

УДК 621.48

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЪЯРУСНОГО РОТОРА САВОНИУСА**

**Д.Н. ГОРЕЛОВ**

*Омский филиал Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН*

Приведены результаты экспериментального исследования двухъярусного ротора Савониуса с оптимальным соотношением геометрических характеристик в гидроканале в условиях практического отсутствия влияния границ потока. Установлено, что полезная мощность вырабатывается ротором в диапазоне изменения числа быстроходности от нуля до единицы, а максимальное значение коэффициента использования энергии потока достигает 20 %.

В 1931 г. Савониус предложил конструкцию вертикально-осевого ротора с S-образной формой лопастей. Несмотря на относительно низкий коэффициент полезного действия, ротор Савониуса представляет несомненный практический интерес. Обусловлено это такими его положительными качествами как простота и дешевизна конструкции, возможность работы при любом направлении ветра, а также большой пусковой аэродинамический момент. Эти качества ротора Савониуса делают его идеальным источником энергии малой мощности, в особенности для сельских районов.

Экспериментальному исследованию ротора Савониуса посвящено много работ. Наиболее полные результаты приведены в работе [1], в которой найдены оптимальные соотношения геометрических параметров ротора. В то же время испытания, проведенные в аэродинамических трубах, дали большой разброс в результатах исследований, что показывает существенное влияние ограниченности потока. Крутящий момент на валу ротора Савониуса создается за счет разного сопротивления при обтекании вогнутой и выпуклой частей лопастей. Поэтому естественно ожидать, что ротор Савониуса может создавать полезную мощность, если скорость вращения конца лопасти меньше скорости набегающего потока (число быстроходности меньше единицы). Однако в экспериментальных исследованиях в аэродинамических трубах (см., например, [1, 2]) диапазон числа быстроходности, при которых достигается положительный эффект, значительно шире. Более того, установлено существенное влияние коэффициента загромождения потока (отношения площади поперечного сечения модели к площади поперечного сечения рабочей части аэродинамической трубы). Изменение коэффициента загромождения с 5 % до 20 % может увеличить коэффициент использования энергии потока в два раза [1]. При этом максимум коэффициента использования энергии потока достигается при более высоком значении коэффициента быстроходности. Приведенные данные показывают, что результаты эксперимента в аэродинамических трубах следует оценивать очень осторожно. В качестве альтернативы таким исследованиям являются испытания моделей в гидроканале в условиях, при которых практически отсутствует влияние границ потока.

© Горелов Д.Н., 2005

С учетом сделанных замечаний основной целью настоящей работы является получение зависимости коэффициента использования энергии потока от числа быстроходности для двухъярусного ротора Савониуса, геометрические параметры которого имеют оптимальные значения, в условиях практически безграничного потока.

#### ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Объектом испытаний была модель двухъярусного ротора Савониуса, геометрические параметры которого соответствовали оптимальным соотношениям, приведенным в работе [1]. Ротор имеет концевые шайбы и центральную круглую шайбу, разделяющую ярусы. Ярусы расположены ортогонально друг к другу и состоят из одной S-образной лопасти, геометрические параметры которой приведены на рис. 1.

В соответствии с условиями эксперимента и рекомендациями [1], были выбраны следующие размеры:  $d = 0,01$  м,  $r = 0,068$  м,  $q = 0,015$  м,  $\theta = 135^\circ$ ,  $H = 0,35$  м,  $D = 0,26$  м,  $D_0 = 0,3$  м,  $S = D \cdot H = 0,091$  м<sup>2</sup>. Тогда  $q/r = 0,22$ ,  $H/D = 1,345$ , что мало отличается от рекомендованных значений для этих параметров 0,2 и 1,54 соответственно.

Модель ротора изготовлена из листовой стали. Ротор вращался электромотором. Вал ротора соединен с валом привода штангой, длина которой выбиралась таким образом, чтобы верхний край ротора отстоял от свободной поверхности воды на расстоянии не менее 0,2 м. Вся установка смонтирована на тележке, движущейся по рельсам в гидроканале длиной 70 м, шириной 6 м и глубиной 3 м.

Эксперимент проводился по методике, изложенной в статье [3]. В соответствии с этой методикой полезная мощность  $\Delta W$ , развиваемая ротором Савониуса, определялась как разность между мощностью  $W_0$ , теряемой в приводе без ротора, и мощностью  $W$ , затрачиваемой на вращение ротора в потоке  $\Delta W = W_0 - W$ . Коэффициент использования энергии потока  $\eta = \Delta W/W_f$ , где  $W_f$  — мощность потока, проходящего через поперечное сечение ротора ( $W_f = \rho v^3 S/2$ ). Все мощности, кроме  $W_f$ , определялись путем замера электрической мощности, подаваемой на электромотор привода.

Для проведения испытаний по этой методике необходимо выполнить определенные условия. А именно: скорость потока (движения тележки) должна быть такой, чтобы  $W < W_0$ . Кроме того, ее следует согласовать с частотой вращения ротора для получения нужного диапазона изменения коэффициента быстроходности от предельно малых значений до режима авторотации. При этом частота вращения ротора в эксперименте не должна превышать 60–70 об/мин., чтобы обеспечить ее визуальное измерение с помощью секундомера. С учетом всех условий скорость движения

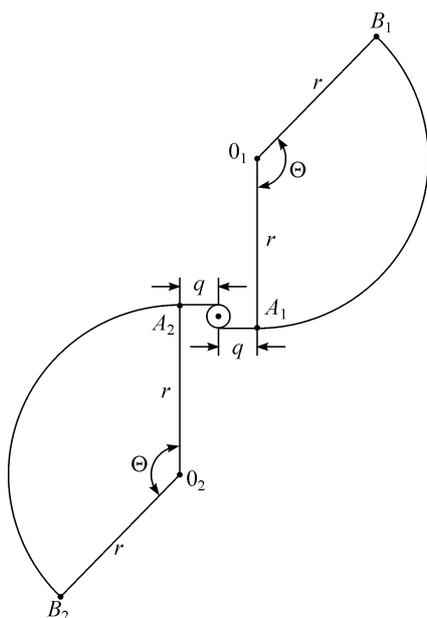


Рис. 1. Геометрические параметры ротора Савониуса.

тележки выбиралась равной  $v = 0,77$  м/с. Мощность потока, проходящего через поперечное сечение ротора при этой скорости, равнялась 20,8 Вт.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Первым шагом в эксперименте, в соответствии с методикой его проведения, является определение мощности, теряемой при работе электродвигателя на преодоление сил трения в приводе в рассматриваемом диапазоне частоты вращения ротора. Под приводом понимается вся установка без модели ротора. Иначе говоря, помимо самого привода (электромотора, редуктора, вала привода и подшипников) к нему следует подключить штангу, соединяющую вал привода с валом ротора. В эксперименте часть штанги оказывается в воде. Результаты этих испытаний представлены на рис. 2 (точки 1).

Вторым шагом стало определение мощности, затрачиваемой на вращение модели ротора в потоке. Соответствующие данные также приведены на рис. 2 (точки 2).

Полученные результаты показывают, что при вращении модели ротора с частотой  $n < 55$  об/мин мощность  $W$ , затрачиваемая на его вращение, оказывается меньше  $W_0$ , затрачиваемой на вращение привода. Это означает, что при вращении с частотой  $n < 55$  об/мин ротор вырабатывает положительную мощность  $\Delta W = W_0 - W$ .

Зависимость полезной мощности от частоты вращения позволяет получить основную характеристику ротора Савониуса — зависимость коэффициента использования энергии потока  $\eta = \Delta W/W_f$  от числа быстроходности  $z = \omega R/v$  (рис. 3).

Полученные в эксперименте результаты позволяют определить еще одну важную характеристику двухъярусного ротора Савониуса — коэффициент вращающего аэродинамического момента  $C_m$ . Вращающий аэродинамический момент  $M$  связан с полезной мощностью ротора  $\Delta W$  и мощностью потока  $W_f$  соотношениями:  $M\omega = \Delta W$ ,  $\Delta W = W_f\eta$ . Если представить вращающий момент  $M$  в виде  $M = \rho v^2 S R C_m / 2$ , где  $C_m$  — безразмерный коэффициент вращающего аэродинамического момента, то с учетом написанных формул  $C_m = \eta/z$ . Зависимость коэффициента  $C_m$  от коэффициента быстроходности  $z$  приведена на рис. 4.

Полученный экспериментальный материал и его сравнительная оценка с имеющимися данными других авторов позволяет сделать ряд выводов относительно энергетических характеристик ротора Савониуса.

1. Проведенное экспериментальное исследование показало, что максимальное значение коэффициента использования энергии потока для двухъярусного ротора Савониуса, геометрические параметры которого удовлетворяют оптимальным соотношениям, приведенным в работе [1], составляет 20 %. Это значение согласуется с известными экспериментальными данными.

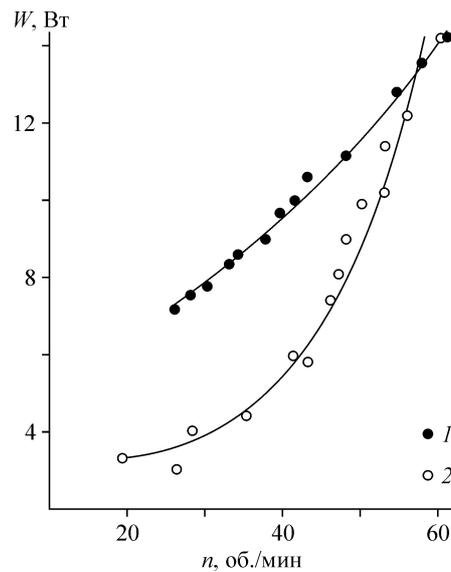


Рис. 2. Мощность, затрачиваемая на вращение привода (1) и ротора Савониуса в потоке (2).

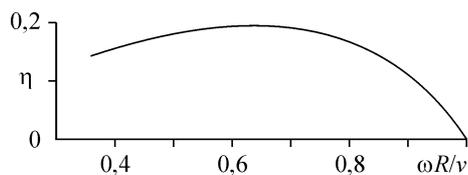


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования энергии потока от числа быстроходности.

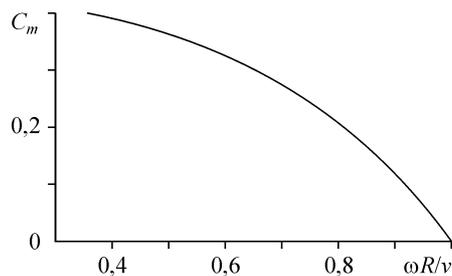


Рис. 4. Зависимость коэффициента крутящего момента от числа быстроходности.

2. Рабочий диапазон коэффициента быстроходности, в котором ротор Савониуса вырабатывает полезную мощность, лежит в пределах  $0 < z < 1$ . Максимальное значение коэффициента использования энергии потока достигается при  $z = 0,6 - 0,7$ , а при  $z = 1$  наступает режим авторотации.

3. Двухъярусный ротор имеет достаточно высокий уровень пускового аэродинамического момента, что должно обеспечивать самозапуск ротора (для одноъярусного ротора, по опубликованным данным, самозапуск может отсутствовать).

4. Экспериментальные результаты, представленные в настоящей работе, получены в условиях практически безграничного потока. Сравнение этих результатов с данными эксперимента в аэродинамической трубе для аналогичной модели двухъярусного ротора [1] показало существенное влияние ограниченности потока на энергетические характеристики ротора. Это проявляется как в увеличении коэффициента использования энергии потока, так и в расширении рабочего диапазона числа быстроходности. Если в безграничном потоке максимум коэффициента  $\eta$  достигается при  $z = 0,6 - 0,7$ , то в аэродинамической трубе этот максимум достигается обычно в окрестности  $z = 1$ .

#### ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$R, D = 2R, \text{ м}$  — радиус и диаметр ротора,

$H, \text{ м}$  — высота ротора,

$H/D$  — относительное удлинение ротора,

$S = HD, \text{ м}^2$  — площадь поперечного сечения ротора,

$D_0, \text{ м}$  — диаметр центральной шайбы ротора,

$d, \text{ м}$  — диаметр вала ротора,

$r, \text{ м}$  — радиус дуги окружности на криволинейном участке лопасти,

$q, \text{ м}$  — длина прямолинейного участка лопасти,

$\theta$  — центральный угол дуги окружности,

$\omega, \text{ рад/с}$  — угловая скорость вращения ротора,

$v, \text{ м/с}$  — скорость набегающего потока,

$\rho, \text{ кг/м}^3$  — плотность среды,

$z = \omega R/v$  — коэффициент быстроходности ротора,

$W_f = \rho v^3 S/2, \text{ Вт}$  — мощность потока,

$W, \text{ Вт}$  — мощность, затрачиваемая на вращение ротора в потоке,

$W_0, \text{ Вт}$  — мощность, затрачиваемая на вращение привода,

$\Delta W = W_0 - W, \text{ Вт}$  — полезная мощность ротора,

$\eta = \Delta W/W_f$  — коэффициент использования энергии потока, м,

$M, H\text{-м}$  — аэродинамический момент на валу ротора,

$C_m = 2M/(\rho v^2 SR)$  — коэффициент аэродинамического момента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моди, Фернандо.** Характеристики ветродвигателя Савониуса // Современное машиностроение. — 1989. — № 10. — С. 139–148.
2. **Огава, Есида, Екота.** Разработка систем управления частотой вращения ветродвигателя Савониуса // J. of Propulsion and Power. — 1987. — No. 6. — P. 481–493.
3. **Горелов Д.Н., Кузьменко Ю.Н.** Экспериментальная оценка предельной мощности ветроколеса с вертикальной осью вращения // Теплофизика и аэромеханика. — 2001. — Т. 8, № 2. — С. 329–334.

Статья поступила в редакцию 1 августа 2005 г.