

УДК 534.08

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ГАЗА В ТРУБАХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ КОРРЕЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

© 2021 г. А. Д. Мансфельд^а, Г. П. Волков^{а, *}, Р. В. Беляев^а, А. Г. Санин^а,
П. Р. Громов^а, Н. Е. Климкина^а

^аИПФ РАН, ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: volkov@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 17.03.2020 г.

После доработки 04.12.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Предложена методика измерения расхода газа, основанная на ультразвуковом зондировании турбулентного потока в трубе с последующей взаимно корреляционной обработкой сигналов, прошедших через поток в двух сечениях трубы. Показано, что информация о скорости вихрей выделяется из центра трубы, благодаря фокусировке ультразвука стенкой трубы. Измерены скорости движения вихрей с помощью ультразвукового расходомера и одновременно двух разнесенных термоанемометров. На основе корреляционных измерений времени задержки показано, что скорость движения вихрей меньше максимальной скорости потока в центре, измеренной с помощью трубки Пито–Прандтля. По данным скорости вихрей продемонстрирована возможность измерения объемного расхода газа.

Ключевые слова: течение газа в трубе, ультразвуковое зондирование потоков, взаимная корреляция, измерение расхода газа

DOI: 10.31857/S0320791921020040

ВВЕДЕНИЕ

Проблема измерения расхода газа в трубопроводах является весьма важной для целого ряда технологических и коммерческих приложений. Известно несколько реализаций вариантов ультразвуковых расходомеров, измеряющих расход газа при его течении в трубе [1–3]. Одним из методов измерения является корреляционный [4–6]. Достоинством корреляционного метода является то, что он позволяет производить измерения как с помощью датчиков, врезаемых в стенку трубы, так и, что важнее, с помощью накладных датчиков, установленных на внешнюю поверхность трубы. В основе работы корреляционного расходомера лежит метод зондирования поперек газового потока двумя ультразвуковыми пучками. Ультразвуковые сигналы, прошедшие через поток, флуктуируют по амплитуде и фазе. Определяется взаимно корреляционная функция (КФ) этих сигналов и измеряется задержка максимума КФ. По величине задержки вычисляется скорость переноса вихрей.

Ультразвуковой пучок, распространяясь поперек трубы, пересекает два пограничных пристеночных слоя и область в середине потока. Скорости движения вихрей в этих областях существенно различаются. Какие вихри вносят наибольший вклад в КФ, и где находятся эти вихри, заранее неизвестно.

При описании корреляционного метода измерения используется гипотеза о замороженной турбулентности (гипотеза Тейлора) (см., например, [1]). Однако есть ряд работ [7–10], в которых показано, что эта гипотеза справедлива не всегда. В монографии [7] рассмотрены подобные примеры. Например, в работе [8] показано, что скорость движения вихрей при обтекании пластины составляет 0.8 от средней скорости потока, а в работе [9] продемонстрировано отношение скорости вихрей к скорости потока в диапазоне 0.6–0.7 для течения за решеткой. Наконец, в статье [10] продемонстрировано снижение скорости вихрей в диапазоне от 0.6 до 0.8 относительно скорости потока в трубе в зависимости от частоты пульсаций скорости газа. К сожалению, подробности эксперимента не доступны.

Целью настоящей работы является внесение ясности в вопрос о динамике движения вихрей в потоке газа для использования корреляционного ультразвукового расходомера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Функциональная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Поток воздуха в трубе создавался вентилятором в режиме откачки. Использованы трубы с условными диаметрами Ду

