

УДК 536.08

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В МНОГОКОЛЬЦЕВОМ ПОТОКЕ КУЭТТА — ТЕЙЛОРА

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

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

Приведено описание экспериментального стенда и его автоматизации для исследования теплового генератора на основе течений Куэтта — Тейлора между независимо вращающимися многоцилиндровыми роторами. Для исследования структуры течения была использована методика анализа спектров пульсаций момента силы сопротивления вращению роторов теплогенератора. Представлены методики регистрации генерируемой тепловой мощности и исследования частотных характеристик неоднородностей потока в жидкости, находящейся в цилиндрических щелевых пространствах с движущимися стенками. Разработанное оборудование и методики измерения позволили получить экспериментальные данные о влиянии режимов работы теплогенератора и параметров рабочей жидкости на процесс генерации тепловой энергии.

Ключевые слова: многоцилиндровый тепловой генератор, автоматизация эксперимента, течение Куэтта — Тейлора, регистрация и обработка быстрых гидродинамических процессов, момент сопротивления вращению, частотный спектр пульсаций потока.

DOI: 10.15372/AUT20200311

Введение. Возрастающая стоимость энергоресурсов, используемых для теплоснабжения, диктует необходимость поиска более дешёвых источников тепла. Задача экономически эффективного нагрева жидкости, которая используется в качестве теплоносителя в системах водяного отопления и горячего водоснабжения, была и остаётся актуальной независимо от способа осуществления этих процессов, конструкции системы отопления и источников получения тепла.

Недостатком известных решений обеспечения теплом технологических и бытовых потребителей за счёт ветроэлектрических установок является низкий коэффициент первичного преобразования энергии, полученной на валу ветрогенератора, в тепло. Основной вклад в снижение КПД вносят низкая скорость вращения ветряка, начальный тормозящий момент магнитной системы ротор — статор электрогенератора и затраты на прокачку теплоносителя. Получение тепла за счёт прямого потребления механической энергии ветроустановки позволяет утверждать, что КПД разработанной системы достигает 95 %. Потери определяются только качеством теплоизоляции корпуса теплогенератора. Поэтому важным в практическом плане вопросом является возможность прямого преобразования механической энергии ветра в тепловую. Поисковые исследования наиболее экономичных источников получения тепла для нагрева жидкости при утилизации механической энергии привели к идее использования для получения тепла диссипативных свойств вязкой жидкости, находящейся в кольцевых каналах с движущимися стенками. В [1] предложено рассмотреть в качестве устройства для прямого преобразования механической энергии в тепло генератор тепла, в котором два коаксиальных встречно вращающихся многощелевых ротора образуют систему цилиндрических кольцевых каналов, заполненных вязкой рабочей жидкостью.

Как любое материальное тело жидкость испытывает сопротивление своему движению в результате трения между слоями, а также о стенки направляющей системы (например, трубы). Однако в отличие от твёрдого тела, которое в процессе такого взаимодействия (трения) разогревается и частично начинает разрушаться, слои жидкости тормозятся, и при относительном движении наблюдаются диссипативные процессы с выделением тепла. При достижении определённой скорости движения жидкости в её объёме начинают возникать и разрушаться довольно сложные вихревые структуры. При торможении жидкости, а также при разрушении (диссипации) вихревых структур в жидкости выделяется тепловая энергия.

Опубликовано большое количество экспериментальных и теоретических исследований потока между концентрическими вращающимися цилиндрами (круговой поток Куэтта). С некоторыми результатами исследований этой задачи можно ознакомиться в [2]. В частности, для встречно и спутно вращающихся цилиндров показано, что структура течения в зазорах между вращающимися коаксиальными цилиндрами определяется соотношением между числами Рейнольдса внешнего и внутреннего цилиндров. Авторы построили карту режимов течения и установили, что иерархия этих режимов задаётся именно соотношением указанных чисел Рейнольдса.

Теплоотдача между цилиндрами исследовалась в гораздо меньшей степени [3, 4], и в этой проблеме осталось много неизученных вопросов. Особенно слабоизученным является процесс диссипативного нагрева жидкости в кольцевом промежутке между вращающимися цилиндрами.

Целью данной работы является оснащение измерительным оборудованием экспериментального стенда для исследования эффективности прямого преобразования механической энергии ветра в тепловую энергию, разработка методик получения данных о генерируемой тепловой мощности и данных о структуре потока жидкости в кольцевых каналах экспериментальной модели теплогенератора.

