УДК:532.527.2+620.92

Влияние оребрения внутреннего вращающегося цилиндра в системе Куэтта–Тейлора на величину момента сопротивления^{*}

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

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: mamonovvn@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования влияния продольных ребер на момент сопротивления вращению для течения Куэтта–Тейлора между двумя вращающимися цилиндрами. Тангенциальное число Рейнольдса в экспериментах изменялось как за счет вариации числа оборотов цилиндра, так и вязкости рабочей жидкости (водоглицериновый раствор). Экспериментами охвачены ламинарный, переходной и турбулентный режимы течения ($Re = 200 - 1 \cdot 10^5$). Показано, что ребра оказывают интенсифицирующее воздействие на момент сопротивления и диссипацию механической энергии только в области малых чисел Рейнольдса (Re < 2000) при ламинарном режиме и наличии в зазоре вихрей Тейлора. Эффект интенсификации может достигать двух и более раз, и это обусловлено интенсивной турбулизацией течения продольными ребрами. В турбулентном режиме течения интенсификации тепловыделения не наблюдается, что подтверждается имеющимися в литературе данными.

Ключевые слова: система Куэтта – Тейлора, вращающиеся цилиндры, диссипация энергии, момент сопротивления вращению, ребра.

Введение

В последние десятилетия растущее внимание к возобновляемым источникам энергии способствовало поиску все более эффективных систем генерации тепла. При этом значительная доля производства энергии приходится на ветроэнергетику [1-4]. В спектре сложных решаемых задач в области ветроэнергетики одно из ключевых мест занимает прямое преобразование механической энергии ветра в тепловую. С подробным обзором современного состояния проблемы конструирования подобных теплогенераторов можно ознакомиться в работе [5].

Определенными преимуществами обладают ветротеплогенераторы в виде соосных встречно вращающихся цилиндров, образующих систему коаксиальных зазоров Куэтта–Тейлора, в которых за счет диссипативных эффектов выделяется тепловая энергия [6–8]. Предложенные конструктивные решения были изучены экспериментально авторами

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (мегагрант № 075-15-2021-575).

[©] Мамонов В.Н., Миськив Н.Б., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И., 2023

настоящего исследования в серии работ [9–11] в широком диапазоне чисел Рейнольдса и при различных вязкостях рабочей жидкости. В этой серии работ были получены данные по интенсивности энерговыделения в генераторе Куэтта-Тейлора с независимо вращающимися цилиндрами применительно к решению проблемы прямой конверсии энергии ветра в теплоту. Здесь рассматривалась система генератора, образованная двумя вложенными друг в друга мультицилиндровыми роторами, образующими многокольцевую систему Куэтта-Тейлора, которая была заполнена вязкой рабочей жидкостью. При встречном вращении роторов за счет вязкой диссипации касательных напряжений в рабочей жидкости механическая энергия вращения превращалась в тепло. Исследовались момент сопротивления вращению роторов и выделяемая генератором мощность в широком диапазоне изменения относительной угловой скорости вращения роторов генератора и вязкости рабочей жидкости. Представление мультицилиндровой конструкции теплогенератора в виде одиночного эквивалентного кольцевого канала между двумя вращающимися коаксиальными цилиндрами позволило обобщить полученные экспериментальные данные по коэффициентам момента сопротивления вращению роторов и выделяемой удельной тепловой мощности теплогенератора в зависимости от числа Рейнольдса. Под удельной тепловой мощностью понималась выделяемая теплогенератором мощность, отнесенная к объему рабочей жидкости, находящейся в кольцевых зазорах теплогенератора. Удельная тепловая мощность подобных генераторов может достигать больших значений, и для изученных режимов она составляла величину порядка 1 MBт/м³.

Во всех проведенных авторами ранее экспериментах [9–11] вращающиеся цилиндры были гладкими. Современные тенденции развития энергетики основываются на интенсификации процессов теплопереноса. В этой связи представляет большой интерес изучение возможностей интенсификации диссипативных процессов за счет установки турбулизирующих элементов на поверхности цилиндров в виде двумерных или трехмерных преград, впадин, элементов шероховатости и т.д. В энергоустановках и теплообменной аппаратуре при отсутствии вращения такие приемы оказываются чрезвычайно эффективными и они широко используются в инженерных приложениях [12].