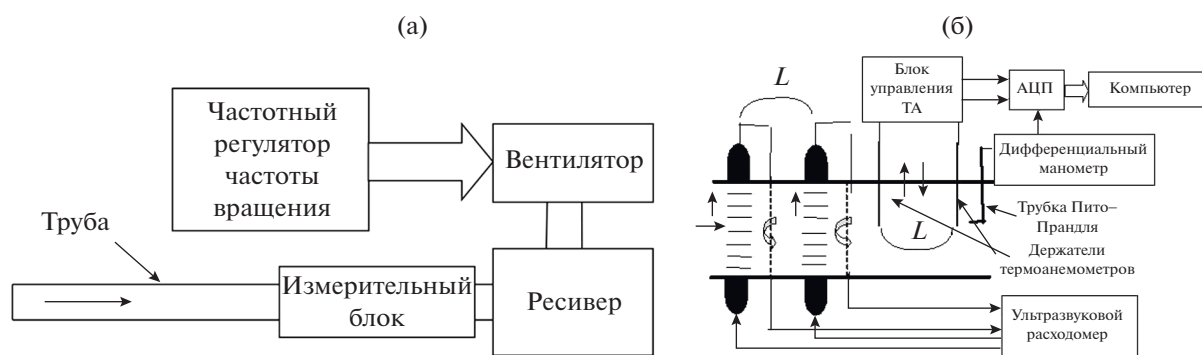


Рис. 1. Блок-схема (а) – экспериментальной установки и (б) – измерительного блока.

100, 150 и 200 мм. Длина начального участка трубы составляла соответственно 45, 40 и 30 Ду. В любом случае согласно [11] обеспечивались режимы развитой турбулентности. Для снижения пульсаций скорости потока, вызываемых лопатками вентилятора, между вентилятором и трубой был установлен ресивер. Основные измерения на трубе Ду 100 проводились ультразвуковым расходомером, созданным в ИПФ РАН [6]. Зондирование потока производилось внешними преобразователями, расположенными на поверхности трубы. Несущая частота излучения 530 кГц (длина волны в воздухе 0.6 мм). Режим зондирования – импульсный, позволивший существенно уменьшить уровень паразитных сигналов, распространяющихся по стенке трубы. Контрольные измерения производились с помощью двух термоанемометров (ТА) (пульсационные компоненты скорости), работавших в режиме постоянной температуры. Измерения скорости в центре на оси трубы производились с помощью трубки Пито–Прандтля, соединенной с дифференциальным манометром.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Пары ультразвуковых датчиков и нитей ТА располагались на расстоянии $L = 100$ мм. Датчики ТА синхронно перемещались радиально от стенки к центру трубы. Сигналы ТА оцифровывались и затем обрабатывались компьютером, в котором производилась фильтрация сигналов и строилась КФ пульсаций скорости газа. Положение пика определялось по измерению центра тяжести КФ. По смещению пика КФ относительно нуля измерялось время переноса вихрей и, по известному расстоянию между ультразвуковыми пучками и/или по расстоянию между нитями ТА, определялась скорость движения вихрей.

Эксперименты показали, что совпадение положения пиков КФ происходит тогда, когда чувствительные элементы ТА находятся на оси трубы (рис. 2).

При переносе датчиков ТА из центра в пограничный слой положения максимумов КФ не совпадают. Пик КФ ТА смещается в сторону меньшей скорости. Таким образом, показано, что ультразвуковой расходомер реагирует на вихри, которые переносятся течением именно на оси трубы.

В работе [5] предполагается, что наиболее крупные вихри переносятся в центре потока, вследствие чего модуляция ультразвукового пучка происходит именно при прохождении области в середине потока. Наши эксперименты показывают, что это не так. На рис. 3 показаны зависимости коэффициентов корреляции, измеренных с помощью двух ТА, разнесенных между собой вдоль диаметра трубы. Коэффициенты корреляции r определялись в соответствии с выражением:

$$r = \frac{K_{\max}(\tau)}{\sigma_1 \sigma_2},$$

где K_{\max} – максимальное значение величины пика КФ, τ – величина временного сдвига, σ_1 , σ_2 – среднеквадратичные значения сигналов в соответствующих каналах.