Экспериментальная установка. Конструкция устройства, которое называется оппозитным ветротеплогенератором [5], имеет два вертикально расположенных рабочих колеса ветродвигателей (ВД), которые вращаются в противоположных направлениях и передают соответственно вращающий момент верхнему и нижнему роторам теплогенератора. Для моделирования работы такого устройства вместо вертикальных ветровых колёс в эксперименте используются электродвигатели с возможностью регулирования скорости вращения.

На рис. 1 приведён эскиз теплогенератора. Установка состоит из двух однотипных роторов, вложенных в кольцевые зазоры друг друга и образующих систему цилиндрических кольцевых каналов диаметром от 203 до 315 мм. Каждый ротор имеет семь цилиндрических колец, изготовленных из полос алюминиевого сплава высотой 50 мм и толщиной

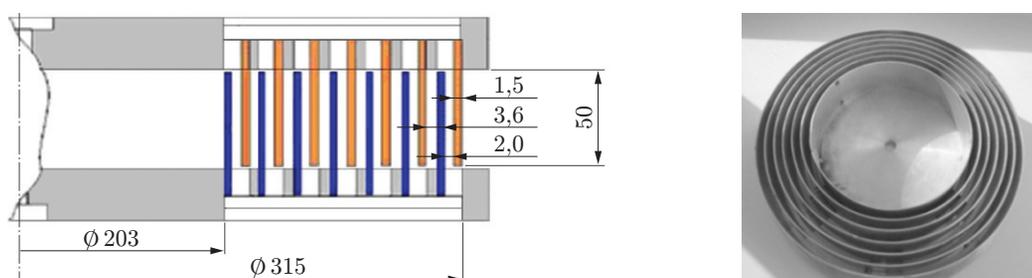


Рис. 1. Эскиз теплогенератора и фотография коаксиального ротора

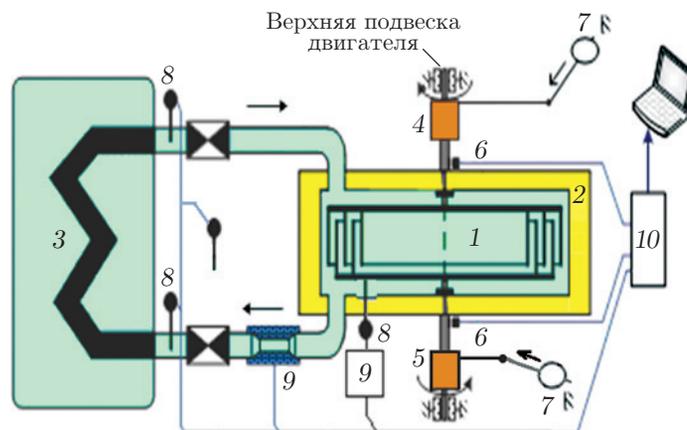


Рис. 2. Схема экспериментальной установки основного узла установки с макетом теплогенератора

1,5 мм. Образующаяся коаксиальная мультицилиндровая система состоит из 13 кольцевых цилиндрических каналов: семи каналов шириной 2 мм и шести каналов шириной 3,6 мм. Объём, занятый жидкостью в кольцевых каналах теплогенератора, равен 1,4 л. Конструкция теплогенератора имеет массу 12 кг. Название «роторы» условно, так как и тот и другой вращаются относительно корпуса теплогенератора.

Кольцевые каналы заполняются рабочей вязкой жидкостью с заданными свойствами, которая при работе теплогенератора нагревается за счёт больших сдвиговых напряжений при вращении ротора. При этом кинетическая энергия вращательного движения полностью преобразуется в тепловую энергию.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Теплогенератор 1 покрыт теплоизолятором 2, нагретая жидкость циркулирует через аккумулятор тепловой энергии 3, два низкооборотных двигателя 4, 5 вращают роторы теплогенератора, по показаниям тахометров 6 определяется угловая скорость вращения роторов, динамометры 7 регистрируют момент сопротивления вращению роторов, датчики температуры 8 измеряют температуру окружающей среды, корпуса теплогенератора, температуру теплоносителя на входе и выходе аккумулятора, расходомер жидкости 9 измеряет расход теплоносителя через аккумулятор 3. Микропроцессорной системой сбора данных 10 данные от датчиков передаются в компьютер для архивации и дальнейшего анализа.

