

В. А. Григорьев, В. М. Радько, Д. С. Калабухов

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ТУРБОПРИВОДОВ ОСНОВНЫХ СХЕМ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Обоснована целесообразность проведения новых экспериментальных исследований для нахождения зависимостей критериев оценки эффективности малоразмерных турбоприводов и, в частности, турбоприводов сверхмалой мощности от режимных и геометрических параметров в диапазонах значений $\pi_T = 1,05...6$ и $Y_T = 0,1...0,6$. Разработан метод выбора влияющих факторов эксперимента, т.е. режимных и геометрических параметров, существенно влияющих на КПД, массовые и технико-экономические показатели турбин основных схем: осевой и центростремительной. *Планирование эксперимента; малоразмерный турбопривод; турбопривод сверхмалой мощности; влияющие факторы; режимные параметры; геометрические параметры; критерии оценки эффективности*

Малоразмерные турбоприводы (МТП) характеризуются широкой областью применения. Эти устройства используются на борту авиационных и космических летательных аппаратов, в их энергетических установках, а также в медицинском и технологическом оборудовании. Различают малоразмерные турбоприводы малой мощности ($N = 10...500$ кВт) и турбоприводы сверхмалой мощности ($N = 0,01...10$ кВт) [1]. При этом турбоприводы сверхмалой мощности обладают объективно пониженной эффективностью, заключающейся главным образом в довольно низких значениях КПД $0,1...0,6$. Пониженная энергетическая эффективность обусловлена такими особенностями турбоприводов этого типа, как низкие числа $Re < 10^5$, малые высоты лопаток, большие относительные величины толщин кромок лопаток, зазоров и шероховатостей. Однако турбоприводы сверхмалой мощности являются наиболее распространенным типом малоразмерных приводов ввиду их относительной малогабаритности, малой удельной массы и других особенностей, и поэтому вопрос о повышении их эффективности актуален. Под эффективностью будем понимать соответствие значений комплекса энергетических, массовых и технико-экономических критериев требуемому уровню. Поэтому к решению задачи оптимизации геометрических и режимных параметров ТПСММ как основного способа повышения их эффективности должен применяться многокритериальный подход [1]. В настоящее время данные о влиянии этих параметров на КПД турбоприводов сверхмалой мощности разных типов в рабочих диапазонах

значений степени понижения давления $\pi_T = 1,05...6$ и параметра нагруженности $Y_T = 0,3...0,6$ ограничены из-за особенностей классических экспериментов, в результате проведения которых эти данные были получены. Информация о влиянии параметров турбоприводов сверхмалой мощности на их массовые и технико-экономические показатели недостаточна. Определение зависимости критериев оценки эффективности от режимных и конструктивно-геометрических параметров аналитическим путем в настоящий момент не представляется возможным, поэтому целесообразна постановка новых экспериментальных исследований для нахождения этих зависимостей в указанных диапазонах π_T и Y_T с привлечением теории планирования эксперимента.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Проводимые ранее экспериментальные исследования ТПСММ представляли собой последовательность однофакторных экспериментов. В такой постановке все независимые переменные, кроме одной, считаются постоянными. Использование классического эксперимента для всестороннего исследования многофакторного процесса требует постановки очень большого числа опытов в отличие от факторного эксперимента (позволяющего варьировать одновременно несколько факторов в каждом опыте) при заданной точности конечных результатов. Кроме того, однофакторные эксперименты не позволяют учитывать всевозможные корреляции между варьируемыми факторами, а найденные частные одномерные или двумерные зависимости нельзя сводить в одну общую [2].

Применение последовательных однофакторных экспериментов может оправдываться отсутствием надежной априорной информации о виде искомым функциональных зависимостей при проведении исследований. К настоящему времени получены экспериментальные зависимости мощностного КПД от различных параметров осевых и центростремительных турбин, входящих в состав соответственно осевых и центростремительных турбоприводов. Эти зависимости, как правило, существенно нелинейны, близки к квадратичным. Также можно с уверенностью утверждать, что характер зависимостей массы и стоимости МТП от параметров турбины должен быть близок к линейному или квадратичному [3]. Эти сведения о характере искомым зависимостей делают возможным проведение факторного эксперимента.

