геометрии отборника были заданы следующие параметры: внутренний объем конической полости $V_v = 400 \text{ мм}^3$, внутренний радиус отборника $R = 0,4 \text{ мм}$, длина отборника $L = 0,19 \text{ м}$. Данные параметры были выбраны с учетом характерного масштаба модельной вихревой камеры, в которой будут проводиться тестовые опыты.

Для определения передаточной характеристики отборника использовался калибровочный участок (рис. 1, *b*), состоящий из деревянного короба (1), пластиковой трубы (2) и источника звука (3). В трубе длиной 430 мм и диаметром 105 мм генерировался синусоидальный звуковой тон от 50 до 1 000 Гц с шагом 2 Гц. На расстоянии 40 мм от верхнего заглушенного конца трубы располагалась пара диаметрально противоположных отверстий для контрольного микрофона и исследуемого отборника. Использование трубы позволяет увеличить соотношение сигнал / шум.

Синусоидальный сигнал подавался на электродинамический источник звука Pioneer TS-G1032I (3), с помощью генератора частоты L-Card E-310 (4) и усилителя Reference Amplifier A500 (5). Для регистрации пульсаций давления использовалась пара акустических датчиков на основе конденсаторных микрофонов Behringer ECM 8000 с

отборником (6) и без (7). Сигналы с микрофонов оцифровывались с помощью АЦП L-Card E-440 (8) и были усилены с помощью предусилителей Tube Microgain M200 (9). Для проведения эксперимента использовалось оригинальное программное обеспечение, благодаря которому результаты для каждой установленной частоты синуса записывались в отдельные файлы длительностью 10 с и частотой дискретизации 2 кГц.

Из полученных сигналов строилась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) как отношение амплитуд в спектре, и фазово-частотная характеристика (ФЧХ) как разность фаз двух сигналов. Следует отметить, что данная процедура калибровки датчиков автоматически учитывает собственные АЧХ и ФЧХ калибровочного участка.

Теоретическая оценка передаточной характеристики отборника

Распространение звуковых волн в отборнике может быть описано уравнениями Навье – Стокса, неразрывности, состояния идеального газа и баланса тепловой и кинетической энергии. Подробное решение этой системы уравнений приведено в работе [10] для серии соединений трубок и передатчиков. Для совместного решения указанной системы четырех уравнений в этой работе использованы следующие допущения. Во-первых, учитываются отклонения скорости только от нулевого значения, во-вторых, для давления, температуры и плотности рассматриваются их отклонения только от средних значений. Предполагается, что распространяющиеся возмущения малы, внутренний радиус трубки мал по сравнению с ее длиной, движение среды ламинарное. Используются следующие граничные условия: осевая и радиальная скорости равны нулю на стенках, на центральной линии радиальная скорость также равна нулю, теплопроводность стенок намного больше теплопроводности потока. Давление на входе в трубку считается известным, увеличение массы воздуха внутри полости переходника определяется поступлением воздушного потока внутрь из трубки и увеличением ее объема из-за отклонения диафрагмы микрофона. После решения системы уравнений с оговоренными условиями, согласно [10; 11], для поиска амплитудной

и фазовой частотной характеристики (АФЧХ) получается следующее уравнение:

$$\begin{aligned} p_1 / p_0 = \\ = [\cosh(\varphi L) + (V_v / V_t)(\sigma + k^{-1})n\varphi L \cdot \sinh(\varphi L)]^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где p_1 – давление на выходе, p_0 – давление на входе, L – длина трубки, $V_t = \pi R^2 L$ – объем трубки, R – радиус трубки, V_v – объем передатчика, σ – безразмерная величина отклонения диафрагмы микрофона, k – константа политропы для объемов

$n =$

$$= [1 + ((\gamma - 1) / \gamma) J_2(\alpha \cdot \text{Pr}^{0,5}) / J_0(\alpha \cdot \text{Pr}^{0,5})],$$

где $\alpha = i^{1,5} R \sqrt{\rho \omega / \mu}$, ρ – средняя плотность, μ – динамическая вязкость, ω – круговая частота, Pr – число Прандтля, J_2, J_0 – функции Бесселя второго и нулевого порядков, γ – показатель адиабаты;

$$\phi = (\omega / c_s) \sqrt{J_0(\alpha) / J_2(\alpha)} \sqrt{\gamma / n},$$

где c_s – скорость звука.

