

УДК 543.318.3+621.18:662.9

ЭНЕРГЕТИКА ПУЛЬСАЦИЙ ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА – ТЕЙЛОРА В ЗАЗОРАХ ОППОЗИТНЫХ МНОГОЦИЛИНДРОВЫХ РОТОРОВ

А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов, А.Д. Назаров
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, 630090, Россия

Аннотация

Представлены результаты экспериментов по выделению тепловой энергии при вращении двух коаксиальных встречно вращающихся многощелевых «роторов», образующих систему цилиндрических кольцевых каналов, которые заполнены вязкой рабочей жидкостью. В такой системе кольцевых каналов реализуется течение Куэтта – Тейлора. Предлагаемая конструкция рассматривается как модель теплогенератора, приводом которого могут быть два оппозитных (вращающихся навстречу друг другу) ветровых двигателя. При работе устройства рабочая жидкость, нагреваясь в кольцевых каналах за счет больших сдвиговых напряжений, циркулирует в контуре, содержащем теплообменник для передачи тепла в аккумулятор тепловой энергии. Кинетическая энергия привода в таком теплогенераторе полностью преобразуется в тепловую энергию.

Экспериментально проведены прямые измерения момента силы сопротивления вращению «роторов», измерены энергетические спектры пульсаций этого момента, измерена тепловая мощность, выделяемая при работе устройства.

Эксперименты проведены при четырех значениях вязкости рабочей жидкости в диапазоне изменения угловой скорости вращения «роторов» $\Omega = (6-30)$ рад/с. Изучено влияние геометрических параметров такого теплогенератора на эффективность преобразования кинетической энергии механического привода в тепловую энергию. Проведен анализ полученных результатов. Показано, что предлагаемая конструкция теплогенератора позволяет создавать устройства с заданной мощностью для работы в диапазоне малых угловых скоростей вращения «роторов».

Ключевые слова: кольцевая система Куэтта – Тейлора, оппозитное вращение коаксиальных цилиндров, момент сопротивления вращению, энергетические спектры момента сопротивления вращению, теплогенератор, генерация тепловой энергии

Задачи гидродинамики и теплообмена течений жидкости или газа в кольцевых зазорах, образованных вращающимися цилиндрическими поверхностями, представляют большой практический интерес. Указанные течения (например, течение Куэтта – Тейлора) возникают в многих сложных и энергонапряженных технических устройствах. Одним из примеров таких устройств может служить электродвигатель. Характер течения воздушного потока в кольцевом зазоре между ротором и статором определяет режим охлаждения электродвигателя и его нормальную работу. В последнее время гидродинамике и тепломассообмену течений Куэтта – Тейлора (как при наличии, так и при отсутствии осевой составляющей скорости потока) исследователи уделяют пристальное внимание (см., например, [1, 2]). Основное направление этих работ – поиск режимов для осуществления эффективного охлаждения элементов конструкций технических устройств для обеспечения их нормальной работы.

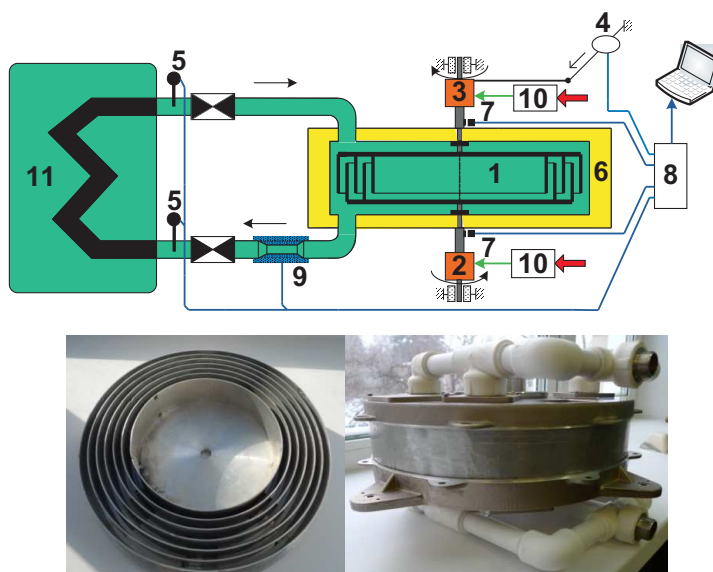


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, фотографии «ротора» и модуля теплогенератора в сборе: 1 – «роторы»; 2, 3 – электродвигатели привода; 4 – цифровой динамометр; 5 – датчики температуры; 6 – теплоизоляция; 7 – тахометр; 8 – микропроцессорный блок обработки данных; 9 – расходомер; 10 – блок управления оборотами электропривода; 11 – тепловой аккумулятор