Одним из достоинств факторного эксперимента является возможность упрощения обработки результатов измерений и получение данных в виде, удобном для обобщения и анализа [4]. Так, вместо уравнения, включающего многочисленные выражения для определения зависимости КПД эталонного турбопривода (ЭТП) и относительных частных КПД от независимых переменных по отношению к ЭТП, можно получить одно общее выражение для КПД, учитывающее основные факторы и взаимодействия.

По мере выявления новых данных о рабочем процессе в турбоприводах сверхмалой мощности и совершенствования технологий изготовления, их эффективность повышается, и ЭТП должен иметь уже другие параметры. Поэтому еще одним недостатком существующих методик расчета критериев энергетической эффективности является необходимость пересчета зависимостей относительных КПД по отношению к новому ЭТП. Трудоемкость этого процесса значительно выше трудоемкости пересчета коэффициентов в одной общей регрессионной зависимости.

2. МЕТОД ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МТП ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Различают термогазодинамические, режимные и геометрические параметры МТП. Значения термогазодинамических параметров, таких как расход рабочего тела G , давление рабочего тела на входе в МТП $p_{вх}^*$ или на входе в сопловой аппарат турбины p_0^* , соответствующие температуры $T_{вх}^*$ и T_0^* , как правило, явля-

ются исходными данными в задании на проектирование. Оптимизируемыми параметрами являются только геометрические и режимные, а значит, для составления плана эксперимента нужно проводить именно их выбор. Важно отметить, что вопрос о влиянии геометрических параметров входных и выходных устройств МТП на массовые и технико-экономические показатели турбопривода и на его КПД на настоящий момент слабо изучен. Кроме того, разнообразие типов нагружаемых агрегатов увеличивает сложность оценки эффективности турбоагрегатов, поскольку от вида нагрузки зависят выражения для оценки массогабаритных и технико-экономических показателей. Поэтому в качестве факторов плана эксперимента целесообразно принимать параметры малоразмерной турбины (МТ), входящей в состав МТП. Эти факторы должны удовлетворять требованию независимости.

Процедуру выбора параметров МТП можно разделить на два этапа: выбор собственно параметров, а затем выбор диапазонов значений этих параметров и конкретных значений из этого диапазона, соответствующих уровням варьирования плана эксперимента.

Рассмотрим первый этап процедуры выбора параметров. При планировании эксперимента следует проводить выбор параметров МТП исходя из следующего:

1. В качестве возможных варьируемых факторов эксперимента должны рассматриваться те параметры МТП, значительное влияние которых на энергетические критерии эффективности (мощностной КПД, удельный расход рабочего тела и др.) уже установлено.

2. Параметры, которые не влияют на энергетические критерии, но предположительно могут оказывать влияние на массовые и технико-экономические критерии, также должны быть включены в план эксперимента, если зависимости этих критериев от параметров априорно не являются линейными. В противном случае такие параметры заранее выбираются оптимальными по отношению к массовым и технико-экономическим критериям оценки эффективности.

3. Необходимо соблюдать условие независимости факторов, т. е. возможности установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов. Это условие предполагает проверку согласованности отобранных параметров и отсеивание «зависимых», линейно коррелированных параметров.

4. Все параметры МТП должны предполагать возможность их достаточно точного измерения в процессе эксперимента.

По завершению первого этапа выбора параметров МТП составляется оптимальный план эксперимента, исходя из рекомендаций [4], которые позволяют далее приступить ко второму этапу – выбору диапазонов варьирования факторов эксперимента, методика которого характеризуется следующей последовательностью действий:

- выбирается наиболее широкий диапазон варьирования некоторого фактора с опорой на данные проведенных ранее однофакторных экспериментов;

- рассматриваются все выражения, которые связывают выбранный фактор с остальными варьируемыми и неварьируемыми (контролируемыми) параметрами. Выбираются наиболее широкие диапазоны варьирования этих факторов и параметров;

- определяются значения величин факторов, соответствующих уровням варьирования плана эксперимента;