Влияние турбулизирующих элементов на течение и теплоперенос в зазоре между вращающимися цилиндрами изучено фрагментарно. Работы данного направления были инициированы преимущественно приложениями, связанными с решением проблем теплообмена в электрических машинах. Более подробную информацию о результатах экспериментальных и численных исследований гидродинамики и теплообмена в кольцевом зазоре между вращающимися цилиндрами можно найти в серии обзоров [13–15].

Подавляющее число экспериментов по изучению течения и теплообмена в кольцевом зазоре Куэтта – Тейлора проводилось при вращающемся внутреннем и неподвижном внешнем цилиндрах. Такая постановка задачи характерна для работы электрических машин. Кроме того, в этом случае устраняются сложности в организации эксперимента, связанные с вращением наружного цилиндра. Не останавливаясь на деталях имеющейся базы данных по вращению гладких цилиндров, подчеркнем только существование огромного числа режимов течения в кольцевом зазоре при вариации скоростей вращения обоих цилиндров [16].

Картина течения в существенной мере усложняется, если на поверхности цилиндров располагаются элементы шероховатости в виде определенной формы выступов (ребер) или впадин (каверн). Они могут иметь различную форму, размер и число по образующей цилиндра. При этом преграды либо впадины могут находиться как на каждой стенке кольцевого канала в отдельности, так и совместно на обоих цилиндрах. Если учитывать еще тот факт, что в качестве дополнительного параметра прибавляется скорость осевого протока жидкости через кольцевой зазор, то рассматриваемая задача становится необычайно сложной и многопараметрической.

Основное внимание в проведенных исследованиях уделялось случаю расположения элементов шероховатости вдоль образующей цилиндров. Так, в работе [17] продольные впадины располагались по всей длине наружного цилиндра, тогда как вращался внутренний. Отношение глубины впадины b к ее ширине c изменялось в широких пределах: b/c = 0-1,5. Авторы провели детальный параметрический анализ и показали, что оптимум достигается при b/c = 1,42 и при числе впадин n = 19.

Сравнение экспериментальных данных по эффективности использования двумерных препятствий (длинные ребра) и трехмерных преград (кубики аналогичной высоты), выполненное в работе [18], показало, что система трехмерных преград практически в 2 раза усиливает теплообмен по сравнению с плоскими ребрами. При этом было отмечено, что осевое течение в слабой степени сказывается на конвективном теплопереносе.

В серии работ [17, 19, 20] подробно изучалось влияние продольных канавок, расположенных на внешнем цилиндре, на перепад давления и теплопередачу. В качестве одного из факторов рассматривался угол наклона боковых стенок каверн, который изменялся в пределах $\beta = (70-135)^\circ$, так что каверны имели форму трапеции, либо раскрывающейся кверху, либо смыкающейся. Было показано, что наибольшие гидравлические потери наблюдаются у каверн с формой, близкой к прямоугольной — $\beta = 91^\circ$. Наиболее напряженными в тепловом отношении являются угловые области каверн. Качественно подобные результаты были получены авторами работы [21]. Определенное влияние может оказывать форма ребра. Так, по данным исследований [22] нанесение впадин на поверхности ребер может способствовать усилению теплопереноса. Все указанные экспериментальные результаты являются полезными в прикладном аспекте при разработке дизайна новых электрических двигателей и генераторов.

Сильное влияние на теплоотдачу в кольцевом зазоре оказывает установка спиральной ленты. Как показали экспериментальные данные [23], степень интенсификации теплообмена может быть увеличена в 7 раз по сравнению с гладким зазором. Примерно во столько же раз вырастут и гидравлические потери. При этом уменьшение шага ленты вызывает возрастание теплообмена и гидравлических потерь.

Важным аспектом для понимания физики процессов переноса является изучение тонкой структуры течения внутри кольцевого зазора. Дополнительную сложность при известных трудностях использования традиционных экспериментальных методов для исследования вращающихся потоков [24] при наличии преград представляют образующиеся отрывные зоны, создающие сложную иерархию разномасштабных вихрей, взаимодействующих с вихрями Тейлора [25, 26]. Полученные данные носят постановочный характер и не могут претендовать на полноту информации о структуре в кольцевых зазорах при наличии преград.

Измерение спектров пульсаций в полукольцевом течении Куэтта-Тейлора при наличии периодических выступов или впадин на поверхности вращающегося цилиндра проводилось в работе [27]. Термоанемометрические данные показали, что у гармоник более высокого порядка может быть бо́льшая амплитуда. При этом спектры пульсаций для выступов и впадин имеют схожий вид.

