

УДК 532.527.2+620.92

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В КОЛЬЦЕВОМ ПОТОКЕ СИСТЕМЫ КУЭТТА — ТЕЙЛORA С ПОМОЩЬЮ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОВ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

© В. Н. Мамонов, Н. Б. Миськив, А. Д. Назаров, А. Ф. Серов,
В. И. Терехов

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
E-mail: nikerkx@gmail.com*

Предложен метод и технические средства, позволяющие проводить оценку размеров вихревых структур, генерируемых в кольцевом пространстве системы Куэтта — Тейлора. Оценка размеров данных структур проводилась на основе анализа измеренных амплитудно-частотных спектров пульсаций радиальной составляющей динамического давления. Предложена простая модель генерации вихрей в кольцевом течении Куэтта — Тейлора под воздействием вращающейся поверхности внутреннего цилиндра. На базе этой модели и при использовании измеренных амплитудно-частотных спектров пульсационной составляющей радиального давления проведена оценка размеров генерируемых вихрей в кольцевом течении Куэтта — Тейлора. Показано, что в потоке присутствуют три типа вихрей: с диаметром, заметно меньшим ширины кольцевого зазора, диаметром, сопоставимым с шириной кольцевого зазора, и диаметром, заметно превышающим ширину кольцевого зазора системы, что приводит к их деформации (сплющиванию).

Ключевые слова: система Куэтта — Тейлора, кольцевой зазор, пульсации радиальной составляющей динамического давления, амплитудно-частотный спектр пульсаций давления, вихревая структура, размер вихрей.

DOI: 10.15372/AUT20250202

EDN: GDBISA

Введение. Важное место среди альтернативных источников энергии занимает ветровая энергетика, изучению которой посвящено большое число работ. В практическом плане подробно обсуждается возможность прямого преобразования механической энергии ветра в тепловую. В качестве подтверждения можно привести работу [1], в которой дан систематический обзор технологий прямого преобразования ветра в тепло. Одним из перспективных вариантов таких технологий является использование генераторов тепла, работа которых основана на применении кольцевых течений Куэтта — Тейлора [2–5]. Эффективность работы таких генераторов, в частности, связана со структурой потока в этих кольцевых течениях, исследованию которой уделяется большое внимание [6–10].

Цель предлагаемого исследования — разработка метода и технических средств, позволяющих проводить оценку размеров вихревых структур, возникающих в однокольцевом пространстве системы Куэтта — Тейлора. Система представляла собой два коаксиальных цилиндра, кольцевой зазор между которыми заполнен вязкой жидкостью. Внутренний цилиндр вращался с постоянной скоростью, а внешний был неподвижен. В [6] авторами предложен экспериментальный метод, основанный на анализе спектров пульсаций момента сопротивления вращению цилиндров такой системы и спектров пульсаций радиального динамического давления в кольцевом потоке системы, который может позволить оценивать структуру потока в кольцевом пространстве системы. Предварительные эксперименты показали, что метод регистрации и анализа спектров пульсаций момента сопротивления вращению и радиального динамического давления является доступным, недорогим и

весьма эффективным, позволяющим получать дополнительную информацию как для понимания гидродинамических процессов, происходящих в закрытых кольцевых системах, так и для практического контроля таких систем.

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в [5]. Режим течения в кольцевом зазоре системы Куэтта — Тейлора задавался за счёт изменения скорости вращения внутреннего цилиндра при постоянной вязкости рабочей жидкости в кольцевом зазоре. Измерительное оборудование экспериментальной установки дополнено системой измерения и амплитудно-частотного анализа спектров пульсаций момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра системы и спектров пульсаций радиальной составляющей динамического давления в кольцевом потоке.

Показано, что анализ этих спектров даёт представление о вихревой структуре исследуемого кольцевого потока.