Наибольшее влияние на сигналы ультразвукового измерителя оказывают вихри, распространяющиеся вблизи оси трубы. Это происходит по следующей причине. Стенки круглой стальной трубы на границе с газом являются фокусирующей акустической линзой, концентрирующей ультразвуковой пучок практически на ось трубы. Получившая линза – цилиндрическая. Фокусное расстояние линзы F с радиусом кривизны R , согласно [12], равно:

$$F = \frac{R}{1 - \frac{c_{\text{в}}}{c_c}}$$

Из этого выражения (при подстановке скорости звука в воздухе $c_{\text{в}} = 320$ м/с и стали $c_c = 5600$ м/с, радиуса R , равного внутреннему радиусу трубы 50 мм) следует, что фокусное расстояние отлича-

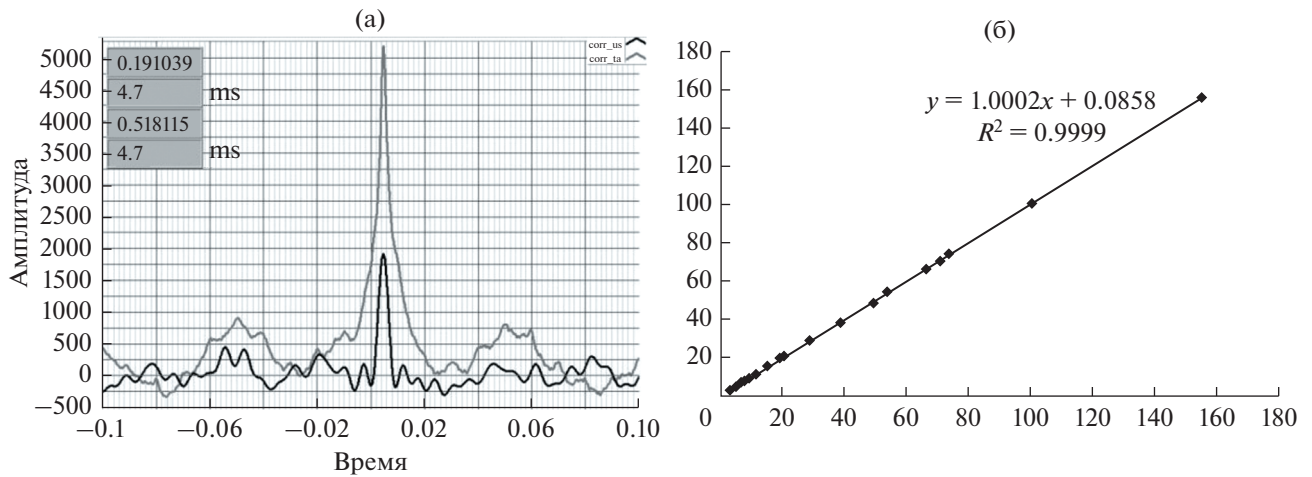


Рис. 2. (а) – КФ с выхода ультразвукового расходомера (черная линия) и с выходов ТА (серая линия). Нити ТА находятся на оси трубы. Задержки пиков КФ в обоих случаях 4.7 мс. (б) – Линейная зависимость временного сдвига пика КФ при разных скоростях потока с выхода ультразвукового корреляционного расходомера (по вертикали) от сдвига, измеренного с помощью двух ТА.