Оборудование экспериментального стенда. Общая структурная схема установки приведена на рис. 3. Блоки оборудования объединены по способу ввода измерительной информации в компьютер. Сигналы с тензодатчиков после двухканального операционного усилителя передаются в компьютер через цифровой осциллограф PCLab2000SE. Параметры электрической сети для работы электроприводов, скорость которых задаётся через лабораторные автотрансформаторы (ЛАТР), считываются через модуль измерения мощности МЭ110-224.1М. Датчики температуры и скорости вращения роторов теплогенератора подключаются через многоканальный аналоговый модуль ввода МВА8.

Для получения данных о температуре использовались первичные датчики в виде термосопротивлений (Pt1000), подключённые к аналоговому модулю ввода МВА8. Данный прибор обеспечивает неопределённость измерения $\pm 0,25\%$ в диапазоне температур от -200 до $+650$ °С.

Динамометрическая система стенда позволяет измерить интегральный момент сопротивления встречному вращению роторов теплогенератора, величину пульсаций момента сопротивления. Цифровой осциллограф с выбранным интервалом формирует с заданными

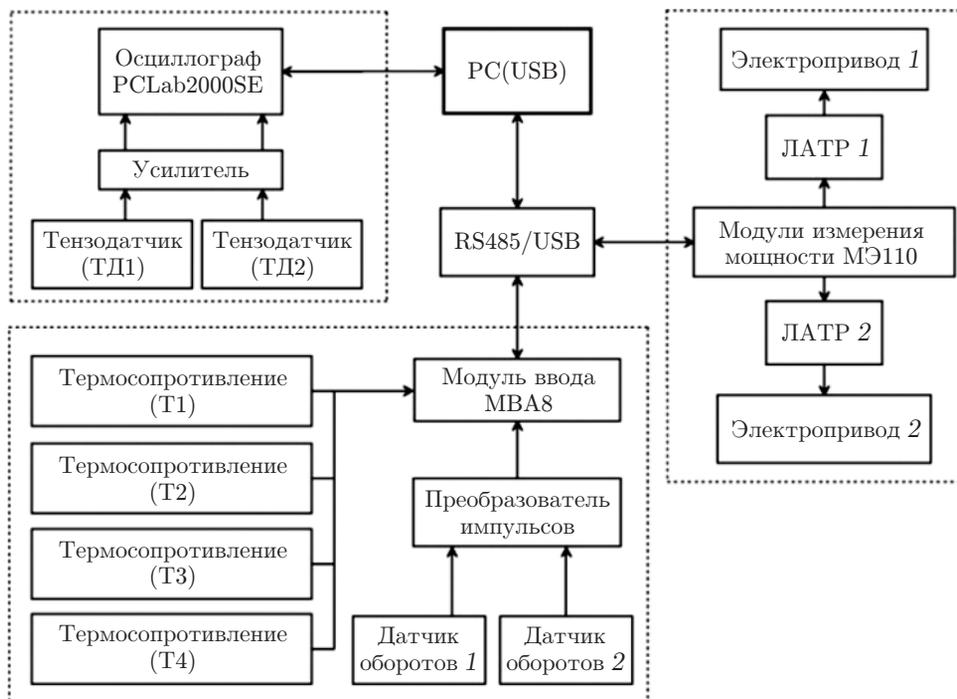


Рис. 3. Общая схема стенда

ми характеристиками файлы момента (самописец) и спектров пульсаций течения рабочей жидкости в зазорах мультицилиндровой системы роторов в зависимости от параметров рабочей жидкости (вязкости) и угловой скорости вращения роторов.

На рис. 4, а показаны фотографии стенда с установленной динамометрической системой. Статоры двигателей закреплены в осевых подшипниках. Электродвигатели привода при оппозитном вращении роторов макета теплогенератора преодолевают сопротивление, которое создаёт на роторе двигателя обратный момент, равный суммарному моменту сопротивления вращению роторов теплогенератора. Момент сопротивления вращению передаётся на тензодатчики через плечо рычага длиной $L = 0,115$ м. На рис. 4, б приведена механическая схема динамометрической системы для верхнего и нижнего роторов макета.

Статическая калибровка измерительного канала динамометрической системы регистрации момента сопротивления вращению роторов выполнялась с применением весового набора от 0 до 5 кг. Для каждого значения весовой нагрузки вычислялась величина момента силы, действующей на тензодатчики верхнего и нижнего роторов макета теплогенератора через плечо, измерялся электрический сигнал на выходе усилителя.