- исходя из матрицы планирования, рассматриваются все возможные комбинации уровней связанных между собой факторов. При этом факторы должны удовлетворять условию совместимости, т. е. осуществимости и безопасности комбинаций их уровней. Если, исходя из этого условия, один из ранее выбранных параметров не может быть варьируемым фактором из-за технических ограничений, то обосновывается и принимается либо его фиксированное значение, либо диапазон допустимых значений. Такой параметр будет контролирующим в плане эксперимента;

- проверяется, не выходит ли значение контролирующего параметра за диапазон его допустимых значений при каждой из возможных комбинаций уровней варьирования факторов;

- если значение контролирующего параметра хотя бы при одной комбинации уровней варьирования выходит за диапазон его допустимых значений, то изменяется диапазон варьирования того фактора, который, согласно представленным однофакторным зависимостям в [5–13], оказывает меньшее влияние на КПД турбины, чем остальные факторы; повторяется предыдущий пункт до тех пор, пока значения величин контролирующих параметров при всех комбинациях уровней варьирования рассматри-

ваемых факторов, не будут лежать в диапазоне его допустимых значений;

- если один из контролирующих параметров может принимать только целые значения (например, число лопаток), то для сохранения условия оптимальности плана эксперимента в связующем факторы и параметр уравнении должен фигурировать хотя бы еще один геометрический параметр или соотношение, коррекцией величины которого добиваются целого значения рассматриваемого параметра;

- повторить в общем случае перечисленные выше пункты для других варьируемых факторов.

Предложенный выше метод справедлив для любых видов и типов МТП. В данной работе реализация этого метода распространена на турбоприводы, а точнее, турбины сверхмалой мощности осевого и центробежного типов.

3. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОТСММ И ЦСТСММ КАК ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ ПЛАНИРУЕМОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В данном разделе описывается первый этап выбора параметров турбин сверхмалой мощности. Накопленный в течение многих лет изучения рабочего процесса турбин сверхмалой мощности различных типов экспериментальный материал [5–13] позволяет отобрать значимые факторы среди режимных и геометрических параметров. На величину КПД, удельного расхода и, предположительно, на массу, габариты и стоимость турбопривода влияние оказывают такие режимные параметры, как π_T и Y_T . Между собой они связаны следующим соотношением:

$$Y_T = \frac{u_1}{c_{1s}} = \frac{\pi D_{1(ср)} n \sqrt{z_{ст}}}{60 \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_0^* \left(1 - \frac{1}{\pi_T^k} \right)}}, \quad (1)$$

где u_1 , м/с – окружная скорость ротора на входе в РК; c_{1s} , м/с – изоэнтропическая абсолютная скорость потока на входе в РК; $D_{1(ср)}$, м – диаметр на входе в РК центробежной турбины (средний диаметр осевой турбины); n , об/мин – частота вращения ротора турбины; $z_{ст}$ – число ступеней турбины; k – показатель адиабаты рабочего тела; R , кДж/кг·К – универсальная газовая постоянная; T_0^* , К – температура на входе в СА турбины.