Предмет исследований настоящей работы отличается от вышеизложенного. Речь идет о теплогенераторе, источником энергии для которого может служить, например, ветродвигатель. Эффективное соединение роторного ветродвигателя и теплогенератора позволяет реализовать генератор тепловой энергии на возобновляемом источнике энергии с высоким коэффициентом преобразования энергии ветра в тепловую энергию. Высокий КПД достигается за счет того, что имеется возможность всю энергию от источника кинетической энергии (ветродвигателя) преобразовать в тепловую энергию и накопить ее в объеме теплоносителя.

Настоящая работа является продолжением исследований, проведенных авторами в [3–5], где были представлены результаты экспериментов по измерению мощности, выделяемой теплогенератором, конструкция которого основана на циркуляции вязкой рабочей жидкости в системе цилиндрических кольцевых каналов, образованных вращающимися оппозитно (навстречу друг другу) «роторами». Результаты этих экспериментов демонстрируют принципиальную возможность практического использования подобных устройств.

В настоящей работе представлены результаты систематических экспериментов по прямому измерению момента силы сопротивления вращению «роторов» для различных значений скорости и вязкости рабочей жидкости, по измерению энергетических спектров пульсаций этого момента, по измерению тепловой мощности, выделяемой при работе теплогенератора. Эксперименты проведены при четырех значениях вязкости рабочей жидкости в диапазоне изменения угловой скорости вращения «роторов» $\Omega = (6-30)$ рад/с.

Эксперименты проводились на оборудовании, подробно описанном в [3]. Ниже для удобства изложения материала приведено краткое описание экспериментального оборудования.

На рис. 1 приведены схема экспериментальной установки, фотографии одного из «роторов» и модуля теплогенератора в сборе.

Вращающиеся навстречу друг другу «роторы» (1) образуют коаксиальную мультицилиндровую систему, состоящую из 13 кольцевых цилиндрических каналов: семь каналов шириной 2 мм и шесть каналов шириной 3.5 мм. Высота кольцевых зазоров 50 мм, диаметр колец от 203 до 315 мм.

Корпус двигателя нижнего привода (2) был заторможен, корпус двигателя верхнего привода (3) был закреплен на осевой свободной подвеске, которая через плечо $L = 0.195$ м передавала наведенный вращательный момент силы сопротивления вращению на тензометрический датчик цифрового динамометра (4). Приведенная схема позволяла измерять суммарный момент сопротивления вращению при независимом опозитном вращении двух многоцилиндровых «роторов» (1).

Эксперименты проведены при четырех значениях кинематической вязкости рабочей жидкости, заполняющей мультикольцевую систему: 0.9 сСт (вода при температуре 24 °С), 2.5, 5.2 и 30 сСт (водные растворы глицерина разной концентрации). Единица кинематической вязкости [сСт] выбрана для удобства представления графической информации ($1 \text{ сСт} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Измерения выполнялись при вращении «роторов» с равными угловыми скоростями, которые изменялись в диапазоне $\Omega = (6\text{--}30)$ рад/с. Регистрируемая мощность определялась на основании измеренного суммарного момента силы сопротивления вращению «роторов» по формуле

$$N = 2M\Omega, \quad (1)$$

где N [Вт] – мощность, M [Н·м] – измеренный суммарный момент сопротивления вращению, Ω [рад/с] – угловая скорость вращения «ротора». Так как мощность зависит от относительной скорости вращения «роторов», в формулу (1) введен коэффициент, равный 2.

Для того чтобы подтвердить, что вычисляемая по формуле (1) мощность совпадает с той тепловой мощностью, которая выделяется при работе теплогенератора, был проведен специальный эксперимент, когда одновременно с измерением момента сопротивления вращению «роторов» определялась выделяемая в теплогенераторе за известный промежуток времени тепловая энергия. Количество выделенной тепловой энергии определялось по изменению температуры теплоизолированной мультицилиндровой системы с учетом массы и теплоемкости рабочей жидкости и составляющих частей системы. По результатам этих измерений определялась тепловая мощность, выделяемая теплогенератором.