Конструкция экспериментальной установки и методика измерений. На рис. 1, *a* приведена упрощённая схема [5] использованной в экспериментах модели, которая представляет собой систему Куэтта — Тейлора с одним кольцевым зазором шириной $\delta = 11,3$ мм между вращающимся внутренним цилиндром и наружным неподвижным цилиндрическим корпусом. Внутренний вращающийся цилиндр приводился во вращение электродвигателем с управлением оборотами через регулятор напряжения и контролировался системой регистрации частоты вращения. На рис. 1, *b* показана схема установки гидрофона, преобразователя давления и системы термостабилизации потока.

Для регистрации пульсаций момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра применялся цифровой тензометрический динамометр 11 (см. рис. 1, *a*), разрешающая способность которого находилась в пределах $M = (0,1–15)$ Н · м.

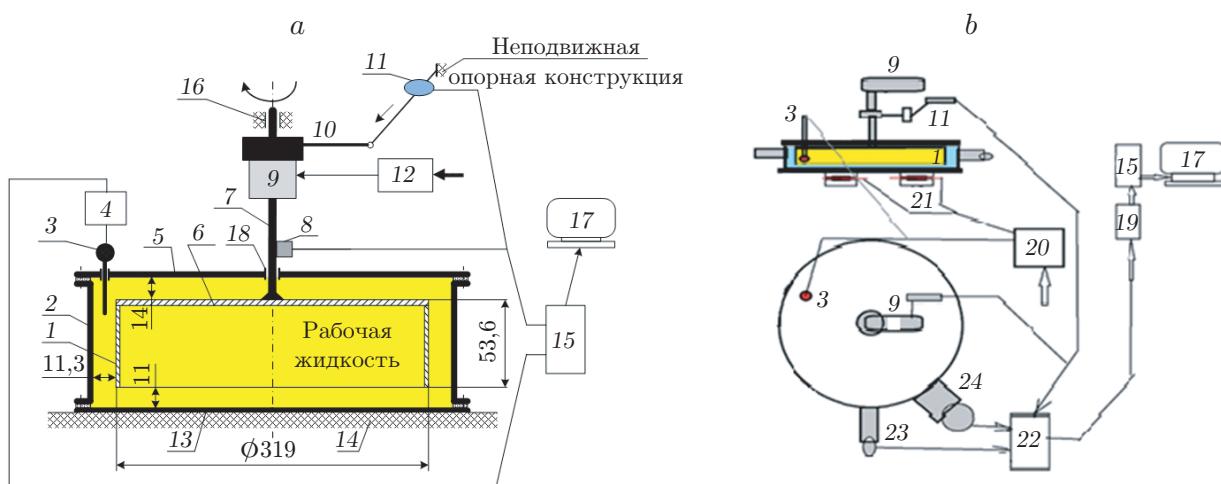


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — вращающийся цилиндр; 2 — боковая стенка неподвижного цилиндра; 3 — датчик температуры; 4 — система измерения температуры; 5 — верхняя крышка корпуса модели; 6 — диск для крепления вращающегося цилиндра модели; 7 — вал электропривода для вращения цилиндра модели; 8 — датчик угловой скорости вращения цилиндра; 9 — электропривод; 10 — рычаг для передачи момента силы сопротивления вращению цилиндра на динамометр; 11 — динамометр; 12 — блок управления скоростью вращения; 13 — нижняя крышка корпуса; 14 — теплоизоляция корпуса; 15 — микропроцессорный блок; 16 — подвеска электропривода; 17 — компьютер; 18 — опорный подшипник с сальником; 19 — анализатор спектра; 20, 21 — система стабилизации температуры кольцевого потока; 22 — блок нормирующих усилителей; 23 — гидрофон; 24 — преобразователь давления марки СДВ

Для регистрации радиального динамического давления на внутреннюю поверхность неподвижного цилиндра использовались два вида датчиков: гидрофон (ГФ) 23 собственной разработки и преобразователь избыточного давления (ПД) 24 марки СДВ (см. рис. 1, б). Гидрофон и преобразователь давления были закреплены на внешней стороне неподвижного цилиндра, и их чувствительные элементы сообщались с кольцевым потоком системы Куэтта — Тейлора через сквозные отверстия диаметром 5 мм в неподвижной стенке модели.