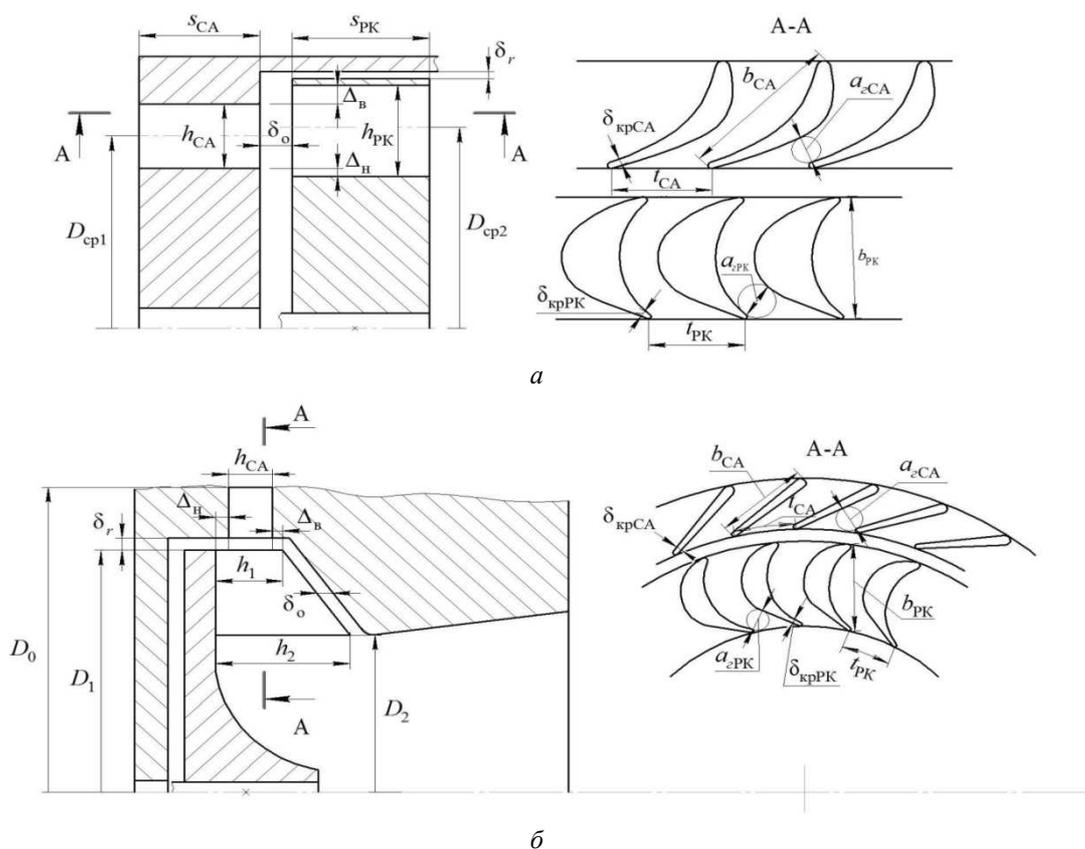


Рис. 1. Схемы ступени ТСММ и ее основные геометрические параметры:
 а – осевая ступень; б – центростремительная ступень

Параметр в процессе проведения эксперимента изменяется, так как необходимо оценивать эффективность турбин в весьма широком диапазоне значений частоты вращения $n = (5 \dots 140) \cdot 10^3$ об/мин, характерном для турбин сверхмалой мощности [5]. Поскольку фактор масштабности существенно влияет на величину критериев оценки эффективности [5], в эксперименте необходимо варьировать $D_{1(ср)}$. Тогда из выражения (1) следует, что варьируются оба режимных параметра π_T и Y_T , так как изменение значения одного из них не приводит к одновременному изменению значения другого при произвольном n .

Остальные режимные параметры (приведенные скорости λ_{1s} и λ_{w2s} на выходе из СА и РК) однозначно определяются через π_T и Y_T , то есть они являются зависимыми параметрами.

Конфигурация проточной части ступени турбины характеризуется совокупностью геометрических параметров и их соотношений. На рис. 1 приведены конструктивные схемы од-

ноступенчатых турбин осевого и центростремительного типов, и их основные геометрические параметры.

Перечислим основные геометрические соотношения – безразмерные параметры, используемые при проектировании турбины (или ее ступени в случае многоступенчатой турбины). Соотношения для турбин осевого типа, аналогичные по смыслу соотношениям для турбины центростремительного типа, приведены в скобках.

$\alpha_{1\text{эф}}$ – эффективный угол выхода потока из СА;

$\beta_{2\text{эф}}$ – эффективный угол выхода потока из РК;

$\frac{h_{CA}}{D_{1(ср)}}$ – относительная высота решетки СА

(лопатки или сопла);

ε – степень парциальности;

$\frac{a_{2CA}}{D_{1(ср)}}$ – относительное горло канала СА;

$\frac{a_{2\text{ РК}}}{D_{2(\text{ср})}}$ – относительное горло канала РК;

$\bar{D} = \frac{D_2}{D_1}$ – отношение выходного диаметра

РК к его входному диаметру;

$\bar{h}_{\text{РК}} = \frac{h_2}{h_1}$ – отношение высоты лопатки на

выходе из РК к высоте на входе в него;