Параметры отборника и физические величины, использованные в работе, приведены в таблице.

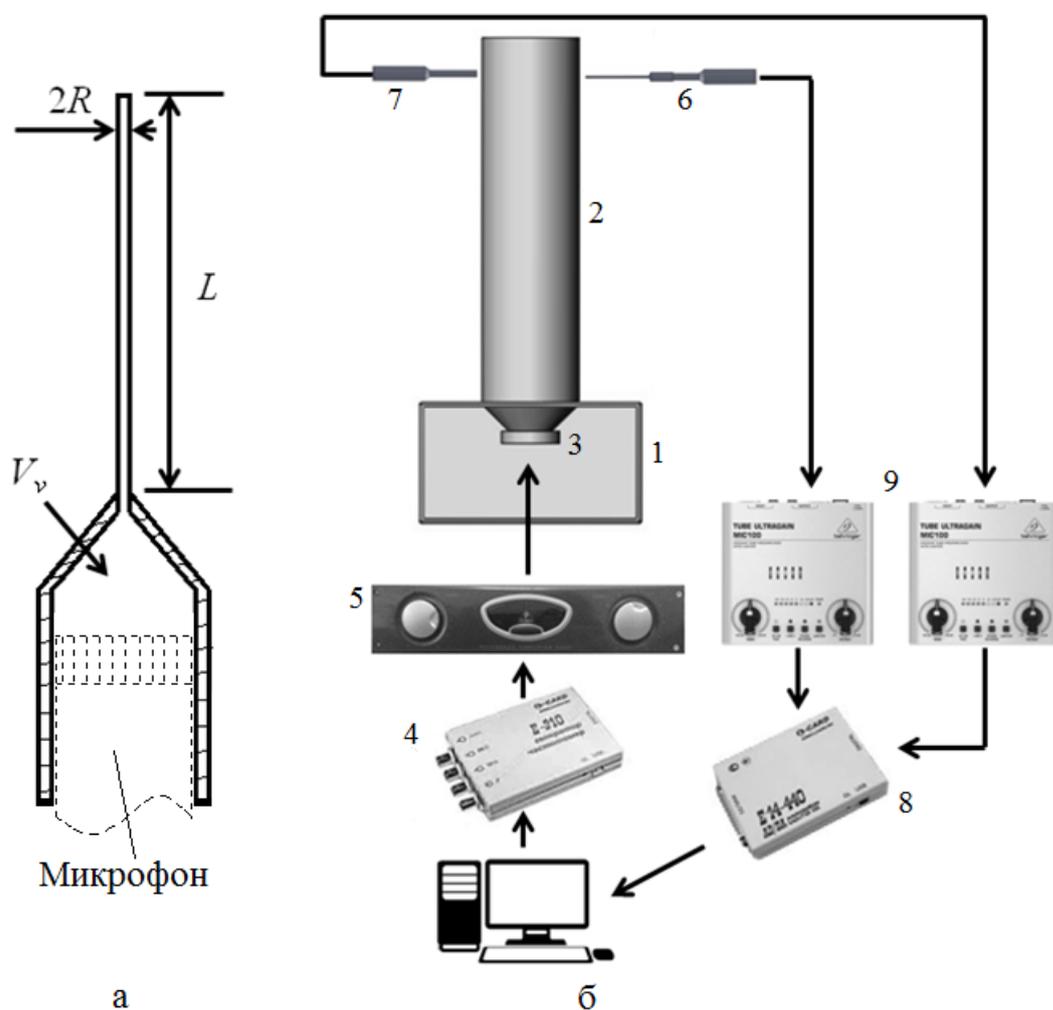


Рис. 1. Отборник давления (а), схема экспериментального стенда (б)