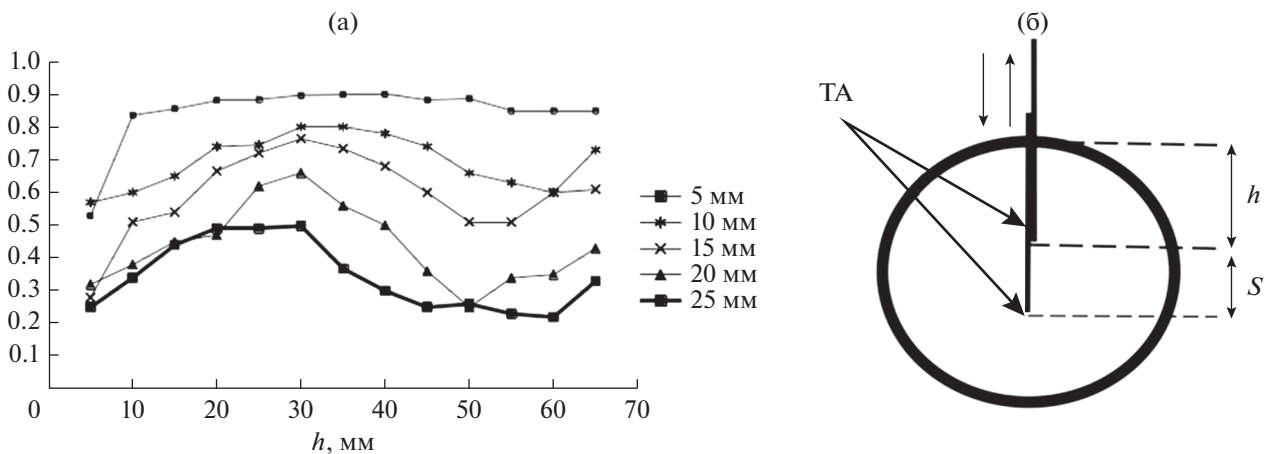


Рис. 3. Экспериментально измеренная зависимость коэффициента корреляции от расстояния h от стенки трубы при смещении вдоль радиуса для разных расстояний S между ТА.

ется от радиуса трубы на 5.7%. Фокусировка имеет место как для излучающего, так и для приемного преобразователей (см. рис. 4). Области фокусов приемного и излучающего преобразователей перекрываются. Диаметр фокальной области определяется следующим выражением [13]:

$$d = \frac{1.2\lambda F}{D},$$

где D – диаметр преобразователя. В нашем случае при $D = 40$ мм, $\lambda = 0.6$ мм и $F = 50$ мм диаметр фокальной области составляет $d = 0.9$ мм.

Естественно, влияние турбулентных пульсаций на амплитуду проходящего ультразвукового пучка будет наибольшим именно в области фокусных перетяжек. Рассмотрим следующий при-

мер. При скорости потока 10 м/с и уровне турбулентности 5%, типичном для развитой турбулентности на оси трубы (например, [14]), величина пульсационной компоненты составляет 0.5 м/с. Величины продольной и поперечной компонент скорости одного порядка. Тогда амплитуда колебаний пучка в области фокуса под действием флуктуаций скорости составляет 0.08 мм, что сравнимо с диаметром фокуса приемного преобразователя.

Как видно на рис. 3, коэффициент корреляции падает с увеличением расстояния между датчиками термоанемометра. Размеры вихрей составляют от четверти до половины диаметра трубы, а их центры находятся на расстоянии примерно четверти диаметра трубы от стенки, т.е. в центре по-

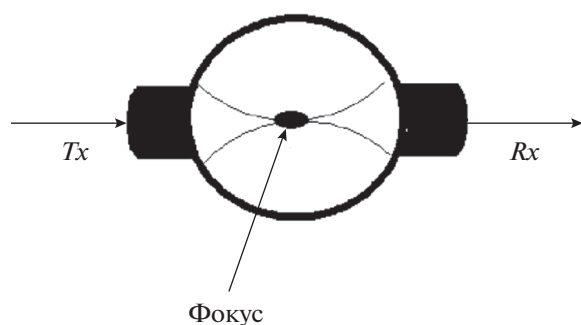


Рис. 4. Фокусировка ультразвуковых пучков металлической стенкой трубы.

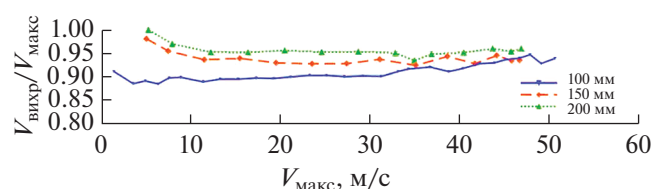


Рис. 5. Отношение скорости вихрей $V_{\text{вихр}}$ к максимальной скорости на оси трубы $V_{\text{макс}}$. Скорость вихрей составляет величину 0.88–0.94 от $V_{\text{макс}}$.