$\bar{F}_{\text{РК}} = \frac{F_2}{F_1} = \bar{D}\bar{h}_{\text{РК}}$ – отношение площади на

выходе из РК к площади на входе в РК;

$(b/t_{\text{ср}})_{\text{СА (РК)}}$ – густота решетки СА (РК);

$\bar{\delta}_{\text{кр СА(РК)}} = \frac{\delta_{\text{кр СА(РК)}}}{a_{2\text{ СА(РК)}}$ – относительная толщина

выходной кромки лопатки СА (РК);

$\bar{\Delta}_{\text{н}} = \frac{\Delta_{\text{н}}}{h_{\text{СА}}}$ – относительная величина нижней

перекрыши;

$\bar{\Delta}_{\text{в}} = \frac{\Delta_{\text{в}}}{h_{\text{СА}}}$ – относительная величина верхней

перекрыши;

$\bar{D}_M = \frac{D_{1(\text{ср})}}{D_{1(\text{ср})\text{исп}}}$ – фактор масштабности, учи-

тывающий влияние отклонения величины диаметра $D_{1(\text{ср})}$ ступени от величины диаметра испытуемой ступени турбины $D_{1(\text{ср})\text{исп}}$ на ее эффективность;

$z^{\varepsilon=1}_{\text{СА}}$ – число межлопаточных или сопловых каналов СА при $\varepsilon = 1$;

$z^{\varepsilon=1}_{\text{РК}}$ – число межлопаточных или сопловых каналов РК при $\varepsilon = 1$;

Часть представленных соотношений ввиду малого разброса их возможных значений и заведомо слабого влияния на энергетическую эффективность турбины и линейного влияния на остальные критерии оценки эффективности следует принять постоянными и не включать в состав вектора влияющих факторов. Такими соотношениями являются $\bar{\delta}_o$, $\bar{\delta}_r$, $\frac{a_{2\text{ РК}}}{D_2}$, $\frac{s_{\text{РК}}}{h_{\text{РК}}}$,

$(b/t)_{\text{СА}}$ и $\bar{\delta}_{\text{кр СА(РК)}}$ у центростремительных турбин сверхмалой мощности [5, 6, 8].

Выбор факторов плана эксперимента среди геометрических параметров произведем, опираясь на результаты работ [5–13]. Для центростремительной турбины такими факторами долж-

ны быть $\frac{h_{\text{СА}}}{D_{1(\text{ср})}}$, $\frac{a_{2\text{ СА}}}{D_1}$, $\alpha_{1\text{эф}}$, ε , $(b/t_{\text{ср}})_{\text{РК}}$, \bar{D} , \bar{D}_M .

Эти факторы линейно независимы, оказывают существенное влияние на критерии оценки эффективности.

При этом авторы работы выяснили, что варьирование соотношением $a_{\text{г СА}}$ в случае факторной постановки эксперимента из-за конструктивных особенностей лопаточных венцов турбин и принципов построения матрицы плана эксперимента невозможно, либо нецелесообразно. Однако этот факт был выявлен только на втором этапе процедуры выбора параметров ТСММ.

Отметим, что такие важные при проектировании турбин сверхмалой мощности параметры, как $\bar{\Delta}_{\text{в}}$, $\bar{\Delta}_{\text{н}}$ и $\bar{F}_{\text{РК}}$ в работе [13] предлагается находить после проведения оптимизации с помощью аналитических выражений, составленных для определения оптимальных, с точки зрения обеспечения максимального КПД, значений $\bar{\Delta}_{\text{в}}$ и $\bar{\Delta}_{\text{н}}$. Эти выражения учитывают влияние ε , $\pi_{\text{т}}$ и $Y_{\text{т}}$ на $\bar{\Delta}_{\text{в}}$ и $\bar{\Delta}_{\text{н}}$. Такой подход в целом справедлив лишь в случае проведения однокритериальной оптимизации по КПД турбины и классической постановки многофакторного эксперимента. Но и в данном случае приходится применять схожий метод: определять оптимальные по КПД значения перекрыш для каждого из опытов с помощью известных регрессионных выражений [7, 11]. Зависимости КПД турбин сверхмалой мощности от относительных перекрыш невозможно описать полиномами степени ниже третьей во всем диапазоне допустимых значений $\bar{\Delta}_{\text{в}}$, $\bar{\Delta}_{\text{н}}$, что делает невозможным принятие последних в качестве влияющих факторов эксперимента при сохранении относительной простоты плана эксперимента и, соответственно, искомым математических моделей критериев. Поскольку из-за малых абсолютных величин перекрыш их изменение оказывает незначительное влияние на массу турбопривода, а стоимость его изготовления, вероятно, также практически не зависит от величины перекрыш, данный метод вполне допустим.