Весовой набор контролировался весами с приведённой погрешностью 0,06 %. Напряжение на выходе измерялось вольтметром с приведённой погрешностью 3 %. Погрешность аппроксимации равнялась 2 %. Суммарная погрешность определения момента силы с учётом всех источников погрешности рабочего измерительного канала динамометрической системы (тензодатчиков CN1501541594 (ТД1 и ТД2), усилителя сигналов и цифрового осциллографа (см. рис. 3)) в статическом режиме составляет 4 %.

Амплитудно-частотная характеристика динамической системы была проведена на специально разработанном устройстве, которое представляет собой механический генератор пульсирующего момента силы. На рис. 5 приведена схема генератора и его фотография.

Усилие от двигателя 1 передаётся через эксцентрик 2 с ходом $dl = \pm 1,5$ мм толкателью 3, который через пружину 4 воздействует на измерительную балку 5 и формирует

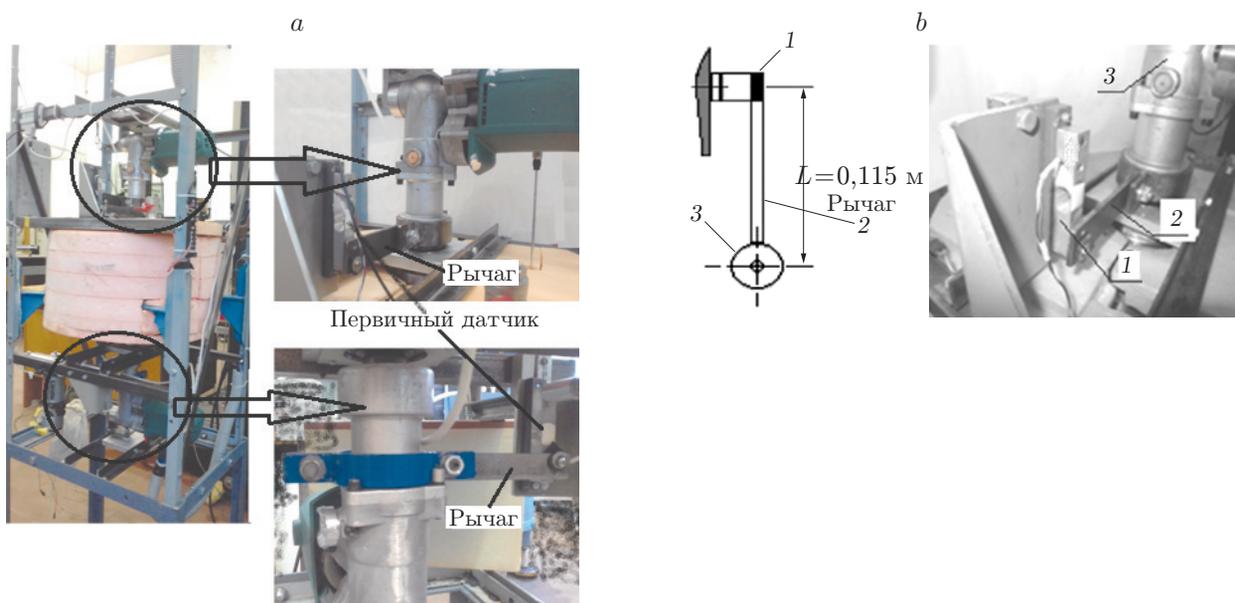


Рис. 4. Динамометрические системы верхнего и нижнего роторов: *a* — фотография стенда с динамометрической системой, *b* — механическая схема динамометрической системы (1 — первичный датчик (тензодатчик), 2 — рычаг, 3 — статор электродвигателя)

