

УДК 532.5.031,62-67

Экспериментальное исследование тепловых процессов в мультикольцевой системе Куэтта с встречным вращением цилиндров*

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

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

E-mail: mamonovvn@mail.ru

Рассматривается влияние параметров мультикольцевой системы Куэтта с вращающимися навстречу друг другу коаксиальными цилиндрами на процесс выделения тепловой энергии в вязкой жидкости, заполняющей эту систему, применительно к задаче определения возможности создания высокоэффективного ветротеплогенератора. Многоцилиндровая конструкция роторов позволяет непосредственно преобразовать механическую энергию агрегата, состоящего из двух «роторных» ветряков с общей осью, перпендикулярной к потоку воздуха, в тепловую энергию в широком диапазоне частоты вращения цилиндров. Представлены результаты экспериментов по измерению выделяемой в макетном образце теплогенератора тепловой мощности при различных относительных угловых скоростях вращения цилиндров.

Ключевые слова: кольцевая система Куэтта, коаксиальные цилиндры, встречное вращение, теплогенератор, диссипация.

В настоящее время вопрос получения тепловой энергии с помощью экологически чистых технологий из возобновляемых источников энергии является чрезвычайно актуальным [1]. Наиболее эффективное соединение ветродвигателя и теплогенератора позволяет реализовать генератор тепловой энергии на возобновляемом источнике с высоким коэффициентом преобразования энергии ветра в тепловую энергию. Высокий КПД достигается за счет того, что имеется возможность всю энергию в широком диапазоне угловых скоростей от источника кинетической энергии (ветродвигатель) преобразовать в тепло и накопить в тепловом аккумуляторе.

В представленной работе экспериментально исследованы режимы течения в мультикольцевой системе Куэтта с независимо вращающимися навстречу друг другу цилиндрами. Обзор литературы по данной теме показал, что в значительной части работ рассматривался вопрос о течении вязкой жидкости в одиночных кольцевых зазорах между вращающимися коаксиальными цилиндрами [2–4]. В частности, в работе [2] исследовалась система, образованная двумя коаксиальными независимо вращающимися цилиндрами, которая характеризовалась следующими параметрами: отношение радиусов $\eta = a/b$, где a и b являются радиусами внутреннего и внешнего цилиндров соответственно, характеристическое соотношение $\Gamma = L/(b-a)$, где L — высота щели. Числа Рейнольдса для внутреннего цилиндра $Re_i = a(b-a)\Omega_i/\nu$ и для внешнего цилиндра $Re_o = b(b-a)\Omega_o/\nu$, где Ω_i и Ω_o — угловые скорости внутреннего и внешнего цилиндров, а ν — кинематическая вязкость жидкости, заполняющей кольцевую щель. На основе проведенных

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-19-00402).

исследований авторы [2] представили подробную карту режимов течения в кольцевом зазоре вращающихся относительно друг друга цилиндров как функции чисел Рейнольдса внутреннего и внешнего цилиндров — Re_i и Re_o соответственно.

Анализ возможных режимов течения в зазоре показывает, что при вращении только одного цилиндра (наружного или внутреннего) в кольцевом зазоре реализуется или ламинарное течение Куэтта (при вращении внешнего цилиндра), или вихревое течение Тэйлора, теряющее устойчивость при увеличении числа Рейнольдса (при вращении внутреннего цилиндра). При встречном вращении цилиндров, например, с равными угловыми скоростями при тех же числах Рейнольдса, что и в случае вращающегося одного цилиндра, в кольцевом зазоре можно получить турбулентный режим течения, который позволяет максимально увеличить сдвиговые напряжения в кольцевом зазоре.

С целью определения оптимальных конструктивных параметров оппозитной системы теплогенератора для наиболее вероятной частоты вращения карусельного двухроторного ветродвигателя (1–5 Гц) в настоящей работе была экспериментально исследована область режимов преобразования кинетической энергии в тепловую при числах Рейнольдса Re_i и $Re_o \sim$ до 1000.

На рис. 1 приведен эскиз конструкции экспериментального образца теплогенератора. Оппозитный роторный теплогенератор конструктивно состоит из двух однотипных «роторов», вложенных в кольцевые зазоры друг друга и образующих систему цилиндрических кольцевых каналов. Название «роторы» условно, так как и тот и другой вращаются относительно корпуса теплогенератора. Все элементы теплогенератора выполнены из алюминиевого сплава. Вращающиеся навстречу друг другу «роторы» образуют коаксиальную мультицилиндровую систему, состоящую из тринадцати кольцевых цилиндрических каналов: семь каналов шириной 2 мм и шесть каналов шириной 3,5 мм. Высота кольцевых зазоров равна 50 мм, диаметры колец — от 203 до 315 мм (см. рис. 1).