Параметры отборника и физические величины

R , м	L , м	μ , Па·с	ρ , кг/м ³	V_v , м ³	σ	k	γ	Pr	c_s , м/с
$4 \cdot 10^{-4}$	0,19	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,2	$4 \cdot 10^{-7}$	0	1	1,4	0,72	340

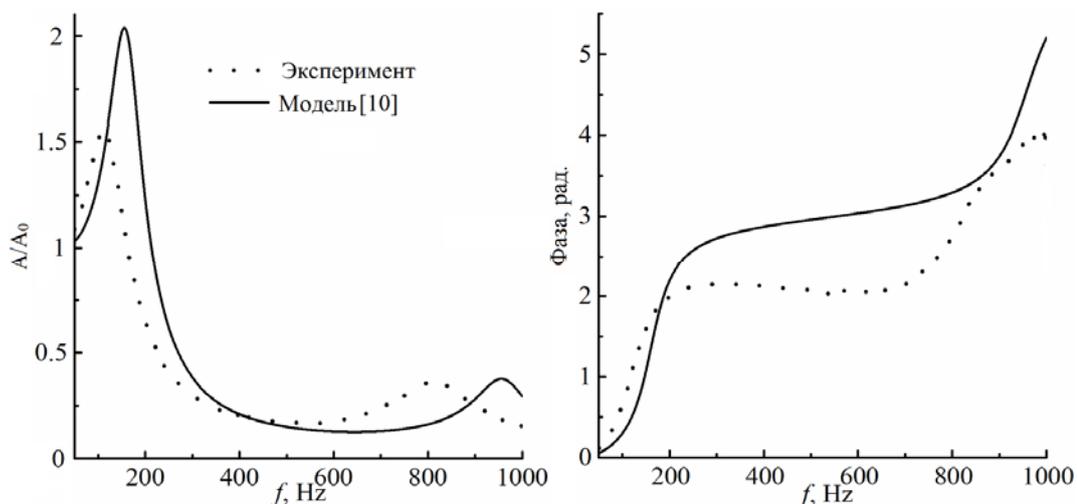


Рис. 2. Амплитудная (а) и фазовая (б) частотные характеристики

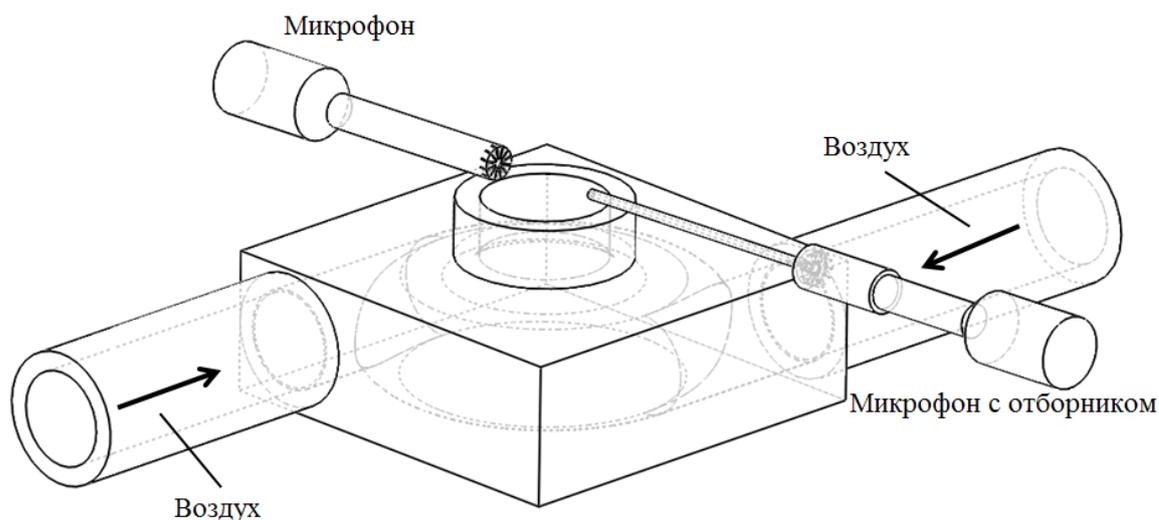


Рис. 3. Схема вихревой камеры

Сравнение экспериментальной и теоретической АФЧХ

На рис. 2 приведены экспериментальная и теоретическая АФЧХ, полученная по формуле (1). Можно видеть, что теоретические кривые качественно правильно воспроизводят характер изменения от частоты, но имеется заметное количественное несоответствие, в частности в положении и высоте пиков АЧХ. Первая гармоника наблю-

дается на 109 Гц у экспериментальной АЧХ и на 156 Гц у теоретической, разница между ними составляет 47 Гц. Вторые гармоники двух кривых расположены соответственно на 813 и 957 Гц, разница между ними оставляет 144 Гц. Амплитуды первой гармоники для экспериментальной и теоретической кривых равны соответственно 1,57 и 2,04. Амплитуды второй гармоники – 0,37 и 0,38.

Можно видеть, что в области частот выше 250 Гц присутствует резкое падение ам-

плитудной передаточной функции. Это накладывает ограничения на использование отборника с данными параметрами для исследования течений, где основная частота пульсаций давления выше 250 Гц. Отметим, что в модельном вихревом устройстве, для которого проектировался данный отборник, основная гармоника пульсаций потока составляет порядка 200 Гц. Поэтому, как будет показано ниже, тестируемый отборник давления показал вполне удовлетворительные результаты при регистрации пульсационных характеристик течения в этой установке.