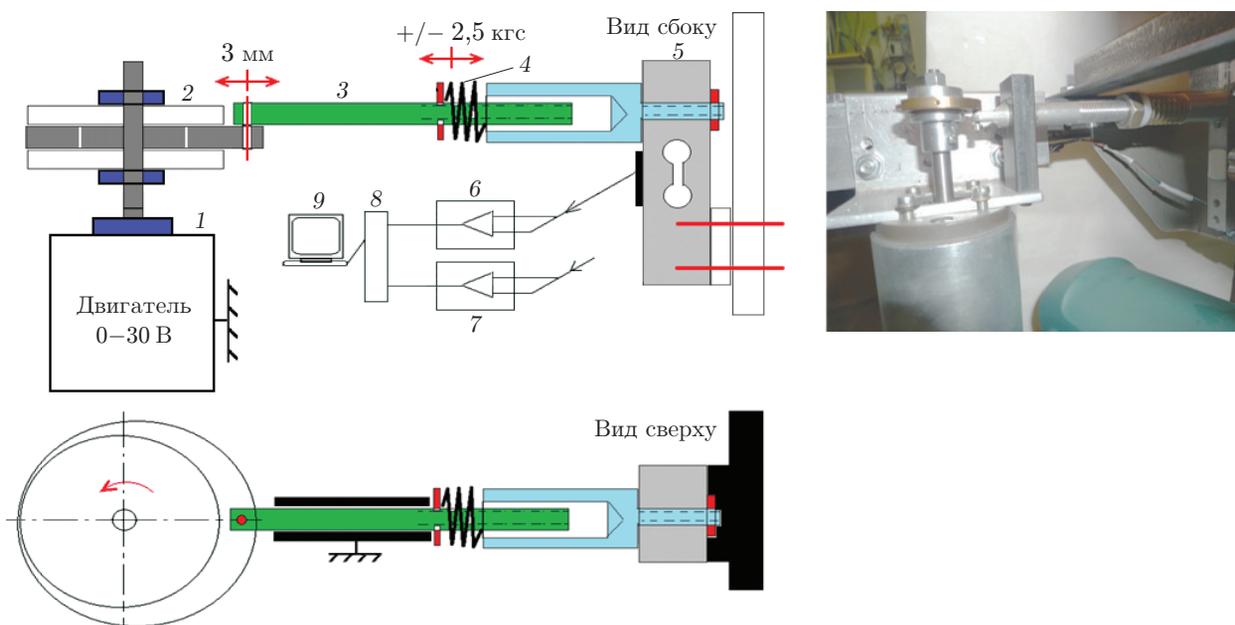


Рис. 5. Схема кривошипно-шатунного механизма генератора пульсирующего момента силы и фотография его механической конструкции (1 — электродвигатель постоянного тока, 2 — эксцентрик, 3 — толкатель, 4 — пружина, 5 — балка тензодатчика, 6, 7 — усилители, 8 — двухканальный осциллограф (анализатор спектра), 9 — система сбора данных)

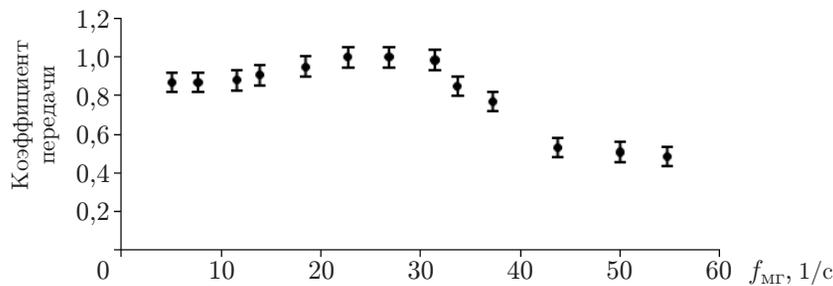


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика динамометрической измерительной системы

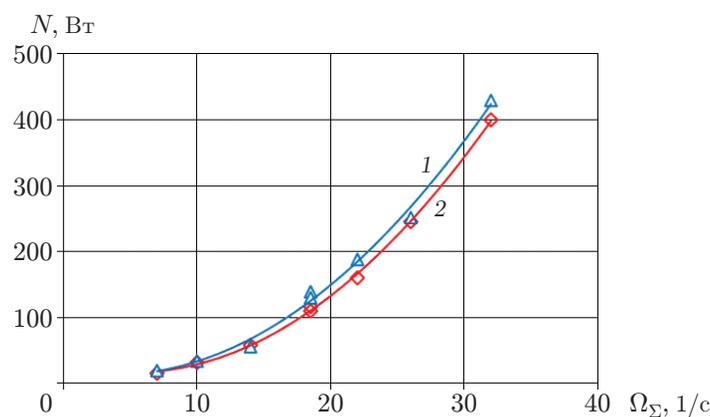


Рис. 7. Сравнение измерений тепловой (1) и механической (2) мощностей, вырабатываемых теплогенератором

сигнал с тензодатчиков. Далее сигнал преобразуется измерительным каналом (описан выше). На рис. 6 приведён коэффициент передачи измерительной системы. Здесь переменная $f_{\text{МГ}}$ — частота механического генератора.