Система заполняется рабочей вязкой жидкостью с заданными свойствами, которая при работе теплогенератора нагревается за счет больших сдвиговых напряжений в кольцевых каналах. При этом кинетическая энергия привода полностью преобразуется в тепловую энергию. Отбор тепловой энергии от теплогенератора осуществляется за счет циркуляции рабочей жидкости в замкнутом контуре, содержащем теплообменник и аккумулятор тепловой энергии. Циркуляция рабочей жидкости обеспечивается работой лопастного насоса, который установлен на общей оси с «роторами» (см. рис. 1). Теплогенератор, теплообменник и аккумулятор тепловой энергии являются основными компонентами экспериментального стенда, предназначенного для исследования особенностей тепловых процессов, протекающих в кольцевых каналах теплогенератора при использовании различных рабочих жидкостей и разных режимов работы.

Мультицилиндровая макетная система характеризуется следующими параметрами: отношение радиусов составляло величину $\eta \approx 0,99$, характеристическое соотношение $\Gamma = 16,67 \div 25,00$. Числа Рейнольдса для внутреннего цилиндра Re_i находились в диапазоне $32 \div 875$ и для внешнего цилиндра Re_o в диапазоне $33 \div 877$ при изменении угловой

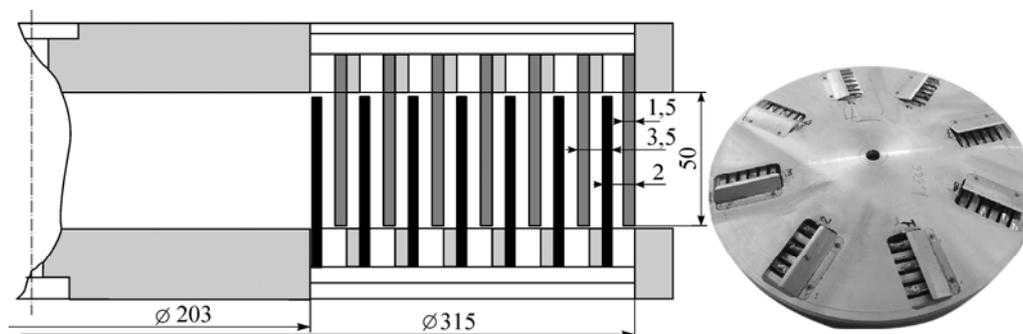


Рис. 1. Эскиз конструкции теплогенератора, коаксиальный «ротор» и лопастной насос.

скорости Ω_i в диапазоне $2,5 \div 30$ 1/с. Опыты проводились с двумя рабочими жидкостями: с чистой водой ($\nu \approx 0,95$ сСт) и со смесью вода-глицерин ($\nu \approx 30$ сСт).

На рис. 2 приведена схема экспериментального стенда. Отбор тепловой энергии от теплогенератора осуществлялся за счет циркуляции рабочей жидкости в замкнутом контуре, содержащем теплообменник и аккумулятор тепловой энергии. Циркуляция рабочей жидкости обеспечивалась работой лопастного насоса, конструктивно встроенного в диск корпуса (см. рис. 1). Стенд оснащен необходимыми для проведения исследований системами измерений. Он включает в себя теплоизолированный теплогенератор 1, электропривод 2 с тахометром 3, динамометрическую систему измерения момента сопротивления заторможенного «ротора» 4, платиновые термометры сопротивления для регистрации температуры в трех точках рабочего контура стенда 5–7, счетчик оборотов «ротора» 8, микропроцессорный блок обработки данных 9, теплообменник с аккумулятором тепловой энергии 10, теплосчетчик 11 для измерения количества тепловой энергии, переданной от теплогенератора в тепловой аккумулятор, блок управления оборотами электропривода 12, приводящего во вращение «роторы».

Были проведены два вида экспериментов.

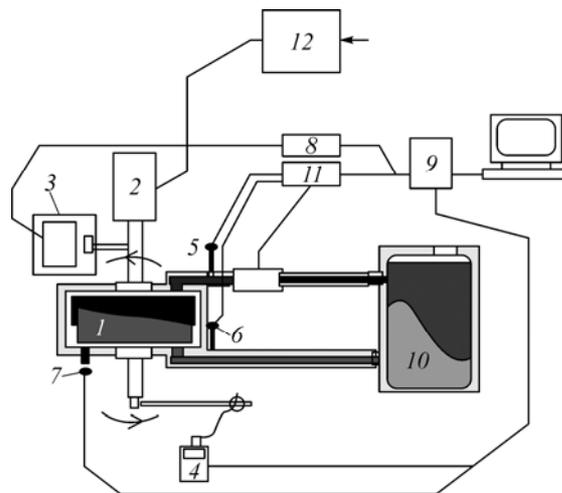
Первый — в режиме одной вращающейся системы цилиндров при заторможенной второй системе. На заторможенной системе цилиндров тормозящий момент измерялся цифровым динамометром. Одновременно с измерением момента определялась выделяемая за известный промежуток времени (10 минут) теплогенератором тепловая энергия. Количество тепловой энергии вычислялось по изменению температуры теплоизолированного теплогенератора, массе и теплоемкости рабочей жидкости и составляющих частей теплогенератора. Эксперименты с одной вращающейся системой цилиндров были проведены в диапазоне изменения угловых скоростей вращения цилиндров $\Omega_i = 2,5 \div 30$ 1/с.