Амплитудно-частотные характеристики гидрофона и преобразователя давления различались. В гидрофоне в низкочастотной области (ниже 80 Гц) наблюдалась снижение чувствительности до 30 % и очень равномерная характеристика при более высоких частотах (вплоть до 250 Гц). В преобразователе давления СДВ отмечалась обратная картина: в низкочастотной области (от 20 до 90 Гц) характеристика равномерна, при более высоких частотах чувствительность резко падала. Регистрация спектров пульсаций проводилась компьютерной многоканальной автоматизированной системой с применением двухканального анализатора спектра PC-Lab2000SE.

В экспериментах использовались рабочая жидкость, представляющая собой водоглицериновый раствор с массовой концентрацией глицерина 30 %. Вязкость и плотность рабочей жидкости определялись её температурой, концентрацией воды и глицерина соответственно.

Программа проведения экспериментов и методика обработки амплитудно-частотных спектров пульсаций исследуемых сигналов. Все эксперименты, представленные в данной работе, проведены при условно-постоянном значении кинематической вязкости рабочей жидкости ($\nu \approx 14 \cdot 10^{-6}$ м²/с): система стабилизации температуры рабочей жидкости позволяла поддерживать величину кинематической вязкости от $15,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с до $13,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Проведена серия из трёх экспериментов, в которой единственным изменяемым параметром была угловая скорость вращения внутреннего цилиндра модели. В этих экспериментах частота вращения внутреннего цилиндра принимала значения 1,5; 3,8; 5,6 Гц.

В ходе проведения экспериментов синхронно регистрировались три вида амплитудно-частотных спектров: спектр МС пульсаций момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра с тензометрического динамометра, спектр ГФ пульсаций радиального давления с гидрофона и спектр ПД пульсаций радиального давления с преобразователя давления СДВ.

Анализатор спектра PC-Lab2000SE регистрировал амплитудно-частотные спектры в диапазоне частот от 0,2 до 395,7 Гц с шагом 1,2 Гц. Амплитуда гармоники на каждом значении частоты представлена в виде безразмерного отношения напряжения, соответствующего величине амплитуды этой гармоники, к 1 В.

Каждый такой спектр опосредованно представлял собой распределение по частотам энергии, содержащейся в анализируемом сигнале. Три вида спектров, которые исследовались в экспериментах, напрямую сравнивать было нельзя, поскольку электронные схемы, формирующие анализируемые сигналы, имели разную чувствительность по напряжению.

Для того чтобы такое сравнение стало возможным, проведена процедура нормировки всех зарегистрированных спектров, исходя из следующего: необходимо было провести такую процедуру, чтобы, не нарушая относительного распределения энергии анализируемого сигнала по частотам, получить одну и ту же сумму амплитуд сигналов (суммарную энергию) по всем частотам для всех исследуемых спектров.

Практически нормировка по каждому эксперименту (для каждой фиксированной частоты вращения внутреннего цилиндра) проводилась следующим образом:

- в качестве базового выбирался спектр МС;
- вычислялась сумма амплитуд гармоник каждого из трёх зарегистрированных спектров (МС ΣA_{MC} , ГФ $\Sigma A_{\text{ГФ}}$ и ПД $\Sigma A_{\text{ПД}}$);
- вычислялись нормирующие коэффициенты $K_{\text{ГФ}}$ и $K_{\text{ПД}}$ (отношения суммы амплитуд гармоник спектра МС к суммам амплитуд гармоник спектров ГФ ($\Sigma A_{\text{MC}}/\Sigma A_{\text{ГФ}}$) = $K_{\text{ГФ}}$ и ПД ($\Sigma A_{\text{MC}}/\Sigma A_{\text{ПД}}$) = $K_{\text{ПД}}$). Нормирующий коэффициент для спектра МС, соответственно, $\Sigma A_{\text{MC}}/\Sigma A_{\text{MC}} = K_{\text{MC}} = 1$;
- амплитуда каждой гармоники в спектрах ГФ и ПД умножалась на соответствующий нормирующий коэффициент, что приводило к тождествам $\Sigma(A_{\text{ГФ}} \cdot K_{\text{ГФ}}) = \Sigma A_{\text{MC}}$ и $\Sigma(A_{\text{ПД}} \cdot K_{\text{ПД}}) = \Sigma A_{\text{MC}}$.