Полученная амплитудно-частотная характеристика динамометрической измерительной системы позволяет вносить поправки при анализе спектра пульсаций момента сопротивления вращению многоселевых роторов макета теплогенератора. Поправки необходимы для определения истинного вклада отдельных частот пульсаций в генерацию тепловой энергии.

Методика регистрации тепловой мощности. Положение о том, что трение жидкости о движущиеся стенки кольцевого канала и относительное смещение параллельных слоёв в объёме жидкости в закрытой системе полностью переходят в тепловую энергию, позволило предложить методику измерения тепловой мощности по измеренному моменту сопротивления вращению роторов теплогенератора и их скорости вращения:

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

где N [Вт] — мощность; M [Н·м] — измеренный момент сопротивления вращению роторов; Ω [1/с] — относительная угловая скорость вращения роторов.

Макет теплогенератора заполнялся рабочей вязкой жидкостью с заданными свойствами. Вязкость изменялась за счёт изменения состава водоглицериновой смеси и её температуры. Измерения кинематической вязкости производились с помощью стеклянного капиллярного вискозиметра с погрешностью $\pm 1,5\%$.

Для того чтобы подтвердить совпадение вычисляемой по формуле (1) мощности с тепловой мощностью, которая реально выделяется при работе теплогенератора, был проведён специальный эксперимент. Одновременно с измерением момента сопротивления вращению роторов определялась выделяемая тепловая энергия по изменению температуры за известный промежуток времени с учётом массы, теплоёмкости рабочей жидкости и составляющих элементов теплогенератора. На рис. 7 приведено сравнение результатов значений мощности (N_{moment}), полученных по результатам измерения момента сопротивления вращению, (N_{heat}) по тепловым измерениям в зависимости от скорости встречно вращающихся роторов макета. Скорость Ω_{Σ} оппозитного вращения верхнего и нижнего роторов одинакова.

Результаты измерений, полученные двумя независимыми методами, совпадают с точностью 3 %. Это говорит о том, что определение выделяемой теплогенератором тепловой мощности может осуществляться методом измерения значений момента сопротивления вращению роторов.

Исследования структуры течения. Примеры наблюдения возникающих сложных структурных образований в жидкости в однощелевом пространстве приведены в [2], где авторы опирались на оптический метод регистрации. Экспериментальных данных о характере возникающих вихревых и спиралевидных течений в многощелевой цилиндрической системе с подвижными стенками на сегодня нет. Данные, полученные созданной системой измерения, представляют информацию о спектре генерируемых пульсаций момента в жидкости одновременно во всех щелевых каналах. Созданные динамометрическая система и методика спектрального анализа пульсаций течения в многощелевом пространстве на основе сопоставления с данными о течении в однощелевом аппарате позволили перенести характер гидродинамических процессов в однощелевой модели в многощелевое пространство исследуемого аппарата.

Измерения выполнялись последовательно. Внутренний объём теплогенератора заполнялся соответствующей рабочей жидкостью. С каждой рабочей жидкостью эксперимент проводился следующим образом:

— с помощью блоков управления оборотами электроприводов 4 (см. рис. 2) устанавливалось встречное вращение верхнего и нижнего роторов теплогенератора с одинаковой частотой; непрерывно контролируя температуру рабочей жидкости, можно было на любом этапе эксперимента определить её вязкость;

— в процессе проведения эксперимента автоматизированная система сбора данных через каждые 3 мин регистрировала текущее время, температуру рабочей жидкости, величину момента сопротивления вращению роторов, формировала табличные данные осциллограмм и спектров пульсаций момента сопротивления вращению роторов.

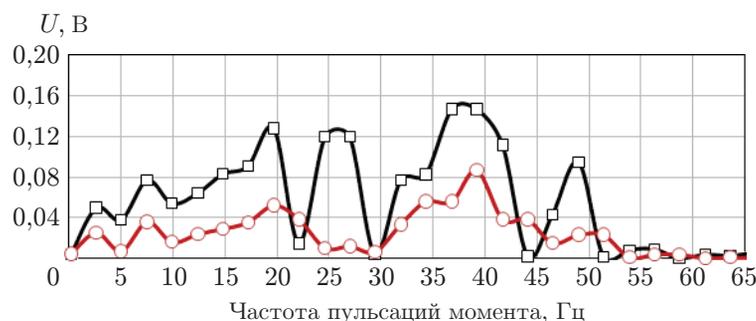


Рис. 8. Спектры сигнала динамометрической системы для двух вязкостей: квадраты — 54 сСт, кружки — 6 сСт

На рис. 8 представлен пример регистрации сигнала спектра пульсаций интегрального момента сопротивления динамометрической системой для двух вязкостей рабочей жидкости в многощелевом пространстве генератора. Относительная угловая скорость вращения каждого из роторов (верхнего и нижнего) теплогенератора поддерживалась постоянной $\Omega = 22$ 1/с.