Таким образом, теоретический расчет на основе модели Tijdeman дает зависимости, корректно описывающие на качественном уровне характерные особенности поведения амплитудной и частотной кривых. Поэтому теоретическая модель может использоваться при проектировании отборника, определения его оптимальных геометрических параметров для работы в заданном диапазоне частот и амплитуд. Отмеченное количественное отличие теоретической АФЧХ от экспериментальной может быть связано с тем, что теоретическая модель не учитывает точную геометрию внутреннего объема передатчика. Поэтому необходим дальнейший анализ факторов, наиболее сильно влияющих на поведение калибровочных кривых отборника, что позволит улучшить результаты теоретического расчета.

Реальное течение в модельной вихревой камере

Полученные передаточные характеристики были применены для восстановления истинного сигнала пульсаций давления, вызванных прецессией вихревого ядра (ПВЯ), в потоке на выходе из вихревой камеры (рис. 3). Детали геометрии завихрителя представлены в работе [7]. Измерения пульсаций давления были проведены микрофоном Behringer ECM 8000 и таким же микрофоном с акустическим отборником. Как показано на рис. 3, воздушный поток подавался в вихревую камеру по двум трубам. На выходе из сопла диаметром 40 мм создавался закрученный поток с параметром крутки 1,8 [7] и суммарным расходом 9 л/с, что соответствует числу Рейнольдса порядка $1,9 \cdot 10^4$. Характерной особенностью тече-

ния при данных условиях является распад закрученной струи с формированием центральной зоны возвратного течения и генерацией мощного ПВЯ на ее границе. Пульсации потока, вызванные ПВЯ, отчетливо проявляются в спектрах сигналов ЛДА и акустических датчиков в виде дискретного пика на частоте прецессии [7].