На рис. 2 приведено сравнение результатов измерения мощности, выделяемой теплогенератором: по результатам измерения момента сопротивления вращению «роторов» и по тепловым измерениям. Измерения проведены при вязкости рабочей жидкости 30 сСт.

Результаты измерений мощности двумя независимыми методами совпадают с хорошей степенью точности, что говорит о надежности метода измерения выделяемой теплогенератором мощности по измеренному моменту сопротивления вращению «роторов».

На рис. 3 приведена измеренная с помощью динамометра зависимость момента сопротивления опозитному вращению «роторов» от угловой скорости вращения «роторов» Ω для четырех значений вязкости рабочей жидкости. Из рисунка видно, что для рабочей жидкости с высокой вязкостью ($\nu = 30$ сСт) зависимость момента сопротивления от угловой скорости вращения роторов заметно отличается от аналогичных зависимостей для существенно менее вязких рабочих жидкостей. При вязкости 30 сСт эта зависимость близка к линейной, в то время как для малых вязкостей наблюдается степенная зависимость с показателем степени больше 1, но меньше 2. Согласно [6], такое различие объясняется различными режимами течения рабочей жидкости в кольцевых зазорах теплогенератора (режим, близкий

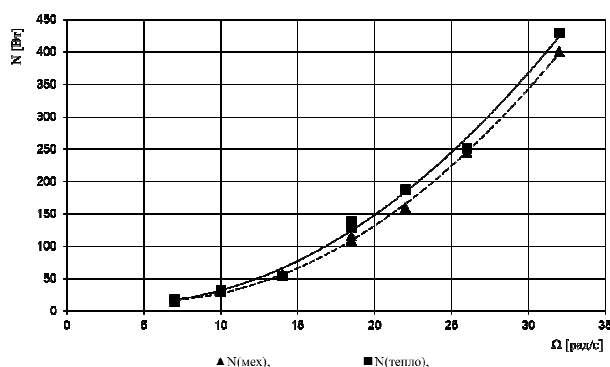


Рис. 2. Сравнение мощности, выделяемой теплогенератором: по результатам измерения момента сопротивления вращению «роторов» (▲) и по тепловым измерениям (■)

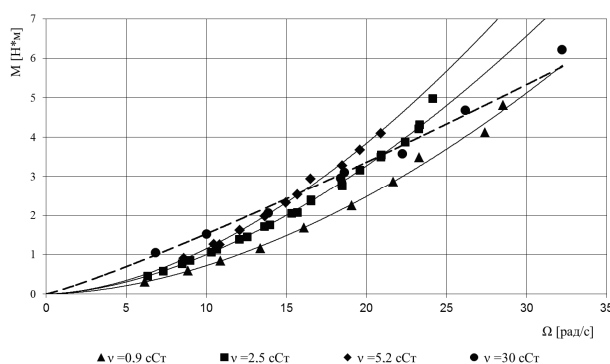


Рис. 3. Зависимость момента сопротивления оппозитному вращению от угловой скорости вращения «роторов» для четырех значений вязкости рабочей жидкости

к ламинарному при высокой вязкости рабочей жидкости, и режимы с комбинациями волновых и вихревых структур для жидкостей с малой вязкостью).

На рис. 4 приведена зависимость удельной тепловой мощности, выделяемой теплогенератором, от угловой скорости вращения «роторов» для четырех значений вязкости рабочей жидкости. Тепловая мощность вычислялась по формуле (1) на основании экспериментальных данных, приведенных на рис. 2. Удельная мощность определена как выделяемая теплогенератором мощность N , отнесенная к объему рабочей жидкости V , находящейся в кольцевых зазорах теплогенератора: $N_{уд} = N/V$ [кВт/м³].

С увеличением угловой скорости удельная мощность возрастает в квадратичной зависимости. При вязкости рабочей жидкости 1–30 сСт и при относительной скорости вращения «роторов» с частотой 4–5 Гц теплогенератор предлагаемой конструкции может достигать значимой для практического использования мощности 150–250 кВт/м³.