Следует отметить активное развитие численных методов исследования особенностей теплопереноса во вращающихся течениях при наличии локальных отрывных зон [20, 28], однако в настоящее время они не дают полной картины процесса с учетом волновой турбулентности, генерируемой преградами или полостями. Из приведенного краткого обзора можно сделать вывод, что имеющиеся данные по динамике течения и теплопереносу не дают полной картины процесса и практически не поддаются обобщению, прежде всего, из-за разнообразия форм и масштабов преград и их числа, а также отличий в форме зазора, чисел Рейнольдса и Тейлора. При этом полностью отсутствуют исследования по диссипации энергии в кольцевом зазоре с элементами шероховатости, что представляет большой практический интерес.

В настоящей работе продолжены экспериментальные исследования по влиянию параметров теплогенератора Куэтта – Тейлора на интенсивность выделения тепла [10, 11]. Эксперименты проводились на однокольцевой модели такого генератора тепла, представляющей собой систему из двух коаксиальных цилиндров, образующих одиночный кольцевой зазор, заполненный вязкой рабочей жидкостью. Наружный цилиндр модели неподвижен, а внутренний вращается с заданной скоростью. Выполнено сравнение развиваемой моделью теплогенератора мощности для двух случаев: когда поверхность вращающегося цилиндра является гладкой и когда на этой поверхности установлены плоские ребра, расположенные вдоль образующей цилиндра перпендикулярно его поверхности.

1. Конструкция модели теплогенератора и методики измерений

Для проведения исследований был модернизирован стенд, представляющий собой модель многоцилиндрового теплогенератора. Конструкция, методики измерений и оснащение этого стенда подробно описывались в работах [9–11]. Модернизация стенда заключалась в том, что многоцилиндровая система Куэтта – Тейлора теплогенератора была преобразована в систему с одиночным кольцевым зазором. Методики измерений и оснащение стенда остались без изменений [29].

На рис. 1 приведена схема конструкции однокольцевого генератора тепла Куэтта – Тейлора. Для упрощения рисунка на схеме не изображены детали и элементы, связанные с системой стабилизации температуры рабочей жидкости, с системой залива и слива рабочей жидкости, а также с методикой регистрации и обработки спектров пульсаций момента сопротивления вращению цилиндра, которая не использовалась в настоящей работе.

Вся конструкция модели выполнена из алюминиевого сплава и состоит из двух основных частей: неподвижного корпуса и вращающейся цилиндрической конструкции. Неподвижный корпус образован цилиндрической боковой стенкой 2, нижним основанием 13 и верхней крышкой 5. Внутренняя высота корпуса составляет 78,6 мм, внутренний диаметр — 341,6 мм.

Вращающаяся конструкция представляет собой цилиндрическое кольцо *1*, закрепленное на вращающемся диске *6*. Толщина кольца — 1,5 мм, высота кольца с учетом толщины диска — 53,6 мм, внешний диаметр кольца — 319 мм. Диск *6* приводится во вращение электродвигателем *9* через вал привода *7* с опорным подшипником *18*.

Внутренняя поверхность боковой стенки корпуса 2 и наружная поверхность цилиндрического кольца l образуют коаксиальный рабочий кольцевой зазор системы Куэтта – Тейлора модели генератора тепла. Ширина кольцевого зазора $\delta = 11,3$ мм, высота h = 53,6 мм, внутренний диаметр D = 319 мм. Таким образом, относительная ширина зазора между цилиндрами составляла $\delta/D = 0,035$, а относительная высота — $h/\delta = 4,75$. Весь внутренний объем конструкции заполнялся рабочей жидкостью.

