

УДК 543.318.3+621.18:662.9

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ НА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ В КОЛЬЦЕВОЙ СИСТЕМЕ КУЭТТА С ОПОЗИТНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ЦИЛИНДРОВ

*А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов, А.Д. Назаров*

### Аннотация

Описана конструкция теплогенератора, предназначенного для эффективного преобразования кинетической энергии ветра в тепловую энергию. Конструкция основана на циркуляции вязкой рабочей жидкости в системе цилиндрических кольцевых каналов, образованных вращающимися оппозитно (навстречу друг другу) «роторами». Представлены результаты экспериментов по измерению выделяемой теплогенератором тепловой мощности в разных режимах работы. Проведен анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** кольцевая система Куэтта, оппозитное вращение коаксиальных цилиндров, преобразование кинетической энергии в тепловую, теплогенератор, вязкая жидкость, режимы течения вязкой жидкости в кольцевых зазорах.

В настоящее время актуален вопрос получения тепловой энергии с помощью экологически чистых технологий из возобновляемых источников энергии [1, 2]. В предлагаемом сообщении описан макет теплогенератора, который позволяет непосредственно преобразовать кинетическую энергию ветра в тепловую энергию.

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 от источника кинетической энергии преобразовать в тепло и накопить в объеме теплоносителя (в тепловом аккумуляторе).

Для проведения исследований была разработана конструкция и был изготовлен макетный образец теплогенератора. Оппозитный роторный теплогенератор состоит из двух «роторов», которые, вращаясь навстречу друг другу, образуют систему цилиндрических кольцевых каналов. На рис. 1 приведена фотография одного из «роторов».

В сборе «роторы» образуют мультицилиндровую систему из 13 кольцевых цилиндрических каналов высотой 50 мм и диаметром от 195 до 315 мм: 7 каналов шириной 2 мм и 6 каналов шириной 3.5 мм. Система заполняется вязкой жидкостью с заданными свойствами, которая при работе устройства, нагреваясь в кольцевых каналах за счет больших сдвиговых напряжений, циркулирует в контуре, содержащем теплообменник для передачи тепла в аккумулятор тепловой энергии. При этом кинетическая энергия полностью преобразуется в тепловую энергию. Количество выделенной тепловой энергии определяется частотой вращения, геометрией, размерами площади оппозитных поверхностей «роторов» и свойствами рабочей жидкости (плотностью и вязкостью). Комбинация указанных параметров определяет структуру (режим) течения рабочей жидкости в кольцевых зазорах, что в конечном счете и определяет производительность теплогенератора.



Рис. 1. Ротор теплогенератора



Рис. 2. Макет оппозитного теплогенератора

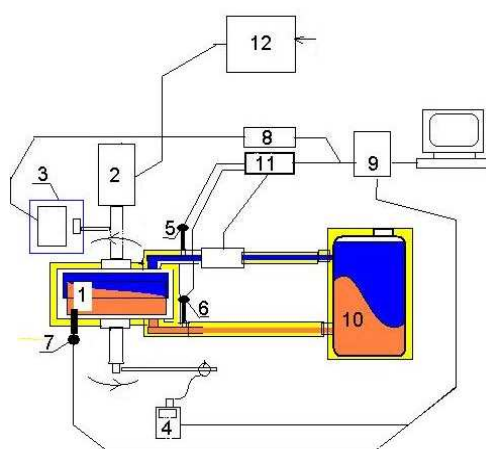


Рис. 3. Стенд для исследования оппозитного теплогенератора: 1 – теплогенератор; 2 – электропривод; 3 – датчик оборотов; 4 – цифровой динамометр; 5, 6, 7 – датчики температуры; 8 – счетчик оборотов; 9 – микропроцессорный блок обработки данных; 10 – емкость; 11 – теплосчетчик; 12 – блок управления оборотами электропривода

На рис. 2 приведена фотография макета оппозитного теплогенератора, на рис. 3 – схема стенда для исследования эффективности теплогенератора при использовании различных рабочих жидкостей в разных режимах работы. Такие исследования дают возможность оптимизировать конструкцию и режимы работы устройства под требования низкооборотных «роторов» ветрогенератора.

Стенд 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, 6, 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». Теплопроизводительность регистрируется теплосчетчиком, который измеряет расход теплоносителя, температуру до и после теплогенератора.