В работе [6] авторы систематически исследовали особенности гидродинамики течения в круговой системе Куэтта–Тейлора с двумя независимо вращающимися цилиндрами, образующими узкий одиночный коаксиальный зазор, заполненный рабочей жидкостью. Исследовалось поведение рабочей жидкости в зазоре в обширной области изменения независимых параметров, обеспечивающих весь диапазон режимов течения жидкости от ламинарного до развитого турбулентного. На основе проведенных исследований авторы [6] представили подробную карту режимов

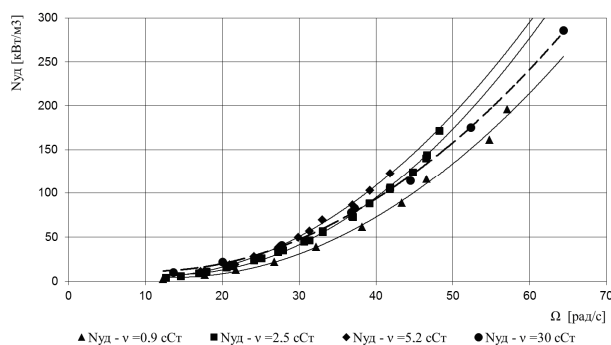


Рис. 4. Зависимость удельной мощности, выделяемой теплогенератором, от угловой скорости вращения «роторов» для четырех значений вязкости рабочей жидкости

течения в кольцевом зазоре вращающихся относительно друг друга цилиндров. Наблюдаемые состояния включали: вихри Тейлора, волнистые вихри, модулированные волнистые вихри, вихри с волнистыми границами оттока, вихри с волнистыми границами притока, вихри с плоскими границами и внутренними волнами (закрутки), ламинарные спирали, взаимопроникающие спирали, волны на взаимопроникающих спиралях, спиральную турбулентность, поток с прерывистыми турбулентными пятнами, турбулентные вихри Тейлора, турбулентный поток без каких-либо крупных особенностей, а также различные комбинации этих потоков. Некоторые из этих состояний потока не были описаны ранее. Данные состояния потока устойчивы к малым возмущениям, а границы перехода между состояниями воспроизводимы. Примененный авторами [6] оптический метод регистрации распределения полимерных хлопьев в водной суспензии позволил описать поведение и энергетические спектры сложных структурных образований, возникающих в кольцевом зазоре в широком диапазоне изменения параметров течения.

Многоцилиндровая система, исследованная в настоящей работе, имеет много общего с круговой системой Куэтта–Тэйлора, исследованной в [6]. Но она является более сложной по конструкции и методам, которые можно использовать для ее исследования. В частности, невозможно использовать оптический метод для исследования структуры течения в коаксиальных зазорах.

Для исследования структуры течения была использована методика анализа энергетических спектров момента силы сопротивления вращению «роторов» теплогенератора. Анализ проводился с помощью анализатора спектра PC-Lab2000SE. Анализировался непосредственно сигнал с цифрового оригинального тензометрического динамометра (4) (см. рис. 1), который в области частот $df_1 = (0-75)$ Гц имеет слабо спадающую амплитудно-частотную характеристику ($\sim 10\%$). Были выполнены статическая и динамическая калибровки динамометра, тестовые измерения наведенных паразитных шумовых моментов и пульсаций моментов сопротивления потока для двух противоположных скоростей вращения.

На рис. 5 приведены результаты анализа таких спектров для вязкости рабочей жидкости 2.5 сСт в диапазоне частот 0–395 Гц при противоположном вращении «роторов» с угловыми скоростями $\Omega = 12.1$ рад/с (нижняя кривая) и $\Omega = 25.5$ рад/с (верхняя кривая).

Анализ спектров момента сопротивления вращению выполнялся для усредненных спектров при генерации максимальной тепловой мощности $N = 180$ Вт. Для каждого значения угловой скорости усредненный спектр получался усреднением десяти спектров, зарегистрированных с интервалом 10 с. На рис. 5 приведены эти

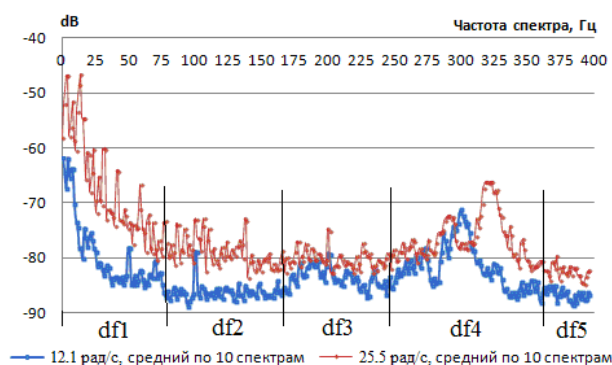


Рис. 5. Усредненные спектры момента сопротивления вращению при оппозитном режиме вращения «роторов» для двух угловых скоростей вращения