В экспериментах использовались три вида рабочей жидкости: водоглицериновый раствор с массовой долей глицерина 90 %, водоглицериновый раствор с массовой долей глицерина 50 % и дистиллированная вода. Вязкость и плотность водоглицеринового



Рис. 1. Схема конструкции модели однокольцевого генератора тепла Куэтта – Тейлора. Размеры приведены в мм;

I — вращающийся цилиндр генератора, 2 — боковая стенка неподвижного цилиндра (корпуса) генератора,
3 — датчик температуры, 4 — электронный блок датчика температуры, 5 — верхняя крышка корпуса модели,
6 — диск для крепления вращающегося цилиндра генератора,

7 — вал электропривода для вращения цилиндра генератора, 8 — датчик угловой скорости вращения цилиндра, 9 — электродвигатель привода вращения цилиндра, 10 — рычаг длиной 115 мм для передачи момента силы сопротивления вращению цилиндра на динамометр, 11 — динамометр для измерения момента сопротивления вращению цилиндра, 12 — блок управления скоростью вращения электропривода,

13 — нижнее основание корпуса модели, 14 — опорная плита, 15 — микропроцессорный блок обработки данных, 16 — подвеска электропривода, 17 — компьютер, 18 — опорный подшипник с сальником.

раствора определялись его температурой и соотношением концентраций воды и глицерина, вязкость воды — ее температурой.

Зависимость вязкости и плотности водоглицеринового раствора от температуры определялась в специальной серии экспериментов. Измерения кинематической вязкости проводились с помощью стеклянного капиллярного вискозиметра с неопределенностью измерения $\pm 1,5$ %. Результаты измерений табулировались и использовались при обработке опытных данных. Вязкость и плотность воды определялись по табличным данным.

На рис. 2 приведена зависимость кинематической вязкости использованных в экспериментах водоглицериновых растворов от температуры. При проведении экспериментов осуществлялся непрерывный контроль температуры рабочей жидкости, что позволяло на любом этапе эксперимента определять ее вязкость.

Измерение момента сопротивления вращению цилиндра выполнялось по схеме ротационного вискозиметра следующим образом: статор электродвигателя 9 (см. рис. 1)



Рис. 2. Зависимость вязкости водоглицериновых растворов от температуры. Символы: *а* — водоглицериновый раствор 50 %, *b* — водоглицериновый раствор 90 %.

привода вращения цилиндра 1 был установлен соосно с валом вращения 7 цилиндра 1 на свободно вращающейся оси подвески 16. Момент силы сопротивления вращению цилиндра передавался через плечо рычага 10 длиной L = 115 мм на тензометрический датчик динамометра 11. Данные динамометра 11, датчика температуры 3 и датчика угловой скорости вращения цилиндра 8 поступали через микропроцессорный блок сбора и предварительной обработки данных 15 в компьютер 16 для окончательной обработки и хранения.

Статическая калибровка измерительного канала динамометрической системы регистрации момента силы сопротивления вращению цилиндра выполнялась с применением весового набора от 0 до 5 кг с приведенной погрешностью 0,1 %. Суммарная погрешность определения момента сопротивления вращению цилиндра с учетом всех источников погрешности рабочего измерительного канала динамометрической системы усилителя сигналов и цифрового осциллографа в статическом режиме составляла 2 %.

На рис. 3 приведена калибровочная характеристика канала для измерения момента силы сопротивления вращению цилиндра, где U— выходной сигнал системы измерения момента силы сопротивления вращению цилиндра.

Для проведения исследований были приготовлены два варианта конструкции модели: вариант с гладкой поверхностью вращающегося цилиндра и вариант с установкой вдоль его образующих по всей высоте цилиндра восьми ребер высотой 3 мм и шириной (по окружности цилиндра) 10 мм. Ребра располагались равномерно по окружности цилиндра через 45°. На рис. 4 приведен эскиз цилиндра с ребрами.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Были проведены четыре серии экспериментов. В первой серии измерялись моменты сопротивления вращению внутреннего цилиндра модели для случая, когда в качестве рабочей жидкости использовался водоглицериновый раствор с массовой концентрацией глицерина 90 % и частота вращения внутреннего цилиндра поддерживалась постоянной в диапазоне f = 6,0-7,0 Гц. Эксперименты проводились для гладкого вращающегося цилиндра и для цилиндра с ребрами при изменении кинематической вязкости рабочей жидкости в диапазоне $v = (22-91) \cdot 10^{-6}$ м²/с. Результаты экспериментов приведены на рис. 5*а*.



Рис. 3. Калибровочная характеристика измерительного канала.