Обсуждение полученных результатов. На рис. 2 и 3 представлены нормированные амплитудно-частотные спектры ГФ, ПД и МС в диапазонах частот (50–200) Гц (см. рис. 2) и (200–400) Гц (см. рис. 3). В каждой группе спектров содержатся три спектра для трёх значений частоты вращения f внутреннего цилиндра модели теплогенератора 1,5; 3,8; 5,6 Гц соответственно. Для каждого эксперимента число Рейнольдса определялось по вязкости рабочей жидкости, скорости вращения и радиусу вращающегося внутреннего цилиндра (см. рис. 2, 3).

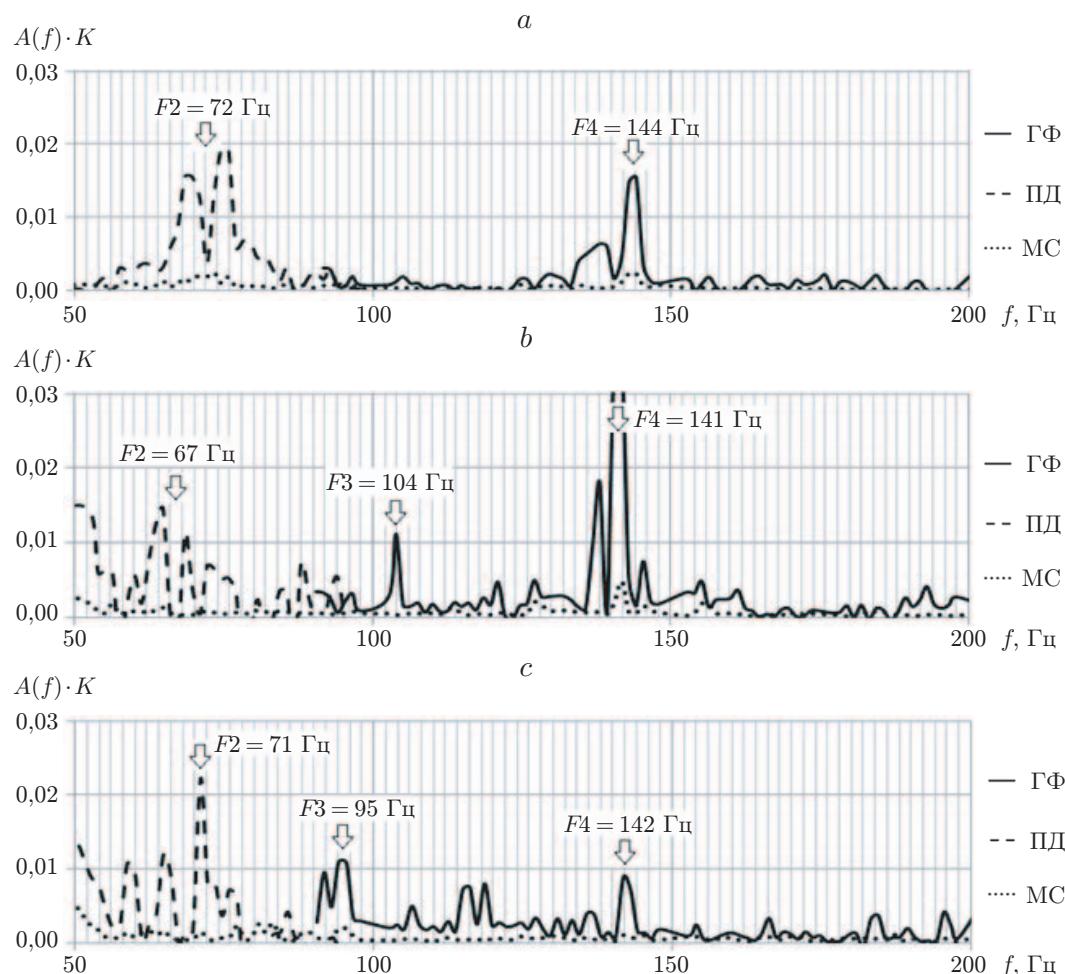


Рис. 2. Нормированные амплитудно-частотные спектры ГФ и ПД в диапазоне (50–200) Гц: *a* — $f = 1,5$ Гц, $Re = 1210$; *b* — $f = 3,8$ Гц, $Re = 3070$; *c* — $f = 5,6$ Гц, $Re = 4530$

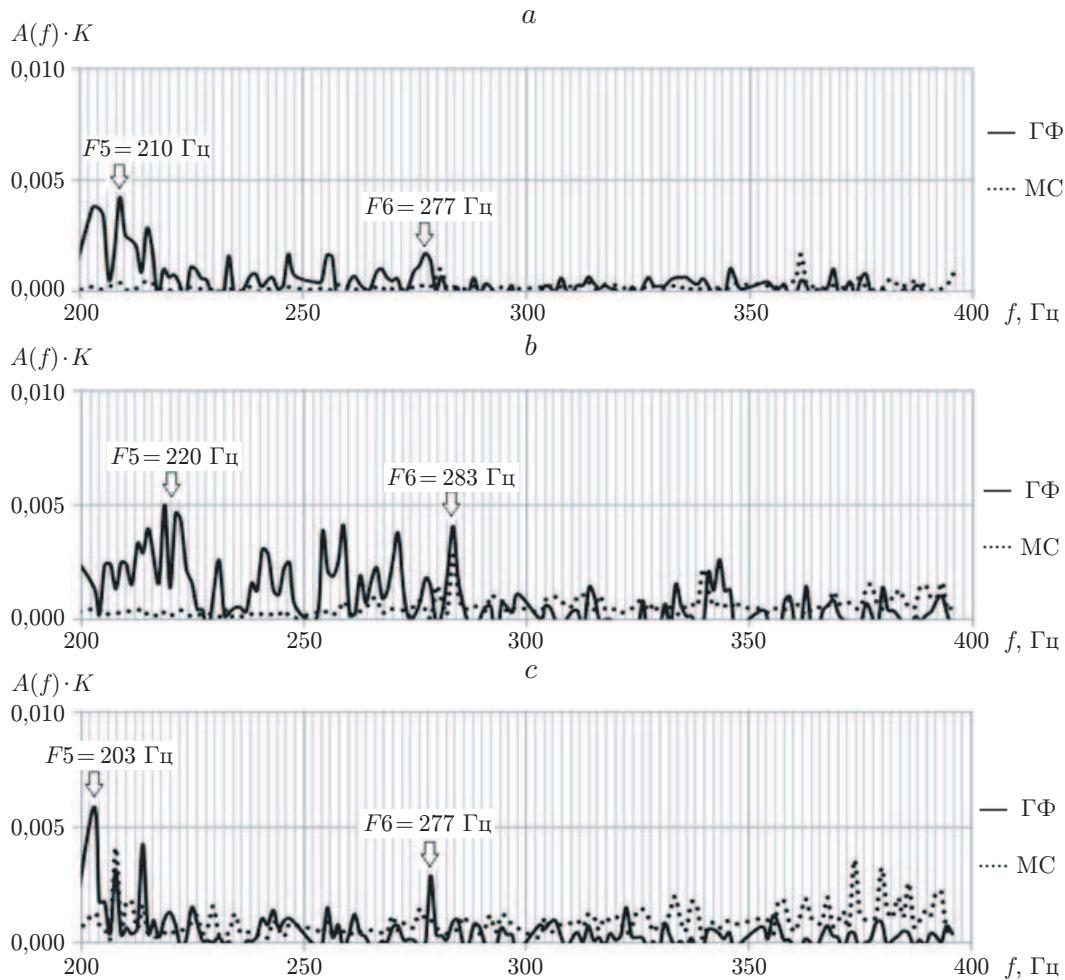


Рис. 3. Нормированные амплитудно-частотные спектры $\Gamma\Phi$ и MC в диапазоне (200–400) Гц: *a* — $f = 1,5$ Гц, $Re = 1210$; *b* — $f = 3,8$ Гц, $Re = 3070$; *c* — $f = 5,6$ Гц, $Re = 4530$