Табл. 1

Вклад отдельных гармоник в выделенных поддиапазонах частот (см. рис. 5) в суммарный момент сопротивления вращению

Полоса частот, Гц		Вклад гармоник, % $\Omega = 25.5$ рад/с	Вклад гармоник, % $\Omega = 12.1$ рад/с
df1	0.3–75	95.3	68.8
df3	165–240	0.5	5.8
df4	240–360	3.0	20.5
Шумы, Гц			
df2	75–165	1.0	3.8
df5	360–395	0.1	1.3

усредненные спектры, разбитые по частоте на пять поддиапазонов.

В табл. 1 на основе анализа спектров (рис. 5) приведены данные по вкладу отдельных гармоник вихревых структур в суммарный момент сопротивления вращению для выделенных поддиапазонов частот. Из таблицы следует, что основной вклад в суммарный момент дают гармоники в низкочастотном диапазоне. С ростом угловой скорости этот вклад увеличивается и занимает более широкий диапазон.

На рис. 6 приведены данные о распределении вклада отдельных гармоник в низкочастотной (0–75 Гц) и высокочастотной областях спектра (165–355 Гц) в суммарный момент сопротивления вращению.

Максимальные пиковые значения отдельных гармоник для угловой скорости вращения $\Omega = 25.5$ рад/с в низкочастотной области (рис. 6, а, пики 1, 3) в 80 раз больше значений отдельных гармоник в высокочастотной области (рис. 6, б, пик 9).

Иначе складывается распределение пиковых значений отдельных гармоник для угловой скорости вращения $\Omega = 12.1$ рад/с: в низкочастотной области (рис. 6, а, пики 5, 6) только в 10 раз больше значений отдельных гармоник в высокочастотной области (рис. 6, б, пики 7, 8).

В табл. 2 приведены данные об азимутальных волновых числах вихревых образований ($m = f_{\text{гармоники}}/f_{\text{вращения}}$), представленных как отдельные гармоники на рис. 6. Полученные данные указывают на то, что азимутальный размер вихревых образований в основном меньше окружности щели ротора и слабо зависит от скорости вращения.

Для получения более подробных данных об изменении физических размеров вихревых образований в зависимости от частоты вращения «роторов» и вязко-

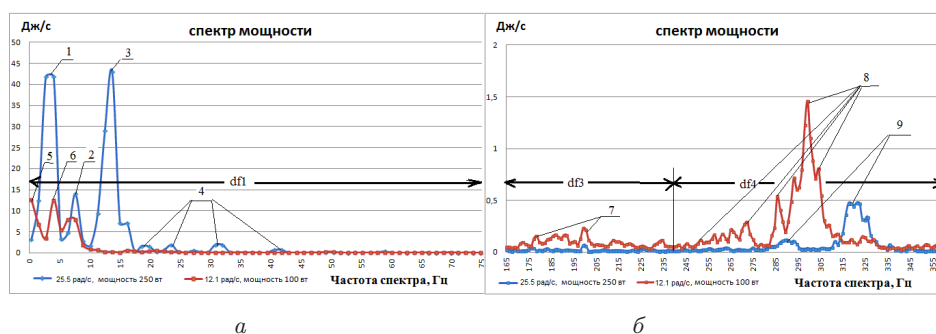


Рис. 6. Детализация спектров момента сопротивления вращению при оппозитном режиме вращения «роторов» для двух угловых скоростей вращения в низкочастотном (а) и высокочастотном поддиапазонах (б)

Табл. 2

Азимутальные волновые числа вихревых образований ($m = f_{\text{гармоники}}/f_{\text{вращения}}$)

Частота гармоник (Гц) при $\Omega = 25.1$ рад/с	Частота гармоник (Гц) при $\Omega = 12.5$ рад/с	Азимутальное волновое число m вихревых образований при $\Omega = 25.1$ рад/с	Азимутальное волновое число m вихревых образований при $\Omega = 12.5$ рад/с
1.5		0.4	
2.7		0.7	
4.0		1.0	
7.6		1.9	
11.3		2.8	
12.5		3.1	
13.7		3.4	
15.0		3.7	
	0.3		0.15
	1.5		0.7
	4.0		2.0
	6.4		3.2
	7.6		3.8

сти рабочей жидкости необходимо выполнить исследования этих зависимостей при сканировании с шагом $d\Omega = 1$ рад/с в рабочей области частот от относительной угловой скорости $\Omega = (10-60)$ рад/с.