граничного слоя. При увеличении расстояния между датчиками ТА корреляционный коэффициент быстро уменьшается и на расстоянии нескольких сантиметров снижается до десятых долей. Более того, при размещении датчиков в диаметрально противоположных точках трубы коэффициент корреляции равен нулю. Это соответствует работам [15–17], в которых формирование кольцевых вихрей производится с помощью внешних воздействий. При больших числах Рейнольдса, в естественных условиях развитого турбулентного потока, из-за азимутальной неустойчивости происходит разрушение колец.

Для измерения расхода важно, насколько скорость движения вихрей соответствует средней скорости потока и, в частности, скорости потока в центре трубы. Для ответа на этот вопрос были произведены одновременные измерения с помощью трубки Пито-Прандтля, соединенной с дифференциальным манометром, и корреляционные измерения двумя разнесенными вдоль потока ТА. В обоих случаях измерения проводились в центре потока. Для сглаживания пульсаций сигналов, связанных с турбулентными пульсациями скорости, измеренные значения скорости усреднялись по времени. Одновременно проводилось построение взаимной КФ сигналов разнесенных ТА. По смещению пика КФ производилось измерение скорости переноса вихрей.

Результаты измерений, представленные на рис. 5, показывают меньшую скорость переноса

вихрей по сравнению со скоростью потока на оси трубы, где скорость газа максимальна, во всем диапазоне измерений от 1 до 45 м/с. Отношение скорости перемещения вихрей к скорости потока в центре трубы составляет $K_1(\text{Re}) = 0.88\text{--}0.94$ в диапазоне чисел Рейнольдса до 3×10^5 . Меньшая величина K_1 соответствует меньшей скорости потока. Скорости в области $\text{Re} < 4000$ соответствуют переходному режиму к турбулентности. Таким образом, при измерении корреляционным расходомером, который измеряет скорость вихрей на оси трубы, для измерения максимальной скорости необходимо учитывать коэффициент $K_1(\text{Re})$ следующим образом:

$$V_{\text{макс}} = \frac{V_{\text{вихр}}}{K_1(\text{Re})}. \quad (1)$$

По результатам измерений (рис. 5) величина коэффициента $K_1(\text{Re})$ зависит и от диаметра трубы. С увеличением диаметра трубы (в экспериментах использованы трубы диаметром 100, 150 и 200 мм) коэффициент также растет.

ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА

Измерив скорость движения вихрей на оси и зная, насколько она меньше скорости потока в центре трубы, можно оценить и объёмный расход потока как произведение средней скорости потока на площадь поперечного сечения трубы. Вычисление средней скорости по полученной скорости на оси трубы можно производить, используя известные полуэмпирические зависимости формы профиля скорости в зависимости от числа Рейнольдса. В интервале Re до 10^5 форма профиля скорости достаточно точно описывается выражением Блазиуса для гладких труб [11]:

$$\frac{V_{\text{макс}} - V_{\text{ср}}}{V^*} \approx 3.75, \quad (2)$$

где V^* – так называемая динамическая скорость [18]. По определению $V^* = (T/\rho)^{1/2}$, где T – касательное напряжение на стенке, ρ – плотность газа. Авторами проведены прямые измерения V^* в соответствии с выражением [18]:

$$V^* = \sqrt{\frac{R\Delta P}{L\rho}},$$

где ΔP – разность давления на длине $L = 130$ см, радиус трубы $R = 5$ см. Результаты измерения показали хорошее соответствие с выражением, приведенным в работе [19]:

$$V^* \approx \frac{0.2V_{\text{ср}}}{\text{Re}^{1/8}}. \quad (3)$$

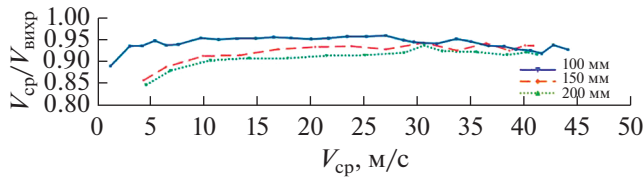


Рис. 6. Отношение средней скорости потока V_{cp} к скорости вихрей $V_{вихр}$ в трубах различного диаметра.