В экспериментах, результаты которых приведены на рис. 2 и 3, число Рейнольдса изменялось в диапазоне от 1210 до 4530. В случае между двумя коаксиальными цилиндрами, из которых внутренний вращается, а внешний остаётся неподвижен, согласно [11, 12], по величине числа Рейнольдса выделяют три типа течения: $Re < 280$ — ламинарное; $280 < Re < 2800$ — ламинарное с вихрями Тейлора; $Re > 2800$ — турбулентное. Таким образом, режимы течения в обсуждаемых экспериментах (см. рис. 2, 3) изменялись от ламинарного течения с вихрями Тейлора до турбулентного.

Анализ спектров в диапазоне частот (0–50) Гц (на рисунках не представлены). Для всех трёх спектров диапазона (0–50) Гц наблюдалась чёткая первая гармоника на частоте $F1$, точно совпадающей с частотой вращения f внутреннего цилиндра модели. На других частотах этого диапазона отмечались сигналы, представляющие комбинации более высоких гармоник частоты $F1$ с гармониками, связанными с отклонениями поверхности вращающегося цилиндра от идеальной окружности.

Из этого анализа следует вывод, что системы измерения частоты вращения внутреннего цилиндра и спектрального анализа пульсационных составляющих сигналов, соответствующих моменту сопротивления и сигналу с преобразователя давления, согласованы и функционировали нормально.

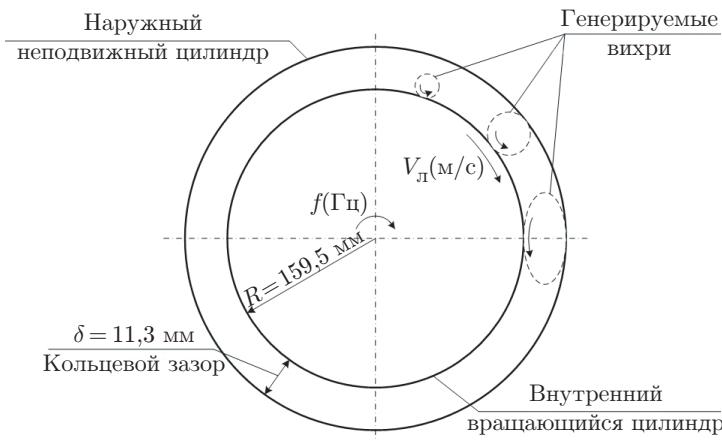


Рис. 4. Схема модели генерации вихрей в кольцевом течении Куэтта — Тейлора под воздействием вращающейся поверхности внутреннего цилиндра

Анализ спектров в диапазоне частот (50–400) Гц. Анализ этой части спектров составляет основное содержание представленного обсуждения. В ходе исследования сделана попытка оценить размер вихревых структур, которые генерируются в кольцевом потоке вращающейся поверхностью внутреннего цилиндра. Для проведения анализа принята упрощённая модель генерации вихрей в кольцевом течении Куэтта — Тейлора под воздействием вращающейся поверхности внутреннего цилиндра. Схема такой модели приведена на рис. 4. Вязкое взаимодействие рабочей жидкости в кольцевом зазоре с вращающейся поверхностью внутреннего цилиндра приводит к генерации вихрей трёх типов: диаметрами $d < \delta$, $d = \delta$ и $d > \delta$. В последнем случае происходит деформация вихря, т. е. он приобретает сплюснутую форму.