Результаты выполненных исследований могут служить полезным руководством для будущих теоретических и экспериментальных исследований при решении актуальных задач при разработке сложных систем для генерации тепловой энергии.

Как было указано выше, большой практический интерес представляют исследования, связанные с состоянием потока, когда цилиндры в круговой системе Куэтта–Тэйлора вращаются навстречу друг другу с равными угловыми скоростями, причем наиболее подходящими для решения практических задач генерации тепловой энергии являются именно мультицилиндровые системы.

Экспериментальные методы исследования, пригодные для одноцилиндровых систем (такие, например, как визуализация), не могут быть использованы для мультицилиндровых систем. Эффекты, ярко выраженные в одноцилиндровых системах, могут быть интегрально «размазаны» в мультицилиндровых за счет разной

ширины зазоров, разных радиусов цилиндров, разных линейных скоростей движения стенки и т. п.

Исходя из вышеизложенного можно заключить, экспериментальный метод исследования сопротивления вращению мультицилиндровых систем с помощью исследования энергетических спектров момента сопротивления вращению «роторов» мультицилиндровой системы является очень доступным, недорогим и весьма эффективным. Использование этого метода может дать большой объем информации как для понимания гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в мультицилиндровых системах, так и для практического применения таких систем.

Литература

1. *Fénot M., Bertin Y., Dorignac E., Lalizel G.* A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow // *Int. J. Therm. Sci.* – 2011. – V. 50, No 7. – P. 1138–1155. – doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.013.
2. *Maron D.M., Cohen S.* Hydrodynamics and heat/mass transfer near rotating surfaces // *Adv. Heat Transfer.* – 1992. – V. 21. – P. 141–183. – doi: 10.1016/S0065-2717(08)70335-6.
3. *Серов А.Ф., Мамонов В.Н., Назаров А.Д.* Влияние структуры течения на энерговыделение в кольцевой системе Куэтта с оппозитным вращением цилиндров // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки.* – 2015. – Т. 157, кн. 3. – С. 137–142.
4. Пат. 2612237 Российская Федерация. Оппозитный ветротеплогенератор / Серов А.Ф., Мамонов В.Н., Терехов В.Н., Назаров А.Д. – № 2015150585, заявл. 25.11.2015; опубл. 03.03.2017, Бюл. № 7.
5. *Mamonov V.N., Nazarov A.D., Serov A.F.* Experimental investigation of thermal processes in the multiring Couette system with counter rotation of cylinders // *Thermophys. Aeromech.* – 2016. – V. 23, No 1. – P. 139–142. – doi: 10.1134/S0869864316010157.
6. *Andereck C.D., Liu S.S., Swinney H.L.* Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders // *J. Fluid Mech.* – 1986. – V. 164. – P. 155–183. – doi: 10.1017/S0022112086002513.

Поступила в редакцию
03.07.17

Серов Анатолий Федорович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
пр. акад. Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: *serov@itp.nsc.ru*

Мамонов Валерий Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
пр. акад. Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: *tamonovvn@mail.ru*

Назаров Александр Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
пр. акад. Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: *nazarov@itp.nsc.ru*

Pulsation Energy of the Couette–Taylor Flow in Gaps of Multicylinder Counter-Rotating Rotors