В таблице представлены экспериментальные данные и данные, полученные в соответствии с выражением (3).

Из формул (2) и (3) можно получить выражение для отношения максимальной скорости к средней скорости потока, обозначенное K_2 :

$$K_2 = \frac{V_{\max}}{V_{cp}} = 1 + \frac{0.75}{Re^{1/8}}$$

Как известно [14], отношение V_{\max}/V_{cp} находится в диапазоне 1.15–1.30. По нашим измерениям в диапазоне скоростей до 40 м/с $K_2 = 1.19$ –1.2. Средняя скорость потока связана со скоростью вихрей следующим образом:

$$V_{cp} = \frac{V_{вихр}}{K_1 K_2}$$

В диапазоне чисел Re от 6×10^3 до 3×10^5 произведение $K_1 K_2$ близко к единице. Систематическое смещение оценки средней скорости составляет $5.5 \pm 1.4\%$ и может быть учтено. Для проверки были проведены прямые измерения расхода газа с помощью счётчика газа СГ16-400, включенного ниже по течению потока относительно корреляционного расходомера. В диапазоне 2–14 м/с в трубе диаметром 100 мм в соответствии с метрологическими характеристиками точность измерений счетчика газа не хуже 0.63%. Расхождение с данными корреляционного расходомера не превышает 2%.

Эксперименты с трубами большего диаметра (150 и 200 мм) показали, что вихри движутся с большей скоростью относительно максимальной скорости течения на оси с коэффициентами 0.93 и 0.95 соответственно.

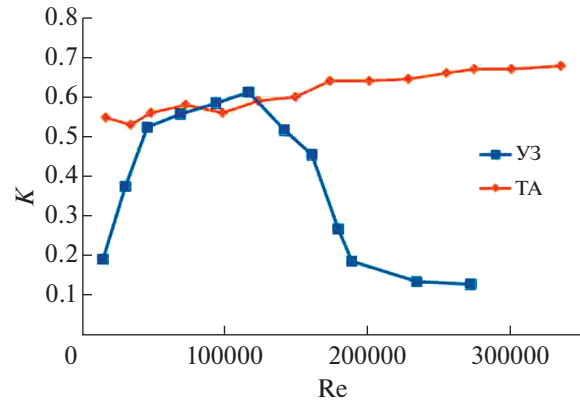


Рис. 7. Зависимость корреляционных коэффициентов сигналов ТА и ультразвуковых сигналов (УЗ) от числа Рейнольдса потока.

ДИАПАЗОН ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАСХОДОМЕРА

Как показывают наши измерения, диапазон измерения скорости корреляционным методом ограничен. На рис. 7 показаны зависимости коэффициентов корреляции от скорости потока, полученные с помощью ультразвукового зондирования в двух сечениях трубы на расстоянии одного диаметра трубы и двух ТА, расположенных вдоль потока на том же расстоянии между собой. На рис. 8 показаны КФ при разных скоростях потока.

Как видно на рис. 7, коэффициенты корреляции сигналов термоанемометров достаточно высокие (более 0.5) в широком диапазоне скоростей. В случае обработки сигналов ультразвукового расходомера коэффициенты корреляции заметно меньше как при малых скоростях потока, так и в случае больших скоростей, но по различным причинам.

При малой скорости потока (рис. 8а) малы и флуктуации скорости и, как следствие, малы флуктуации амплитуды сигнала. Например, величина пика КФ при скорости 0.3 м/с (рис. 8а) меньше, чем при скорости 32 м/с (рис. 8б) почти на два порядка. Соответственно, большее влияние оказывает шум приемного устройства.