Что касается соотношения $\bar{F}_{\text{РК}}$, то, с одной стороны, оно весьма существенно влияет на все критерии оценки эффективности [8], особенно на технологичность изготовления РК, а значит, и стоимость турбопривода в целом. С другой стороны, известные зависимости КПД от $\bar{F}_{\text{РК}}$ можно описать полиномами четной степени

(в том числе и второй), поэтому следует включить это соотношение в число влияющих факторов эксперимента.

Анализ результатов работы [5] и вышеизложенные соображения позволяют заключить, что в качестве независимых переменных в случае осевой схемы следует принять параметры, аналогичные оптимизируемым параметрам турбины центростремительной схемы (т. е. с заменой D_1 на D_{cp}). В случае осевой схемы турбины $\bar{D} = 1$, поэтому вместо него состав вектора независимых переменных необходимо включить соотношение $\bar{\delta}_{кр\text{СА}}$, влияющее на КПД осевой турбины во всем диапазоне его возможных значений.

Целесообразным, на наш взгляд, является включение в состав вектора влияющих факторов еще одного геометрического параметра – эффективного угла выхода потока в относительном движении из РК $\beta_{2\text{эф}}$. Ранее он не использовался в качестве оптимизируемого параметра, поскольку в довольно большом диапазоне своих значений не оказывает существенного влияния на КПД при $Y_T < 0,4$. Но увеличение $\beta_{2\text{эф}}$ при некотором снижении КПД приводит к увеличению технологичности изготовления РК из-за уменьшения кривизны профиля [5], что указывает на наличие области рациональных значений этого параметра относительно указанных критериев. Интерес представляет и зависимость массы турбопривода от $\beta_{2\text{эф}}$.

Итак, общее число влияющих факторов плана эксперимента для получения математических моделей критериев оценки эффективности осевых и центростремительных одноступенчатых турбин сверхмалой мощности равно 10. Что касается многоступенчатых турбин, то число факторов возрастает в несколько раз, что значительно усложняет процесс проведения факторного эксперимента и искомых математических моделей.

Все выбранные параметры можно измерить в процессе проведения эксперимента. Однако точность их измерения напрямую зависит от типа тормозной установки, применяемой для испытаний турбин сверхмалой мощности, используемых датчиков и других средств измерения.

Ниже мы рассмотрим второй этап выбора параметров на примере выбора диапазонов и уровней варьирования факторами $\left(\frac{b}{t_{cp}}\right)_{PK}$, \bar{D} ,

$\beta_{2\text{эф}}$ и \bar{F}_{PK} , относящимися к РК одноступенчатых центростремительных турбин сверхмалой мощности.

4. ДИАПАЗОНЫ И УРОВНИ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРАМИ ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЫ СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ

В качестве плана эксперимента авторами был выбран ротатабельный ортогональный центрально-композиционный план [14] с разрешающей способностью IV и степенью дробности 1/64. План имеет пять уровней варьирования $-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$ с плечом $\alpha = 2,828$. Число опытов в плане равняется 100, он является ненасыщенным, то есть содержит избыточную информацию о модели. Эта информация при статистической обработке результатов эксперимента используется для оценки адекватности модели.

В работе [6] изучалось влияние параметра $\left(\frac{b}{t_{cp}}\right)_{PK}$ не только на КПД турбины, но и на трудоемкость изготовления лопаточного венца в диапазоне значений 1,2...2,2. Анализ представленных в ней графиков показал, что и для планируемого эксперимента целесообразно выделить отмеченный выше диапазон значений данного фактора.