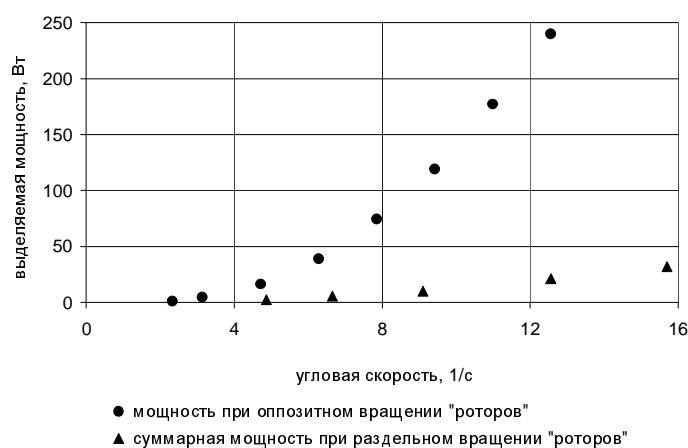


Рис. 4. Тепловая мощность, выделяемая при раздельном и оппозитном вращении «роторов»

Были проведены эксперименты двух видов:

- режим одного вращающегося «ротора», второй «ротор» при этом был заторможен. На заторможенном «роторе» тормозящий момент измерялся цифровым динамометром. Одновременно с измерением момента измерялась выделяемая за известный промежуток времени (10 мин) теплогенератором тепловая энергия. Количество тепловой энергии вычислялось по изменению температуры теплоизолированного теплогенератора, массе и теплоемкости рабочей жидкости и составляющих частей теплогенератора. Эксперименты были проведены в диапазоне изменения угловых скоростей «ротора» от 0.35 до 2.5 Гц.

- режим оппозитного вращения «роторов» с равными противоположно направленными угловыми скоростями. В этих экспериментах количество тепловой энергии, выделенной теплогенератором, определялось двумя методами: в режиме циркуляции рабочей жидкости через теплообменник и в режиме без циркуляции рабочей жидкости через теплообменник (нагрев рабочей жидкости в объеме теплогенератора). В режиме циркуляции рабочей жидкости количество тепловой энергии измерялось теплосчетчиком 11 (см. рис. 3), а в режиме без циркуляции рабочей жидкости количество выделенной тепловой энергии определялось так же, как и в случае одного заторможенного «ротора», – по изменению температуры теплоизолированного теплогенератора, массе и теплоемкости рабочей жидкости и составляющих частей теплогенератора.

Эксперименты второго вида также были проведены в диапазоне изменения угловых скоростей каждого «ротора» от 0.35 до 2.5 Гц. На рис. 4 приведены результаты проведенных измерений в виде зависимости выделяемой теплогенератором мощности от угловой скорости. Нижняя кривая – это суммарная мощность, выделяемая теплогенератором при раздельном вращении «роторов», верхняя – мощность, выделяемая при их оппозитном вращении.

Обращает на себя внимание тот факт, что при одинаковых угловых скоростях при оппозитном вращении выделяемая тепловая мощность значительно больше, чем сумма выделенных мощностей при раздельном вращении «роторов». Этот странный, на первый взгляд, факт может быть легко объяснен на основе тщательных экспериментальных исследований, представленных в работе [3]. В указанной работе исследованы режимы течения в круговой системе Куэтта с независимо вращающимися цилиндрами. Такая система характеризуется следующими параметрами: отношение радиусов  $\eta = a/b$ , где  $a$  и  $b$  являются внутренним и внешним

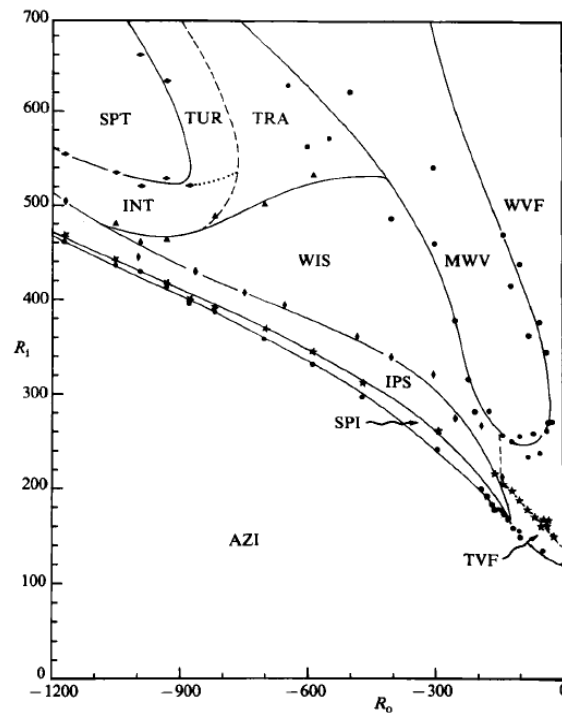


Рис. 5. Карта режимов течения для вращающихся в противоположных направлениях цилиндров. Обозначения: AZI – азимутальный ламинарный поток со слабыми вихрями Экмана; INT – перемежающиеся турбулентные пятна; IPS – взаимопроникающие спирали; MWV – модулированные волновые вихри; SPI – спиральные вихри; SPT – спиральная турбулентность; TRA – область перехода; TUR – турбулентное течение (без особенностей); TVF – вихревое течение Тейлора; WIS – волновые взаимопроникающие спирали; WVF – волновое вихревое течение

радиусами цилиндра соответственно; характеристическое соотношение  $\Gamma = L/(b - a)$ , где  $L$  – длина столба жидкости; числа Рейнольдса внутреннего и внешнего цилиндра есть  $Re_i = a(b - a)\Omega_i/\nu$  и  $Re_o = b(b - a)\Omega_o/\nu$  соответственно, где  $\Omega_i$  и  $\Omega_o$  – угловая скорость внутреннего и внешнего цилиндра соответственно,  $\nu$  – кинематическая вязкость рабочей жидкости.