Таблица 1. Сравнение расчетных значений $V_{теор}^*$ (в соответствии с выражением (3)) с полученными из измерений $V_{эксп}^*$

V , м/с	4.5	6.5	10.1	13.2	17	20.5	24	27	30.8	34	37
Re	3×10^4	4.3×10^4	6.7×10^4	8.8×10^4	1.13×10^5	1.37×10^5	1.6×10^5	1.8×10^5	2.05×10^5	2.26×10^5	2.47×10^5
$V_{теор}^*$, м/с	0.24	0.34	0.5	0.64	0.79	0.93	1.07	1.21	1.35	1.45	1.57
$V_{эксп}^*$, м/с	0.25	0.32	0.49	0.64	0.8	0.95	1.08	1.19	1.33	1.43	1.6

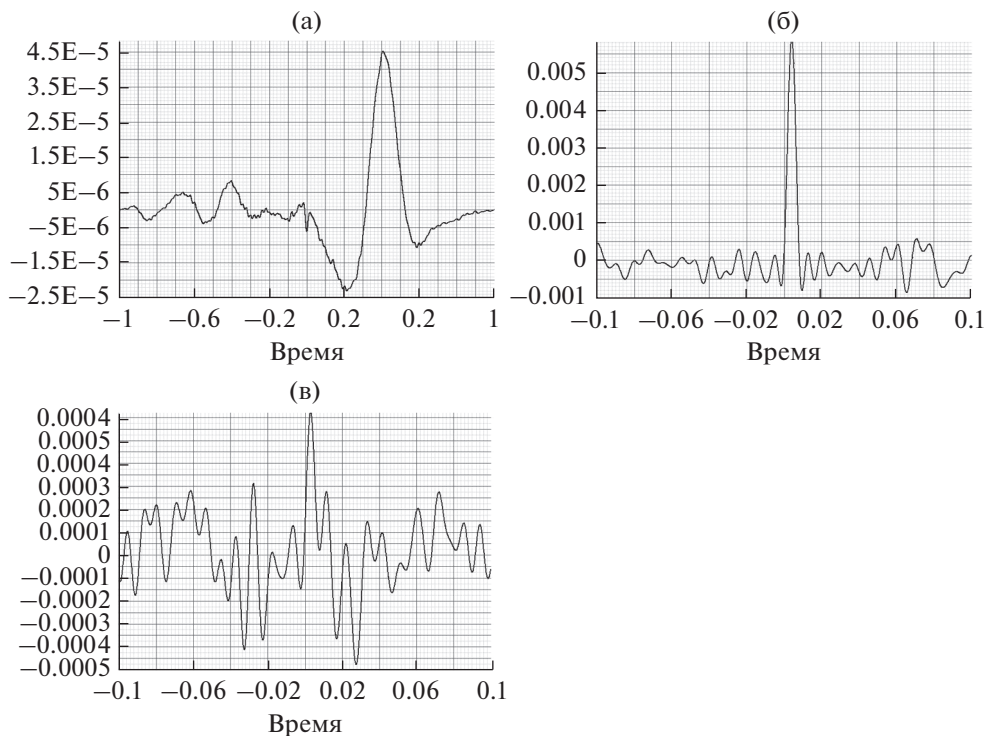


Рис. 8. Характерный вид КФ при скоростях потока: (а) – 0.3, (б) – 32, (в) – 42 м/с.