Соотношение диаметров на входе и выходе \bar{D} в работе [13] варьировалось в диапазоне значений 0,404...0,909 при $D_{исх} = 49,5$ мм. В нашем случае при $D_{исх} = 50$ мм следует варьировать фактор \bar{D} в диапазоне значений 0,4...0,9.

Фактор $\left(\frac{b}{t_{cp}}\right)_{PK}$ связан с факторами \bar{D} , \bar{D}_M

и $\beta_{2\text{эф}}$ следующим соотношением:

$$\left(\frac{b}{t_{cp}}\right)_{PK} = \bar{D} \frac{1 - \bar{D}}{1 + \bar{D}} \cdot \frac{\bar{D}_M D_{исх} \sin \beta_{2\text{эф}}}{a_{PK}}. \quad (2)$$

В работе [12] описано экспериментальное исследование влияния эффективного угла выхода потока из РК $\beta_{2\text{эф}}$ на КПД центростремительной турбины сверхмалой мощности в диапазоне значений 15...90°. Было обнаружено, что коэффициент скорости в РК ψ_{PK} принимает максимальное значение при $\beta_{2\text{эф}} = 25^\circ$, но в то же время, при значениях $\pi_r < 4$ КПД турбины со-

храняется примерно постоянным в диапазоне значений $\beta_{2\phi} = 15...60^\circ$. К тому же, увеличение угла $\beta_{2\phi}$ упрощает изготовление лопаточных венцов РК. Поэтому в эксперименте представляется целесообразным варьировать фактор $\beta_{2\phi}$ в диапазоне значений $15...60^\circ$ с целью определения рациональных областей значений этого параметра по критериям оценки эффективности ТСММ.

Величина горла канала РК по соображениям технологичности и экономичности может меняться в пределах значений $a_{\text{РК}} = 1...5$ мм. Таким образом, параметр $a_{\text{РК}}$ является в плане эксперимента контролирующим. При этом значение параметра $a_{\text{РК}}$ корректируется для обеспечения целого числа лопаток $z_{\text{РК}}$. Проверим с помощью выражения (2), не выходят ли его значения за обозначенный диапазон при всех воз-

можных комбинациях уровней варьирования рассматриваемых факторов. Результаты проверки сведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что в некоторых опытах значения контролирующего параметра выходят за пределы допустимых (они отмечены жирным шрифтом). Увеличить или уменьшить $a_{\text{РК}}$ можно путем соответствующего уменьшения или увеличения числа лопаток РК. В табл. 2 приведены исходные и скорректированные значения $a_{\text{РК}}$ и $z_{\text{РК}}$ для таких опытов.

При проведении эксперимента фактор $\left(\frac{b}{t_{\text{cp}}}\right)_{\text{РК}}$ варьируется в опытах путем изменения $t_{\text{cp}}_{\text{РК}}$, а $\beta_{2\phi}$ выдерживается постоянным с помощью изменения $a_{\text{РК}}$ (рис. 2).