Второй — в режиме встречного вращения цилиндров с равными противоположно направленными угловыми скоростями. В этих экспериментах количество тепловой энергии, выделенной теплогенератором, определялось двумя способами: в режиме циркуляции рабочей жидкости через теплообменник и в режиме без циркуляции рабочей жидкости (нагрев рабочей жидкости в объеме теплообменника). В режиме циркуляции рабочей жидкости количество тепловой энергии измерялось теплосчетчиком 11 (рис. 2), а в режиме без циркуляции рабочей жидкости количество выделенной тепловой энергии определялось так же, как и в случае одной заторможенной системы цилиндров — по изменению температуры теплоизолированного теплогенератора, массе и теплоемкости рабочей жидкости и составляющих частей теплогенератора. Эксперименты со встречным вращением цилиндров с равными противоположно направленными угловыми скоростями также проводились в диапазоне изменения угловых скоростей каждой системы цилиндров $\Omega_i = 2,5 \div 16$ 1/с.

На рис. 3 приведены результаты экспериментов в виде зависимости выделяемой удельной тепловой мощности в зазоре теплогенератора

Рис. 2. Стенд для исследования оппозитного теплогенератора.

1 — теплогенератор, 2 — электропривод, 3 — тахометр, 4 — цифровой динамометр, 5–7 — платиновые термометры сопротивления, 8 — счетчик оборотов, 9 — микропроцессорный блок обработки данных, 10 — теплообменник с аккумулятором тепловой энергии, 11 — теплосчетчик, 12 — блок управления оборотами электропривода.



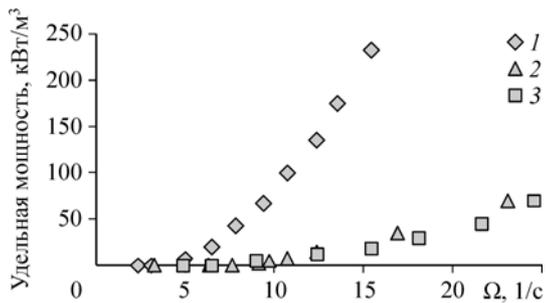


Рис. 3. Удельная тепловая мощность, производимая вращением цилиндров.

1 — мощность при встречном вращении цилиндров, смесь вода-глицерин, $\nu \approx 30$ сСт; 2 — мощность при встречном вращении цилиндров, вода, $\nu \approx 0,95$ сСт; 3 — мощность при раздельном вращении цилиндров, смесь вода-глицерин, $\nu \approx 30$ сСт.

от угловой скорости при заполнении водой и смесью вода-глицерин. Удельная мощность определялась по тепловой энергии, выделяемой в суммарном целевом рабочем объеме генератора ($V \approx 2$ литра).

График позволяет сравнить производительность теплогенератора при раздельном вращении верхнего и нижнего цилиндров в смеси вода-глицерин (кривая 3, рис. 3) с мощностью, выделяемой при их встречном вращении (кривая 1, рис. 3). Кривая 2 демонстрирует генерируемую мощность при оппозитном вращении и заполнении теплогенератора водой. Результаты измерений показали, что мощность, выделяемая теплогенератором, в значительной степени зависит от вязкости жидкости и от режима вращения цилиндров. При встречном вращении цилиндров удельная мощность значительно выше, чем суммарная мощность при раздельном их вращении с сопоставимыми угловыми скоростями вращения.

Сравнение результатов эксперимента с данными, приведенными в работе [2], позволяет дать объяснение полученным результатам тем обстоятельством, что при вращении только одного цилиндра (наружного или внутреннего) в кольцевых зазорах реализуется режим азимутального ламинарного течения или режим волнового вихревого течения, теряющий устойчивость при увеличении числа Рейнольдса. В то же время при встречном вращении цилиндров с равными угловыми скоростями в кольцевых зазорах должен иметь место переход от ламинарного режима течения к интенсивному турбулентному режиму с интенсивной вязкой диссипацией механической энергии в тепловую.

Заключение. Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод, что рассмотренная мультикольцевая система Куэтта с встречновращающимися цилиндрами обладает большими потенциальными возможностями с точки зрения ее использования в качестве основного конструктивного компонента в устройствах, преобразующих механическую энергию вращения в тепловую энергию. Тщательная проработка конструкции с учетом экспериментально построенных карт режимов течения в кольцевых зазорах этой конструкции позволит оптимизировать конструкцию генератора, обеспечивая, по возможности, турбулентный режим течения рабочей жидкости во всех кольцевых зазорах устройства во всем диапазоне заданных рабочих угловых скоростей ветрогенератора.

Список литературы

1. Безруких П.П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. СПб.: Наука, 2002. 314 с.
2. 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. P. 155–183.
3. Fénot M., Bertin Y., Dorignac E., Lalizel G. A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow // Int. J. Thermal Sci. 2011. Vol. 50, No. 7. P. 1138–1155.
4. Maron D.M., Cohen S. Hydrodynamics and heat/mass transfer near rotating surfaces // Advances in Heat Transfer. 1991. Vol. 21. P. 141–183.

Статья поступила в редакцию 6 июля 2015 г.