В текущих исследованиях измерительный микрофон и отборник располагались вплотную к соплу, заподлицо с его внутренней поверхностью, чтобы не возмущать течение. Для восстановления сигнала вычислялось Фурье-преобразование сигнала микрофона с отборником, затем амплитуда делилась на значение АЧХ для соответствующей частоты, а фаза корректировалась смещением на значение ФЧХ для той же частоты. Пример восстановленного таким образом сигнала с использованием экспериментальной АФЧХ приведен на рис. 4, а, где также показаны реальный сигнал (1), полученный контрольным микрофоном без насадка, и невосстановленный сигнал микрофона с отборником (3). В последнем случае можно видеть, что происходит существенное уменьшение амплитуды, наиболее выраженное для области высоких частот. В результате этого происходит практически полное подавление старших гармоник 436 и 652 Гц, хотя основная гармоника 220 Гц на частоте прецессии все же присутствует в спектре. Напротив, в спектре восстановленного сигнала (2) присутствуют все гармоники, совпадающие по амплитуде и частоте с пиками в спектре реального сигнала.

На рис. 4, б представлено сравнение восстановленного при помощи теоретической АФЧХ сигнала с реальным сигналом. Видно, что три первые гармоники у восстановленного сигнала совпадают по частоте с теми же гармониками реального сигнала. По амплитуде имеются некоторые расхождения, наиболее заметные в области высоких частот, что связано с отличием теоретической АФЧХ от непосредственно измеренной на калибровочном стенде экспериментальной характеристикой (см. рис. 2).

В целом можно отметить, что рассмотренная в данной работе методика определения передаточной характеристики акустического отборника на основе экспериментальной калибровки и теоретического расчета дает вполне удовлетворительные результаты, как было показано на основе восстановления

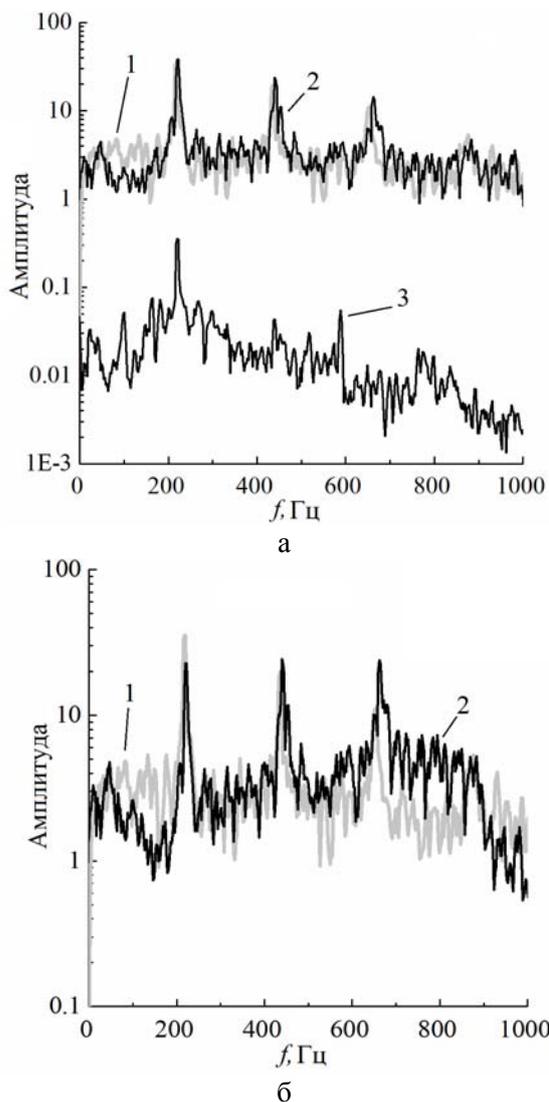


Рис. 4. Амплитудные спектры сигналов (а) и сравнение восстановленного при помощи теоретической АФЧХ сигнала с реальным сигналом (б)

сигнала пульсаций давления в вихревом нестационарном течении с ПВЯ.