При дальнейшем увеличении скорости коэффициент корреляции снижается, и значительно вырастают боковые лепестки КФ, подавляя основной пик. Это объясняется тем, что устройство работает в импульсном режиме (в данном случае с периодом 1 мс). При больших скоростях потока время распространения вихрей между ультразвуковыми пучками становится сравнимым с периодом повторения зондирующих импульсов. В этом случае сигналы в каналах становятся слабо коррелированными (рис. 8в). В созданном устройстве увеличение частоты повторения технически было невозможно. Кроме того, увеличение частоты повторения импульсов и даже использование непрерывного режима приводит к увеличению амплитуд паразитных сигналов, распространяющихся по стенке трубы. В результате происходит ухудшение отношения сигнал/помеха.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Проведенные эксперименты показали следующее: ультразвуковой корреляционный расходомер при определенных условиях измеряет скорость вихрей, распространяющихся в центре трубы благодаря фокусирующему действию стенок трубы. Наиболее крупные вихри наблюдаются в середине пограничного слоя. Крупные вихри переносятся со скоростью меньшей, чем максимальная скорость потока, составляя от 90.5, 93 и

95% от ее значения в зависимости от диаметра трубы. Показано, что на основе установленной связи скорости перемещения крупных вихрей с максимальной скоростью и, соответственно, со средней скоростью потока возможно измерение объемного расхода газа в трубе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (тема № 0035-2019-0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lysak P., Jenkins J., Capone D., Brown W.* Analytical model on an ultrasonic correlation flow meter. Part 1 // Flow measurement and instrumentation. 2008. V. 19. P. 1–7.
2. *Lysak P., Jenkins J., Capone D., Brown W.* Analytical model on an ultrasonic correlation flow meter. Part 2 // Flow measurement and instrumentation. 2008. V. 19. P. 41–46.
3. *Coulthard J.* Ultrasonic cross-correlation flowmeters // Ultrasonics. 1973. V. 11(83). P. 8.
4. *Jacobson S.A., Denbigh P.N., Naude D.E.* A new method for the demodulation of ultrasonic signals for cross-correlation flowmeters // Ultrasonics. 1985. P. 128–132.
5. *Worch A.* A clamp-on ultrasonic cross correlation flow meter for one-phase flow // Meas. Sci. Technol. 1998. V. 9(4). P. 622–630.
6. *Мансфельд А.Д., Санин А.Г., Волков Г.П., Беляев П.В., Мороскин Д.В.* Ультразвуковые расходомеры газа с

- накладными датчиками // Ученые записки физического факультета МГУ. 2017. № 5. 1751201. С. 1–4.
7. *Fisher M.J.* P.O.A.L. Devis Correlation measurement in non-frozen pattern of turbulence // *J. Fluid Mech.* 1964. V. 18. P. 97–116.
 8. *Петровский В.С.* Гидродинамические проблемы турбулентного шума. Л.: Судостроение, 1966.
 9. *Willmarth W.W.* Wall pressure fluctuation in a turbulent boundary layer // *J. Acoust. Soc. Am.* 1956. V. 28. № 6. P. 1048.
 10. *Corcos G.M.* Resolution of pressure in turbulence // *J. Acoust. Soc. Am.* 1963. V. 35. № 2. P. 192–199.
 11. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя / Под ред. Лойцанского Л.Г. М.: Наука, 1974.
 12. *Каневский Н.* Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. М., 1977.
 13. *Ультразвук.* Маленькая энциклопедия / Под ред. Голяминой И.П. М., 1979.
 14. Введение в турбулентность и ее измерение / Пер. с англ. под ред. Глушко Г.С. М.: Мир, 1974.
 15. *Пимштейн В.Г.* О возникновении системы кольцевых вихрей в слое смешения осесимметричных турбулентных струй при акустическом воздействии // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 4. С. 489–492.
 16. *Копьев В.Ф., Храмов И.В., Зайцев М.Ю., Черенкова Е.С., Кустов О.Ю., Пальчиковский В.В.* Параметрическое исследование шума колец различного диаметра // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 4. С. 499–507.
 17. *Копьев В.Ф., Храмов И.В., Еришов В.В., Пальчиковский В.В.* О возможности использования единичной временной реализации для исследования шума вихревых колец // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 1. С. 49–58.
 18. *Лойцанский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
 19. *Сугак А.В., Сугак Е.В.* Расчет профиля скорости газа в турбулентном потоке // *Современные проблемы науки и образования.* 2014. № 3. С. 1–6.