Обширный объем полученных данных позволил составить подробную карту энергии пульсаций неоднородностей, возникающих в жидкости, находящейся в многощелевом пространстве теплогенератора в зависимости от числа Рейнольдса усреднённых внутреннего и внешнего цилиндров Re_i и Re_0 соответственно ($Re_i = r \delta \Omega_i / \nu$, $Re_0 = R \delta \Omega_0 / \nu$, где Ω_i и Ω_0 — это угловые скорости вращения внутреннего и внешнего цилиндров по отношению к неподвижной системе координат, r и R — усреднённые радиусы внутреннего и внешнего цилиндров, $\delta = R - r$ — ширина щели между цилиндрами, ν — кинематическая вязкость рабочей жидкости).

Анализ данных позволяет соотнести наблюдаемые энергетические спектры с описанными в [2] типами жидкостных структур: вихри, ламинарные спирали Тейлора, волнистые вихри, турбулентные вихри Тейлора, а также различные комбинации этих потоков. Энергии вихрей в потоках Тейлора в однощелевом и особенно многощелевом пространстве не были описаны ранее.

Заключение. Разработанный экспериментальный стенд, измерительное оборудование и методики измерения являются эффективными инструментами в экспериментальных исследованиях при разработке сложных систем генерации тепловой энергии.

Разработанная методика измерения диссипативных процессов в жидкости по поведению момента силы сопротивления вращению многощелевых роторов позволяет по данным о среднем моменте силы сопротивления получать генерируемую тепловую мощность установки, по данным амплитудно-частотного спектра пульсаций определять характер течения в щелевых пространствах роторов.

Проведены две серии экспериментов: 1) исследовались величина момента сопротивления вращению роторов теплогенератора и выделяемая теплогенератором мощность в зависимости от относительной угловой скорости вращения роторов при фиксированной вязкости рабочей жидкости; 2) исследовались величина, пульсации момента сопротивления вращению и выделяемая теплогенератором мощность в зависимости от вязкости рабочей жидкости при фиксированной относительной угловой скорости вращения роторов теплогенератора.

Анализ зависимости момента силы сопротивления вращению роторов многощелевого теплогенератора от числа Рейнольдса показывает, что основной вклад в генерацию тепла вносят процессы в азимутальных ламинарных потоках с вихрями Экмана и спиральное течение с вихрями Тейлора.

Метод регистрации генерации тепловой энергии по данным измерения момента сопротивления вращения роторов теплогенератора и метод исследования энергетических спектров момента сопротивления вращению роторов мультицилиндровой системы являются доступными, недорогими и весьма эффективными для оценивания производительности генерации тепловой энергии в подобных системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 // Appl. Energy. 2019. **251**. 113362.

2. **Andereck C. D., Liu S. S., Swinney H. L.** Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders // Journ. Fluid Mech. 1986. **164**. Pt. 1. P. 155–183. DOI: 10.1017/s0022112086002513.
3. **Sparrow E. M., Munro W. D., Jonsson V. K.** Instability of the flow between rotating cylinders: the wide-gap problem // Journ. Fluid Mech. 1964. **20**. Pt 1. P. 35–46. DOI: 10.1017/S0022112064001008.
4. **Froitzheim A., Merbold S., Egbers C.** Velocity profiles, flow structures and scalings in a wide-gap turbulent Taylor–Couette flow // Journ. Fluid Mech. 2017. **831**. P. 330–357.
5. **Пат. РФ 2612237.** Оппозитный ветротеплогенератор /А. Ф. Серов, В. Н. Мамонов, В. И. Терехов, А. Д. Назаров. Заявл. 25.11.2015. Опубл. 03.03.2017, Бюл. № 7.

Поступила в редакцию 20.11.2019

После доработки 13.12.2019

Принята к публикации 17.12.2019