*A.F. Serov**, *V.N. Mamonov***, *A.D. Nazarov****

*S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090 Russia*

E-mail: **serov@itp.nsc.ru*, ***mamonovvn@mail.ru*, ****nazarov@itp.nsc.ru*

Received July 3, 2017

Abstract

The results of the experiments on thermal energy separation during the rotation of two coaxial counter-rotating multislotted “rotors” that form a system of cylindrical ring channels filled with viscous working fluid have been presented. The Couette–Taylor flow occurs in such a system of annular channels. The proposed design has been viewed as a model of the heat generator with the driving device having two counter-rotating (rotating towards each other) wind engines. During the operation, the working fluid heated in the annular channels due to the high shear stresses in the circulating loop containing a heat exchanger to transfer heat to the battery heat. The kinetic energy of the driving device is completely converted into the heat energy. During the experiment, we have performed the direct measurement of the moment of forces of resistance to rotation of the “rotor”, the energy spectra of pulsations at that moment, the heat power released during the operation of the device. The experiments have been carried out at four values of the viscosity of the working fluid in the range of variation of the angular speed of rotation of the “rotor” $\Omega = (6\text{--}30)$ rad/s. The influence of the geometrical parameters of the heat source on the efficiency of converting the kinetic energy of a mechanical actuator into thermal energy has been considered. The obtained results have been analyzed. It has been shown that the proposed design of the heat generator allows to create a device with the given power to operate in the range of small angular velocities of rotation of the “rotor”.

Keywords: circular Couette–Taylor flow system, opposite (towards each other) rotation of coaxial cylinders, moment of resistance to rotation, energy spectra of moment of resistance to rotation, heat generator, generation of thermal energy

Figure Captions

Fig. 1. Experimental unit scheme, photos of “rotor” and heat generator module as a set: 1 – “rotors”; 2, 3 – electric driving motor; 4 – digital dynamometer; 5 – temperature sensors; 6 – thermal isolation; 7 – tachometer; 8 – microprocessor unit for data processing; 9 – flow rate meter; 10 – electric drive control unit; 11 – heat storage device.

Fig. 2. The comparison of powers released by the heat generator: based on the results of measurement of the moment of resistance to movement of “rotors” (\blacktriangle) and by the temperature measurements (\blacksquare).

Fig. 3. The dependence of the moment of resistance to counter rotation on the angular rotation velocity of “rotors” for three values of the working liquid viscosity.

Fig. 4. The dependence of the specific capacity of the heat generator on the angular speed of movement of “rotors” for four values of the working liquid viscosity.

Fig. 5. The averaged spectra of the moment of resistance to rotation at the counter rotation of “rotors” for two angular rotation velocities.

Fig. 6. The specification of the spectra of moment of resistance to rotation at the counter rotation of “rotors” for two angular rotation velocities in the low-frequency (a) and high-frequency (b) subranges.

References

1. Fénot M., Bertin Y., Dorignac E., Lalizel G. A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow. *Int. J. Therm. Sci.*, 2011, vol. 50, no. 7, pp. 1138–1155. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.013.
2. Maron D.M., Cohen S. Hydrodynamics and heat/mass transfer near rotating surfaces. *Adv. Heat Transfer*, 1992, vol. 21, pp. 141–183. doi: 10.1016/S0065-2717(08)70335-6.
3. Serov A.F., Mamonov V.N., Nazarov A.D. Energy liberation in the flow of fluid inside the circular Couette system with opposed rotation of cylinders. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta, Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2015, vol. 157, no. 3, pp. 137–142. (In Russian)
4. Serov A.F., Mamonov V.N., Terekhov V.I., Nazarov A.D. Counter-rotating wind heat generator. Patent for Invention RF no. 2015150585. *Byull. Izobret.*, 2017, no. 7. (In Russian)
5. Mamonov V.N., Nazarov A.D., Serov A.F. Experimental investigation of thermal processes in the multiring Couette system with counter rotation of cylinders. *Thermophys. Aeromech.*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 139–142. doi: 10.1134/S0869864316010157.
6. Andereck C.D., Liu S.S., Swinney H.L. Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders. *J. Fluid Mech.*, 1986, vol. 164, pp. 155–183. doi: 10.1017/S0022112086002513.

⟨ **Для цитирования:** Серов А.Ф., Мамонов В.Н., Назаров А.Д. Энергетика пульсаций течения Куэтта–Тейлора в зазорах оппозитных многоцилиндровых роторов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2017. – Т. 159, кн. 3. – С. 364–373. ⟩

⟨ **For citation:** Serov A.F., Mamonov V.N., Nazarov A.D. Pulsation energy of the Couette–Taylor flow in gaps of multicylinder counter-rotating rotors. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2017, vol. 159, no. 3, pp. 364–373. (In Russian) ⟩