Заключение

Проведено экспериментальное определение АФЧХ акустического отборника и выполнен расчет его теоретической АФЧХ на основе имеющейся в литературе аналитической модели. Теоретические амплитудная и фазовая характеристики на качественном уровне соответствуют экспериментальным кривым, хотя имеется заметное количественное расхождение. Экспериментальные и расчетные АФЧХ были использованы для процедуры восстановления истинного сигнала

ла пульсаций давления в потоке на выходе из модельной вихревой камеры. Восстановленные сигналы сравнивались с сигналом контрольного микрофона без акустического отборника.

Экспериментальная характеристика дает практически полное совпадение спектров восстановленного и контрольного сигналов по частоте и амплитуде не только основной гармоники пульсаций давления, но и старших гармоник.

Несмотря на достаточно сильное отличие теоретической АФЧХ от тестовой, определенной на калибровочном стенде, восстановленный на основе теоретической передаточной характеристики сигнал удовлетворительно соответствует истинному сигналу качественно и количественно, с наиболее заметными отличиями по амплитуде в области высоких частот.

В общем можно заключить, что аналитическая модель вполне пригодна для оценки передаточной характеристики отборника, выбора оптимальных геометрических параметров отборника для работы в заданном диапазоне частот и амплитуд, восстановления в первом приближении реальных пульсаций давления в локальных точках исследуемого течения.

Список литературы

1. *Bertrand C.* A microphone probe for noise measurements inside furnaces // *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1983. Vol. 16, № 4. С. 345.
2. *Chen T. Y. et al.* Flame radiation and acoustic intensity measurements in acoustically excited diffusion flames // *Journal of Propulsion and Power*. 1993. Vol. 9, № 2. P. 210–216.
3. *Moisy F., Petitjeans P.* Pressure measurements in a stretched vortex // *Vortex Structure and Dynamics*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2000. P. 252–262.
4. *Gerstoft P., Hansen S. O.* A new tubing system for the measurement of fluctuating pressures // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1987. Vol. 25, № 3. P. 335–354.
5. *Copeland A. B., Hill D.* Design of a Probe-Tube Adapter for Use with a 1-in. Condenser Microphone // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1970. Vol. 48, № 5A. P. 1036–1039.

6. *Leitao N.* Pressure Probe Design. Instituto Superior Technico, Universidade Technica de Lisboa, 2010.
7. *Litvinov I. V. et al.* Experimental study and analytical reconstruction of precessing vortex in a tangential swirler // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2013. Vol. 42. P. 251–264.
8. *Feigin J. A. et al.* Probe-tube microphone measures of ear-canal sound pressure levels in infants and children // *Ear and Hearing*. 1989. Vol. 10, № 4. P. 254–258.
9. *De Haan R. E.* Design of a probe microphone // *Applied Scientific Research*. 1970. Vol. 22, № 1. P. 306–316.
10. *Tijdeman H.* On the propagation of sound waves in cylindrical tubes // *Journal of Sound and Vibration*. 1975. Vol. 39, № 1. P. 1–33.
11. *Bergh H., Tijdeman H.* Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems. Nationaal Luchten Ruimtevaartlaboratorium. 1965. 51 p.

Материал поступил в редколлегию 23.06.2015

A. S. Mitryakov, I. V. Litvinov, S. I. Shtork

*Institute of Thermophysics, SB RAS
1 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

andrey.mitryakov@yandex.ru

ACQUIRING THE PULSATION CHARACTERISTICS OF AN UNSTEADY VORTEX FLOW WITH THE AID OF PRESSURE PROBES

The special probes utilization together with measuring microphones allows to hold local measurements of pressure pulsations and to deform a flow structure marginally. Knowledge about a transfer function of the probe is required for the original signal reconstruction. This article presents the experimental technique of the probe transfer function obtainment. The theoretical assessment of the transfer function was carried out, using the model presented in the literature. Also the original signal reconstruction of pressure pulsations was carried out at the exit of the vortex tangential chamber.

Keywords: pressure probes, amplitude and phase frequency response, signal reconstruction, vortex chamber.