Рис. 5. Результаты экспериментов по зависимости момента сопротивления вращению для гладкого цилиндра и цилиндра с ребрами от частоты вращения цилиндра и вязкости рабочей жидкости.

a: *f* = 6,0–7,0 Гц, *I*, 2 — водоглицериновый раствор 90 % при гладком цилиндре (*I*) и цилиндре с ребрами (2); *b*: *v* = (67–74)·10⁻⁶ м²/с, *I*, 2 — водоглицериновый раствор 90 % при гладком цилиндре (*I*) и цилиндре с ребрами (2); *c*: *f* = 6,0–6,7 Гц, *I* — водоглицериновый раствор 50 % при гладком цилиндре; *d*: *f* = 6,0–7,0 Гц, *I*, 2 — вода при гладком цилиндре (*I*) и цилиндре с ребрами (2).

Во второй серии экспериментов измерялись моменты сопротивления вращению внутреннего цилиндра модели для случая, когда в качестве рабочей жидкости также использовался водоглицериновый раствор с массовой концентрацией глицерина 90 %. Кинематическая вязкость рабочей жидкости в опытах с гладким вращающимся цилиндром поддерживалась постоянной в диапазоне $v = (79-88) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, а в опытах с вращающимся цилиндром с ребрами она поддерживалось постоянной в диапазоне $v = (67-74) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. В этой серии проводились эксперименты для гладкого вращающегося цилиндра и для цилиндра с ребрами при изменении частоты их вращения в диапазоне f = 2-7 Гц. Результаты экспериментов приведены на рис. 5*b*.

В третьей серии экспериментов измерялись моменты сопротивления вращению внутреннего цилиндра модели для случая, когда в качестве рабочей жидкости использовался водоглицериновый раствор с массовой концентрацией глицерина 50 % и частота вращения внутреннего цилиндра поддерживалась постоянной в диапазоне f = 6,0-6,4 Гц. В этой серии эксперименты проводились для гладкого вращающегося цилиндра при изменении кинематической вязкости рабочей жидкости в диапазоне $v = (2,4-4,8) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$ Результаты экспериментов приведены на рис. 5*c*.

В четвертой серии экспериментов измерялись моменты сопротивления вращению внутреннего цилиндра модели, когда в качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода и частота вращения внутреннего цилиндра поддерживалась постоянной в диапазоне f = 6,0-7,0 Гц. В этой серии были проведены эксперименты для гладкого вращающегося цилиндра и для цилиндра с ребрами при изменении кинематической вязкости рабочей жидкости в диапазоне $v = (0,65-0,95) \cdot 10^{-6}$ м²/с. Результаты экспериментов приведены на рис. 5*d*.

На рис. 6 результаты, изображенные на рис. 5, представлены в безразмерном виде как зависимость коэффициента сопротивления вращению внутреннего цилиндра модели $C_{\rm m}$ от числа Рейнольдса Re. Величины $C_{\rm m}$ и Re вычислялись следующим образом [30]:

$$\operatorname{Re} = R\delta\Omega/\nu, C_{\rm m} = M/((\pi/2)\rho\Omega^2 R^4 h),$$

где R = 0,16 м — радиус внутреннего вращающегося цилиндра модели; $\delta = 0,011$ м — ширина кольцевого зазора модели, $\Omega = 2\pi f$, рад/с — угловая скорость вращения внутреннего цилиндра модели, f, Гц — частота вращения внутреннего цилиндра, v, m^2/c — кинематическая вязкость рабочей жидкости, M, H·м — измеренный момент сопротивления вращению внутреннего цилиндра, ρ , кг/м³ — плотность рабочей жидкости, h, м — высота кольцевого зазора (вращающегося цилиндра).

Необходимо отметить обстоятельства, которые затрудняют трактовку представленных на рис. 6 результатов. В измеренный экспериментально момент сопротивления вращению *M*, кроме момента силы сопротивления, возникающего в результате процессов, происходящих в кольцевом зазоре модели (этот момент и является предметом исследования), входит некоторое количество «паразитных» моментов сопротивления. Эти моменты являются следствием процессов, связанных, например, с взаимодействием рабочей жидкости с внутренней поверхностью вращающегося цилиндра, с торцевыми конструкциями модели. Очевидно, что вклад этих «паразитных» моментов из-за малой величины отношения высоты вращающегося цилиндра к его диаметру в измеренный момент силы сопротивления вращению *M* значителен и удовлетворительная оценка величины этого вклада проблематична.