Исходя из такой модели, зная радиус вращающегося цилиндра R , частоту его вращения f и имея экспериментальные амплитудно-частотные спектры пульсационных составляющих величин, связанных со структурой потока в кольцевом зазоре, можно попытаться оценить диаметры генерируемых вихрей. Экспериментальные амплитудно-частотные спектры ГФ и ПД, представленные на рис. 2 и 3 в диапазоне частот (50–400) Гц, регистрируют радиальные (перпендикулярные неподвижной внешней стенке модели) пульсации давления. В рассматриваемом кольцевом потоке Куэтта — Тейлора такие пульсации отражают именно вихревую структуру потока, сформированную вращением поверхности внутреннего цилиндра. На рис. 2 и 3 отмечены частоты F_2, F_3, F_4, F_5, F_6 , соответствующие наиболее выраженным гармоникам в этих спектрах.

Оценка диаметров генерируемых вихрей производилась следующим образом. Частота генерируемого вихря F в соответствии с моделью, представленной на рис. 4, определяется как частное от деления линейной скорости вращающейся поверхности $V_L = 2\pi f R$ на длину окружности сгенерированного вихря $L = \pi d$, т. е. $F = 2\pi f R / \pi d = 2fR/d$. Следовательно, диаметр генерируемого вихря определяется формулой $d = 2fR/F$.

По такой методике обработаны спектры, приведённые на рис. 2 и 3. Результаты обработки представлены в таблице, из которой следует, что:

- для каждого из измеренных спектров в рассматриваемом диапазоне частот (50–400) Гц для трёх исследованных значений частоты вращения f внутреннего цилиндра системы Куэтта — Тейлора можно выделить три узких диапазона частот в окрестностях значений F : (67–73) Гц, (94–104) Гц, (139–144) Гц, (209–220) Гц и (265–277) Гц. При всех трёх значениях частоты f вращения внутреннего цилиндра в этих узких диапазонах частот F в спектрах присутствуют сигналы, соответствующие вихревым структурам в кольцевом потоке;

Таблица

Результаты оценки диаметров вихрей в кольцевом зазоре

f , Гц	R , м	V_{π} , м/с	Re	$F2$, Гц	$F3$, Гц	$F4$, Гц	$F5$, Гц	$F6$, Гц	$d(F2)$, мм	$d(F3)$, мм	$d(F4)$, мм	$d(F5)$, мм	$d(F6)$, мм
1,5	0,159	1,50	1210	72	—	144	210	277	6,6	—	3,3	2,3	1,7
3,8	0,159	3,81	3070	67	104	141	220	283	18,1	11,7	8,6	5,5	4,3
5,6	0,159	5,61	4530	71	95	142	203	277	25,2	18,8	12,6	8,8	6,4

— с увеличением частоты вращения f внутреннего цилиндра положение каждой из данных вихревых структур на шкале частоты F практически не изменяется, что соответствует тому, что с ростом частоты вращения внутреннего цилиндра f увеличивается размер (диаметр) соответствующей вихревой структуры, но не изменяется его частота вращения;

— если расчётный диаметр вихря превышает ширину кольцевого зазора δ между цилиндрами модели, это означает, что вихрь приобретает сплюснутую форму.

Заключение. На экспериментальной установке, представляющей собой макет кольцевой системы Куэтта — Тейлора, с помощью гидрофона и преобразователя давления СДВ измерены амплитудно-частотные спектры пульсационной составляющей радиального давления, действующей на наружную неподвижную стенку системы. Эксперименты проведены при постоянной вязкости рабочей жидкости, число Рейнольдса изменялось за счёт скорости вращения внутреннего цилиндра системы в диапазоне от 1210 до 4530. Этот диапазон соответствовал переходному ламинарному режиму с вихрями Тейлора и турбулентному режиму. Предложена простая модель генерации вихрей в кольцевом течении Куэтта — Тейлора под воздействием вращающейся поверхности внутреннего цилиндра. На основе этой модели и при использовании измеренных амплитудно-частотных спектров пульсационной составляющей радиального давления проведена оценка размеров генерируемых вихрей в кольцевом течении Куэтта — Тейлора. Показано, что в потоке присутствуют три типа вихрей: для первого типа характерны диаметры, заметно меньшие ширины кольцевого зазора системы, для второго — сопоставимые с шириной кольцевого зазора системы, и для третьего типа расчётный диаметр заметно превышает ширину кольцевого зазора системы. В последнем случае, согласно принятой модели генерации вихрей, можно говорить о некотором эффективном диаметре вихря, в реальности же, вероятно, мы имеем дело с деформацией таких вихрей, которые принимают сплюснутую форму (см. рис. 4).

Результаты такой оценки размеров вихрей могут быть подтверждены, например, с помощью оптической визуализации потока в аналогичных кольцевых каналах.

Финансирование. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-19-00358, <https://rscf.ru/project/24-19-00358/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neumeier M., Cöster M., Marques Pais R. A., Levedag S. State of the art of Windthermal Turbines: A Systematic Scoping Review of Direct Wind-to-Heat Conversion Technologies // Journ. Energy Resources Technol. 2022. **144**, Iss. 4. 040802.
2. Kim Y. J., Ryou Y. S., Yoon Y. H., Kang K. C. Windheat Heating System Development for Greenhouse Plant Bed Heating // Proc. of the ASABE Annual Int. Meeting. Sacramento, USA, 29 July – 1 Aug., 2001. 018017.
3. Serov A. F., Nazarov A. D., Mammonov V. N., Terekhov V. I. Experimental investigation of energy dissipation in the multi-cylinder Couette-Taylor system with independently rotating cylinders // Appl. Energy. 2019. **251**. 113362.

4. **Мамонов В. Н., Миськив Н. Б., Назаров А. Д. и др.** Генерация тепла в мультицилиндровой системе Куэтта—Тейлора // Теплофизика и аэромеханика. 2019. **26**, № 5. С. 729–739.
5. **Мамонов В. Н., Миськив Н. Б., Назаров А. Д. и др.** Влияние оребрения внутреннего вращающегося цилиндра в системе Куэтта-Тейлора на величину момента сопротивления // Теплофизика и аэромеханика. 2023. **30**, № 4. С. 675–686.
6. **Миськив Н. Б., Назаров А. Д., Серов А. Ф., Мамонов В. Н.** Автоматизированная система обеспечения исследования структуры течения в многокольцевом потоке Куэтта — Тейлора // Автометрия. 2020. **56**, № 3. С. 101–109. DOI: 10.15372/AUT20200311.
7. **Van Gils D. P. M., Bruggert G.-W., Lathrop D. P. et al.** The Twente turbulent Taylor-Couette (T3C) facility: Strongly turbulent (multiphase) flow between two independently rotating cylinders // Rev. Sci. Instrum. 2011. **82**, Iss. 2. 025105.
8. **Andereck C. D., Liu S. S., Swinney H. L.** Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders // Journ. Fluid Mechanics. 2006. **164**. P. 155–183.
9. **Van Ruymbeke B., Murai Y., Tasaka Y. et al.** Quantitative visualization of swirl and cloud bubbles in Taylor-Couette flow // Journ. Visualization. 2017. **20**, Iss. 2. P. 349–358.
10. **Tokgoz S., Elsinga G. E., Delfos R., Westerweel J.** Spatial resolution and dissipation rate estimation in Taylor–Couette flow for tomographic PIV // Experiments in Fluids. 2012. **53**. P. 561–583.
11. **Schlichting H., Gersten K.** Boundary-Layer Theory. Berlin—Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. 799 p.
12. **Taylor G. I.** Stability of a Viscous Liquid Contained between Two Rotating Cylinders // Philosophical Trans. Royal Soc. A: Math., Phys. and Eng. Sci. 1923. **223**. P. 289–343.

Поступила в редакцию 27.11.2024

После доработки 05.12.2024

Принята к публикации 17.03.2025