Система, обсуждаемая в [3], имела размеры  $a = 5.250$  см,  $b = 5.946$  см, поэтому  $\Gamma = 0.883$ . Карты режимов течения были получены для  $\Gamma = 30$ . На основе проведенных исследований авторы [3] представили подробную карту режимов течения в кольцевом зазоре вращающихся относительно друг друга цилиндров. На рис. 5 такая карта режимов течения представлена для цилиндров, вращающихся навстречу друг другу. Переходы между состояниями потока определены как функции чисел Рейнольдса  $Re_i$  и  $Re_o$ .

Мультисистема макетного образца теплогенератора характеризуется следующими параметрами: отношение радиусов  $\eta$  порядка  $0.9944 \div 0.9936$ , характеристическое соотношение  $\Gamma = 16.67 \div 25.00$ . Числа Рейнольдса для внутреннего цилиндра  $Re_i$  находились в диапазоне 32–875 и для внешнего цилиндра  $Re_o$  – в диапазоне 33–877 при изменении угловой скорости  $\Omega_i$  в пределах  $2.5\text{--}30$  с<sup>-1</sup>. Кинематическая вязкость рабочей жидкости (смесь вода – глицерин)  $\nu \approx 30$  сП. Хотя эти параметры заметно количественно отличаются от параметров системы, описанной в [3], это не мешает провести качественный анализ полученных экспериментальных результатов, представленных на рис. 4.

Анализ возможных режимов течения в зазоре (рис. 5) показывает, что при вращении только одного цилиндра (наружного или внутреннего) в кольцевом зазоре реализуется или ламинарное течение Куэтта (вращается внешний цилиндр), или вихревое течение Тэйлора, теряющее устойчивость при увеличении числа Рейнольдса (вращается внутренний цилиндр). При оппозитном вращении цилиндров, например, с равными угловыми скоростями при тех же числах Рейнольдса, что и в случае вращении одного цилиндра, в кольцевом зазоре можно получить даже турбулентный режим течения, который позволяет максимально увеличить сдвиговые напряжения.

В случае мультицилиндровой конструкции при раздельном вращении «роторов» мы имеем некоторую комбинацию вращающихся наружных и внутренних цилиндров, то есть в этом случае мы имеем некоторую комбинацию режимов ASI и WVF, близких к ламинарному режиму.

При оппозитном вращении «роторов» мультицилиндровой конструкции с равными угловыми скоростями при сопоставимых числах Рейнольдса в нашем случае в кольцевых зазорах реализуется некоторая комбинация режимов AZI, IPS, WIS и, возможно, TRA. Для определения точной комбинации режимов течения для каждой заданной пары чисел Рейнольдса  $Re_i$  и  $Re_0$  необходимо провести экспериментальные исследования для мультицилиндровой конструкции с конкретными заданными параметрами.

Проведенный на основе карты режимов течения (рис. 5) качественный анализ полученных для мультицилиндровой конструкции экспериментальных результатов позволяет сделать вывод, что при оппозитном вращении в кольцевых зазорах реализуются режимы течения с более интенсивными сдвиговыми напряжениями, чем при раздельном вращении «роторов». Это обстоятельство и объясняет результаты экспериментов, приведенные на рис. 4.

Таким образом, можно заключить, что рассмотренная мультицилиндровая система Куэтта с оппозитно вращающимися «роторами» обладает большими потенциальными возможностями с точки зрения ее использования в качестве основного конструктивного компонента в устройствах, преобразующих механическую энергию вращения в тепловую энергию.

### Summary

*A.F. Serov, V.N. Mamonov, A.D. Nazarov.* Energy Liberation in the Flow of Fluid inside the Circular Couette System with Opposed Rotation of Cylinders.

The paper presents the design of a heat generator intended for efficient conversion of kinetic wind energy into thermal energy. The design is based on the circulation of the viscous working liquid in the system of cylindrical ring channels, which are formed by the “rotors” rotating opposite (towards) to each other. The results of experiments on measuring the heat capacity of heat generators in different operational modes are presented. The analysis of the obtained results is carried out.

**Keywords:** circular Couette system, oppositely (towards each other) rotating coaxial cylinders, conversion of kinetic energy into heat, heat generator, viscous liquid, flow regimes of viscous fluid in annular gaps.

### Литература

1. *Безруких П.П., Арбузов Ю.Д., Борисов Г.А. и др.* Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.

2. Концепция использования ветровой энергии в России / Под ред. П.П. Безруких. – М.: Книга-Пента, 2005. – 128 с.
3. *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.

Поступила в редакцию  
15.06.15

---

**Серов Анатолий Федорович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия.

**Мамонов Валерий Николаевич** – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия.  
E-mail: *tamonovvn@mail.ru*

**Назаров Александр Дмитриевич** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия.