

УДК 621.165

# ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОЛЬШЕШАГОВЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС ОСЕВЫХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН

А.Ю. Фершалов

*Дальневосточный государственный технический университет имени В.В. Куйбышева*  
Россия, Владивосток, Пушкинская 10

E-mail: [afresh@list.ru](mailto:afresh@list.ru)

**Ключевые слова:** газовая динамика, турбина, рабочее колесо.

Исследуются газодинамические характеристики рабочих колес (РК) осевых малорасходных турбин. Производится обработка экспериментальных замеров с целью получения доверительного интервала. Разрабатывается методика получения коэффициента скорости РК на основании имеющихся замеров. Производится выбор математических моделей регрессионного типа эффективности РК и угла выхода потока из него и выполняется их проверка на адекватность экспериментальным данным.

## Введение

Для транспортных систем часто обеспечение требований мобильности и автономности может достигаться турбоприводами с ограниченным расходом рабочего тела (РТ). Последние относятся к автономным подводным аппаратам, пневмоинструменту, приводу топливных насосов в авиации, беспилотным летательным аппаратам, автономным передвижным электростанциям и устройства турбонаддува дизелей. Это снижает необходимую площадь проходных сечений проточной части. Использование в таких турбинах ступеней с полным подводом РТ требует недопустимо малых высот рабочих лопаток, что вынуждает изготавливать сопловые аппараты с частичным подводом рабочего тела к рабочему колесу (парциальность). В результате происходят дополнительные потери энергии на вентиляцию в зоне неактивной дуги и на краях дуги подвода РТ. Одним из путей решения проблемы, связанной с парциальностью является использование СА с малыми конструктивными углами выхода из сопел в составе сверхзвуковых (высокоперепадных) малорасходных турбин (авторское свидетельство №857512, 1981г, Кириллов И.И., СПбГТУ). Подобное решение позволяет конструировать турбины с полным подводом РТ, и исключает потери, связанные с парциальностью. При конструировании малорасходных турбин неправомерно использовать стандартные методики проектирования их рабочих колес, так как для сохранения приемлемой толщ-

ны рабочего колеса лопатки выполняются с большим относительным шагом. Поэтому, для повышения эффективности малорасходных турбин, актуальны вопросы аэродинамического совершенствования и выбора оптимальных геометрических и режимных параметров проточных частей рабочего колеса с большим углом поворота потока. Целью работы является повышение эффективности сверхзвуковых осевых МРТ за счет оптимального профилирования РК с учетом режимных параметров ступени.

## 1. Разработка моделей регрессионного типа газодинамических характеристик рабочих колес.

Программа проведения теоретических исследований включает в себя исследование трех рабочих колес (таблица 1) в составе малорасходных турбинных ступеней и предполагает получение математически формализованных моделей, учитывающих влияние каждого исследуемого фактора на эффективность рабочих колес, для определения их оптимальной величины.

**Таблица 1.** Характеристики модельных рабочих колес.

Геометрические параметры РК	$PK - 1$	$PK - 2$	$PK - 3$
Средний диаметр, мм	170	170	170
Высота лопатки, мм	11.7	11.7	11.7
Количество лопаток, шт.	26	26	26
Угол входа	8.13	11.2	14.1
Угол выхода	8.44	12.15	15.35
Шаг лопаток РК, мм	20.54	20.54	20.54
Хорда профиля, мм	18.2	18.2	18.2
Ширина венца, мм	18.2	18.2	18.2
Ширина канала: в среднем сечении, мм	2.240	3.341	4.186
на входе, мм	2.401	3.483	4.499
на выходе, мм	2.634	3.817	4.934

Экспериментальные замеры, необходимые для проведения теоретических исследований, были получены на стенде, построенного на базе СПбГТУ. Стенд (рис. 1) предназначен для динамического и статического исследования малорасходных осевых турбин, работающих при больших перепадах давлений ( $\pi_T \leq 60$ ;  $t_0^* \leq 500^\circ$ ). С его помощью можно получать суммарные характеристики модельных ступеней в широком диапазоне изменения частот вращения РК ( $0 \leq n \leq 500c^{-1}$ ) перепадов давления ( $2 \leq \pi_T \leq 60$ ) путем изменения  $P_0^*$  от 0,2 до 0,8 МПа и  $P_2$  от 0,1 до 0,015 МПа.

Целью обработки результатов наблюдений является определение среднего значения из серии параллельных (в одних и тех же условиях) экспериментов с погрешностью, определяемой с 95% вероятностью. В связи с тем, что доверительные оценки средних значений основаны на гипотезе нормальности

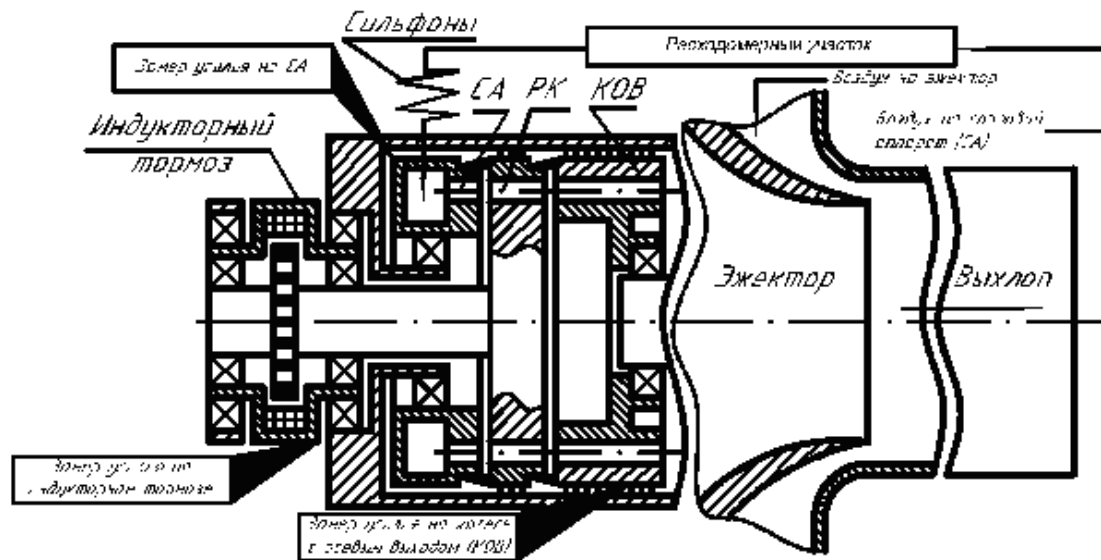


Рис. 1. Стенд

закона распределения случайных ошибок измерения, предположение о нормальности закона распределения является основой для анализа данных эксперимента при построении статистической теории. Разработано множество критериев для оценки справедливости принятых допущений о распределениях. Некоторые критерии справедливы лишь для определенных моделей, другие применимы для широкого круга распределений. Многие методы требуют точные знания каждого параметра статистической модели. Поскольку в нашей задаче параметры неизвестны, но должны оцениваться, такие критерии исключаются из рассмотрения. Остается лишь два метода: критерий  $W$  и критерий хи-квадрат. Критерий хи-квадрат можно использовать для проверки любого распределения, в том числе нормального. Однако для статистических моделей критерий  $W$  обычно является более мощным, т.е. он обеспечивает большую вероятность отбросить неправильную модель. Таким же образом при имение ограниченных данных для оценки справедливости допущения о нормальном законе распределения вместо хи-квадрат целесообразно использовать критерий  $W$ . В связи с тем, что в проведенном эксперименте число параллельных измерений было меньше 15 для проверки допущения о нормальности распределения целесообразно использовать критерий  $W$  [1]. Результаты проверки доказали принадлежность результатов наблюдений к нормальному закону распределения. После проверки принадлежности результатов наблюдений к нормальному закону распределения можно приступать к определению доверительного интервала по методике ОСТ 5.0511-78. Согласно этой методике необходимо определить доверительные границы случайной погрешности результата измерений и доверительные границы неисключенной систематической погрешности. В качестве границ неисключенной систематической погрешности принимают пределы допускаемых и дополнительных погрешностей средств измерений, пределы погрешностей поправок и пределы погрешностей, вызванных другими источниками. Для нахождения газодинамических характеристик РК разработана методика, основанная на находде-

нии характеристик рабочего тела за рабочим колесом посредством измерения крутящего момента. Параметры перед и за РК дают возможность нахождения коэффициента скорости РК и угла выхода потока в относительном движении. Методика основывается на уравнении состояния идеального газа и законах сохранения: момента количества движения, полной энергии и массы. Результатом эксперимента являются коэффициент скорости рабочего колеса и угол выхода потока из него, которые получены посредством решения по разработанной методике. В связи с тем, что исходные данные имеют погрешность, нахождение искомой функции сводится к решению задачи минимизации и максимизации функции. После определения максимума и минимума искомой функции находим их среднее арифметическое и принимаем его за математическое ожидание, а максимальное и минимальное значения, как доверительные интервалы функции. Газодинамические характеристики РК имеют функциональную связь с его геометрическими параметрами и режимом течения рабочего тела. Эта связь чрезвычайно сложна, поэтому первоначально была принята гипотеза о возможности аппроксимации линейным полиномом. Анализ технической литературы и графическая интерпретация результатов эксперимента показали несостоятельность этой гипотезы. На основании этого в основу получения аналитической зависимости коэффициента скорости РК и угла выхода потока из него была принята аппроксимация полиномиальной моделью второго порядка [2].

Коэффициент скорости РК:

$$\psi = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 b_{ji} x_i x_j$$

где:  $b_i, b_{ij}$  – коэффициенты полинома;

$x_1$  – угол входа потока в РК;

$x_2$  – конструктивный угол входа потока в РК;

$x_3$  – число Маха на входе в РК;

$x_4$  – характеристическое число.

Угол выхода потока из РК:

$$\alpha_2 = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^3 b_{ji} x_i x_j$$

где:  $b_i, b_{ij}$  – коэффициенты полинома;

$x_1$  – конструктивный угол выхода потока из РК;

$x_2$  – число Маха на выходе из РК;

$x_3$  – характеристическое число.

Коэффициенты вышеуказанных полиномов находятся методом наименьших квадратов на основании экспериментальных данных [3]. Проверка полученных регрессионных моделей подтвердила их адекватность экспериментальным данным. Это позволяет считать предложенные регрессионные модели адекватно отражающими реальные физические процессы в РК МРТ для исследованного диапазона по геометрическим и режимным параметрам. Максимальная погрешность расчетных значений коэффициента скорости РК достигала 12,4%. Максимальная погрешность расчетных значений угла выхода

потока из РК достигала 19,2%.

## Заключение

В результате проведенных исследований была произведена обработка экспериментальных замеров с целью получения доверительного интервала. Разработана методика получения коэффициента скорости РК на основании имеющихся замеров. Произведен выбор математических моделей регрессионного типа эффективности РК и угла выхода потока из него и выполнена их проверка на адекватность экспериментальным данным. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы (в рамках мероприятия 1.3.2 "Проведение научных исследований целевыми аспирантами").

## Список литературы

1. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах // М.: Мир.
2. Левенберг В.Д. Судовые малорасходные турбины. // Л.: Судостроение, 1976.-192 с.
3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий // Москва <Наука> - 1986.