Как следует из рис. 6, заметное влияние ребер на коэффициент $C_{\rm m}$ наблюдается только в диапазоне чисел Рейнольдса Re < 1000 (для экспериментов с водоглицериновым раствором с концентрацией 90 %). При значениях чисел Рейнольдса Re \approx 3000 и более это влияние практически исчезает. В экспериментах с водой (Re > 70000) влияния ребер не наблюдается. По техническим причинам не удалось провести эксперименты для цилиндра с ребрами на водоглицериновом растворе концентрацией 50 %. Судя



Рис. 6. Зависимость коэффициента сопротивления вращению от числа Рейнольдса.

вода и гладкий цилиндр, 2 — вода и цилиндр с ребрами,
водоглицериновый раствор 50 % и гладкий цилиндр,
водоглицериновый раствор 90 % и гладкий цилиндр,
водоглицериновый раствор 90 % и цилиндр с ребрами.

по поведению экспериментальных данных, приведенных на рис. 6, влияние ребер в диапазоне чисел Рейнольдса 10000 < Re < 30000 отсутствует.

Для анализа результатов, полученных при работе с водоглицериновым раствором концентрацией 90 %, был выбран следующий алгоритм.

1. Представленные на рис. 6 экспериментальные результаты для гладкого вращающегося цилиндра модели и для цилиндра с ребрами были аппроксимированы степенными зависимостями.

2. С использованием этих аппроксимационных зависимостей в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса была найдена разность величин коэффициента сопротивления $\Delta C_{\rm m}$ для модели с ребрами на вращающемся цилиндре и для модели с гладкой поверхностью этого цилиндра. Данная разность (увеличение коэффициента сопротивления вращению внутреннего цилиндра за счет установки ребер) представляет собой именно следствие установки ребер на гладкой поверхности цилиндра.

3. Следующим шагом в анализе результатов было сопоставление полученного экспериментально увеличения коэффициента сопротивления вращению гладкого цилиндра за счет установки на его поверхности ребер с классическими экспериментальными данными по зависимости коэффициента сопротивления вращению для гладкого цилиндра, полученными Тейлором [31]. Экспериментальные данные Тейлора для гладкого цилиндра, в виде зависимости $C_m(цил. гл.)$ от числа Рейнольдса были использованы для оценки относительного влияния установки ребер на вращающемся цилиндре на коэффициент сопротивления вращению $C_m(цил. с ребр.)$. На рис. 7 показано в виде зависимости отношения $C_m(цил. с ребр.)$. На рис. 7 показано в виде зависимости отношения $C_m(цил. с ребр.) = C_m(цил. гл.) + \Delta C_m, C_m(цил. гл.) — экспериментальные данные Тейлора [31] для гладкого цилиндра, <math>\Delta C_m$ — увеличение коэффициента сопротивления вращению внутреннего цилиндра за счет установки ребер, определенное на основе экспериментальных данных, представленных на рис. 6.

Известно [30], что при течении вязкой жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами, из которых внутренний вращается, а внешний покоится, в зависимости от величины числа Рейнольдса могут реализовываться три типа течения:

— Re < 160 — ламинарное течение Куэтта;

— 160 < Re < 1530 — ламинарное течение с вихрями Тейлора;

— Re > 1530 — турбулентное течение.



Рис. 7. Влияние присутствия ребер на поверхности вращающегося цилиндра в системе Куэтта – Тейлора на коэффициент сопротивления вращению в зависимости от числа Рейнольдса.

В нашем случае из рис. 6 следует, что в экспериментах с гладким цилиндром, вращающимся в водоглицериновом растворе с концентрацией 90 %, до значений числа Рейнольдса Re ≈ 1500 должно иметь место ламинарное течение с вихрями Тейлора. Экспериментальные данные, приведенные в работе [16], подтверждают, что в этом диапазоне чисел Рейнольдса кольцевое течение Куэтта–Тейлора имеет сложную структуру, содержащую и крупные вихри (вихри Тейлора).

Заключение

Из приведенных выше материалов можно сделать следующие выводы.

1. Установка ребер на гладкой поверхности вращающегося цилиндра в системе Куэтта – Тейлора приводит к увеличению коэффициента сопротивления вращению цилиндра. В условиях проведенных экспериментов увеличение коэффициента сопротивления достигает 2,8 раза на нижней границе исследованного диапазона чисел Рейнольдса (Re = 300).

2. В области режимов течения (300 < Re < 3500), включающих в себя область ламинарного течения с вихрями Тейлора, с ростом числа Рейнольдса увеличение коэффициента сопротивления вращению цилиндра уменьшается по зависимости, близкой к степенной. При установлении развитого устойчивого турбулентного режима течения (Re > 3500) данный эффект исчезает.

3. Объяснить полученные результаты можно тем обстоятельством, что в области ламинарного течения с вихрями Тейлора установка ребер приводит к разрушению крупных вихревых структур (вихрей Тейлора) в кольцевом зазоре системы Куэтта – Тейлора и интенсивной турбулизации потока, что, в свою очередь, увеличивает момент сопротивления вращению цилиндра и, соответственно, коэффициент сопротивления вращению.

4. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что установка ребер или каких-либо других трехмерных конструктивных элементов, разрушающих крупные вихревые структуры в системе Куэтта–Тейлора и приводящих к искусственной турбулизации потока, к повышению коэффициента сопротивления C_m (увеличению мощности теплогенератора), имеет смысл только в конструкциях, в которых реализуются ламинарные или переходные режимы течения. При турбулентном режиме течения рабочей жидкости в кольцевых зазорах системы Куэтта–Тэйлора установка ребер не приведет к заметному увеличению коэффициента сопротивления C_m .

Изложенные выше выводы могут быть подтверждены, например, исследованием амплитудно-частотных спектров пульсаций момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра. Попытка такого спектрального анализа проводилась авторами в работе [32]. Подобные исследования могут позволить оценить степень воздействия ребер на разрушение структуры крупных вихрей в течении Куэтта – Тейлора.

Список литературы

- 1. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.
- 2. Безруких П.П. Ветроэнергетика: Справочное и методическое пособие. М.: Энергия, 2010. 320 с.
- 3. Сон Э.Е., Ганага С.В., Николаев В.Г., Кудряшов Ю.И. К выбору оптимальных конструктивных схем и параметров ветроэнергетических установок для российской Арктики // Известия РАН. Энергетика. 2020. № 3. С. 33–59.

- Shiva Prasad B.G. Energy efficiency, sources and sustainability // ASME J. Energy Resour. Technol. 2010. Vol. 132, No. 2. P. 020301-1–020301-2.
- Neumeier M., Cöster M., Adriano R., Pais M., Levedag S. State of the art of windthermal turbines: a systematic scoping review of direct wind-to-heat conversion technologies // J. Energy Resources Technology. 2022. Vol. 144. P. 040802-1–040802-15.
- 6. Пат. 2612237 РФ МПК⁵¹ F03D 9/22, F24J 3/00. Серов А.Ф., Мамонов В.Н., Терехов В.И., Назаров А.Д. / Оппозитный ветротеплогенератор; заявит. и патентообладатель ИТ СО РАН. № 2005150585; заявл. 25.11.2015; опубл. 03.03. 2017, Бюл. № 7.
- 7. Пат. 2371604 РФ, МПК⁵¹ F03D 9/02, F24J 3/00. Ветрова А.А., Бирюлин И.В., Школьник Б.И., Белая В.А., Нугманов М.Р. / Ветровой теплоэлектрический генератор; заявит. и патентообладатель АГУ. № 2008104963/06; заявл. 08.02.2008; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30.
- 8. Пат. RU2226620 РФ МПК⁵¹ F03D 9/00, F24C 9/00. Бирюлин И.В., Солод Н.П. / Ветровой теплоэлектрический генератор; завит. и патентообладатель Бирюлин И.Б., Солод Н.П.; № 2002113806/06; заявл. 27.95.2002; опубл. 10.04.2004, Бюл. № 32.
- 9. Мамонов В.Н., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Экспериментальное исследование тепловых процессов в мультикольцевой системе Куэтта со встречным вращением цилиндров // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 1. С. 145–148.
- Serov A.F., Nazarov A.D., Mamonov V.N., Terekhov V.I. Experimental investigation of energy dissipation in the multi-cylinder Couette-Taylor system with independently rotating cylinders // Applied Energy. 2019. Vol. 251. P. 113362-1–113362-8.
- 11. Мамонов В.Н., Миськив Н.Б., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Генерация тепла в мультицилиндровой системе Куэтта–Тейлора // Теплофизика и аэромеханика. 2019, Т. 26, № 5, С. 729–739.
- 12. Терехов В.И., Богатко Т.В., Дьяченко А.Ю., Смульский Я.И., Ярыгина Н.И. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках. Новосибирск: НГТУ, 2018. 247 с.
- Maron D.M., Cohen S. Hydrodynamics and heat/mass transfer near rotating surfaces // Advances in Heat Transfer. 1992. Vol. 21. P. 141–180.
- 14. Fénot M., Bertin Y., Dorignac E., Lalizel G. A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow // Intern. J. Thermal Sci. 2011. Vol. 50. P. 1138–1155.
- 15. Kreith F. Convection heat transfer in rotating systems // Advances in Heat Transfer. 1968. Vol. 5. P. 129–251.
- Andereck C.D., Liu S.S., Swinney H.L. Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders // J. of Fluid Mechanics. 1985. Vol. 164. P. 155–183.
- Nouri-Borujerdi A., Nakhchi M.E. Heat transfer enhancement in annular flow with outer grooved cylinder and rotating inner cylinder: review and experiments // Appl. Therm. Engng. 2017. Vol. 120. P. 257–268.
- Gilchrist S., Ching C.Y., Ewing D. Heat transfer enhancement in axial Taylor-Couette flow // Proc. of HT 2005 Summer Heat Transfer Conf. July 17-22, 2005, San Francisco, California, USA, HT 2005-72746. 7 p.
- Nouri-Borujerdi A., Nakhchi M.E., Nouri-Borujerdi A., Nakhchi M.E. Friction factor and Nusselt number in annular flows with smooth and slotted surfaceFriction factor and Nusselt number in annular flows with smooth and slotted surface // Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 55. P. 645–653.
- Nouri-Borujerdi A., Nakhchi M.E. Prediction of local shear stress and heat transfer between internal rotating cylinder and longitudinal cavities on stationary cylinder with various shapes // Intern. J. Thermal Sci. 2019. Vol. 138. P. 512–520.
- Lancial N., Torriano F., Beaubert F., Harmand S., Rolland G. Study of a Taylor–Couette–Poiseuille flow in an annular channel with a slotted rotor // Intern. J. Thermal Sci. 2017. Vol. 112. P. 92–103.
- 22. Jeng T.-M., Tzeng S.-C., Lin C.-H. Heat transfer enhancement of Taylor–Couettee–Poiseuille flow in an annulus by mounting longitudinal ribs on the rotating inner cylinder // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50, No. 1–2. P. 381–390.
- 23. Abou-Ziyan H.Z., Helali A.H.B., Selim M.Y. Enhancement of forced convection in wide cylindrical annular channel using rotating inner pipe with interrupted helical fins // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2016, Vol. 95. P. 996–1007.
- 24. Устименко Б.П. Процессы турбулентного переноса во вращающихся течениях. Алма-Ата: Наука, 1977. 228 с.
- Lee S.-H., Chung H.-T., Park C.-W., Kim H.-B. Experimental investigation of the effect of axial wall slits on Taylor –Couette flow // Fluid Dynamics Research. 2009. Vol. 41, No. 4. P. 045502-1–045502-12.
- 26. Sodjavi K., Ravelet F., Bakir F. Effects of axial rectangular groove on turbulent Taylor–Couette flow from analysis of experimental data // Exp. Therm. Fluid Sci. 2018. Vol. 97. P. 270–278.
- Pak A.Yu., Lebiga V.A., Zinovyev V.N., Mironov D.S. Investigation of Couette flow in a semicircular channel with irregularities of walls // AIP Conf. Proc. 2021. Vol. 2351. P. 040020-1–040020-5.

- Hayase T., Humphrey J.A.C., Greif R. Numerical calculation of convective heat transfer between rotating coaxial cylinders with periodically embedded cavities // J. Heat Transfer. 1992. Vol. 114, No. 3. P. 589–597.
- 29. 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. Т. 56, № 3. С. 101–109.
- 30. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя М.: Наука, 1969. 744 с.
- Taylor G.I. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders // Phil. Trans. 1923. Vol. 223. P. 289–343.
- 32. Серов А.Ф., Мамонов В.Н., Назаров А.Д. Энергетика пульсаций Куэтта-Тейлора в зазорах встречно вращающихся многоцилиндровых роторов // Учен. зап. Казанского ун-та. Сер.: Физ.-матем. науки. 2017, Т. 159, кн. 3. С. 364–373.

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2023 г., после доработки — 18 мая 2023 г., принята к публикации 16 июня 2023 г.