Таблица 1

Фрагмент матрицы планирования РОЦКП, включающий параметры РК центростремительной турбины сверхмалой мощности		$\left(\frac{b}{t_{\text{cp}}}\right)_{\text{РК}}$		$\beta_{2\phi}$		\bar{D}_M		$a_{\text{РК}}$, мм	$z_{\text{РК}}$
\bar{D}									
-1	0,488	1	2,023	1	52,04	1	1,388	4,66	18
1	0,812	-1	1,377	-1	22,96	1	1,388	1,684	41
-1	0,488	1	2,023	1	52,04	-1	0,612	2,055	18
1	0,812	-1	1,377	-1	22,96	-1	0,612	0,743	41
-1	0,488	-1	1,377	-1	22,96	1	1,388	3,459	12
1	0,812	1	2,023	1	52,04	1	1,388	2,288	61
-1	0,488	-1	1,377	-1	22,96	-1	0,612	1,525	12
1	0,812	1	2,023	1	52,04	-1	0,612	1,009	61
-1	0,488	-1	1,377	1	52,04	-1	0,612	3,082	12
1	0,812	1	2,023	-1	22,96	-1	0,612	0,499	61
-1	0,488	-1	1,377	1	52,04	1	1,388	6,991	12
1	0,812	1	2,023	-1	22,96	1	1,388	1,132	61
-1	0,488	1	2,023	-1	22,96	-1	0,612	1,017	18
1	0,812	-1	1,377	1	52,04	-1	0,612	1,501	41
-1	0,488	1	2,023	-1	22,96	1	1,388	2,306	18
1	0,812	-1	1,377	1	52,04	1	1,388	3,404	41
$-\alpha$	0,4	0	1,7	0	37,5	0	1	3,187	12
α	0,9	0	1,7	0	37,5	0	1	0,852	101
0	0,65	$-\alpha$	1,2	0	37,5	0	1	3,656	17
0	0,65	α	2,2	0	37,5	0	1	1,942	32
0	0,65	0	1,7	$-\alpha$	15	0	1	1,057	25
0	0,65	0	1,7	α	60	0	1	3,537	25
0	0,65	0	1,7	0	37,5	$-\alpha$	0,4	0,994	25
0	0,65	0	1,7	0	37,5	α	1,6	3,978	25
0	0,65	0	1,7	0	37,5	0	1	2,486	25

Фактор, учитывающий отношение площади на выходе из РК к площади на входе $\bar{F}_{\text{РК}}$ представляет собой произведение уже рассмотренного соотношения \bar{D} и отношения высоты лопатки на выходе из РК к высоте лопатки на входе в него $\bar{h}_{\text{РК}}$. В работе [8] изучено как влияние $\bar{h}_{\text{РК}}$ на КПД турбины, так и $\bar{F}_{\text{РК}}$. Но параметр $\bar{h}_{\text{РК}}$ связан с фактором \bar{D} значением коэффициента $\psi_{\text{РК}}$ и углами потока на входе β_1 и выходе β_2 из РК, т.е. кинематикой потока, которая не является известной до проведения эксперимента. В то же время параметр $\bar{F}_{\text{РК}} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2 \psi_{\text{РК}}}$, поэтому задание $\bar{F}_{\text{РК}}$ как варьируемого фактора эксперимента не требует при анализе его связи с фактором \bar{D} знания значений названных кинематических параметров.

Таблица 2

$a_{2\text{РК исх}}, \text{ мм}$	$z_{\text{РК исх}}$	$a_{2\text{РК кор}}, \text{ мм}$	$z_{\text{РК}}$
0,743	41	1,015	30
0,499	61	1,015	30
6,991	12	4,935	17
0,852	101	1	86
0,994	25	1,035	24

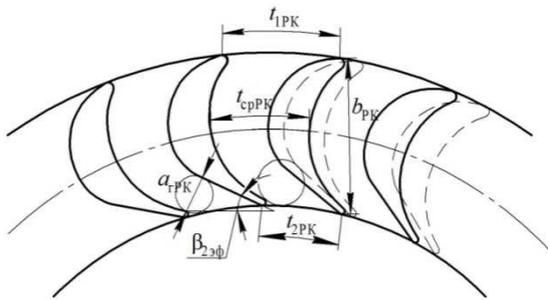


Рис. 2. Варьирование фактором $\left(\frac{b}{t_{\text{cp}}}\right)_{\text{РК}}$ путем изменения $t_{\text{cp РК}}$ и $a_{2\text{РК}}$

На рис. 3 показано изменение геометрии меридионального сечения РК при одновременном варьировании факторами $\bar{F}_{\text{РК}}$ и \bar{D} .

Из [8] следует, что $\bar{F}_{\text{РК}}$ варьируется в широком диапазоне значений 0,65...3,3. Возможность варьирования фактором $\bar{F}_{\text{РК}}$ в данном диапазоне при проведении факторного эксперимента необходимо проверить с помощью контролирующего параметра плана эксперимента $\bar{h}_{\text{РК}}$,

который может принимать значения 1,5...4,5. Составим табл. 3, в которой укажем значения факторов $\bar{F}_{\text{РК}}$ и \bar{D} при различных комбинациях уровней их варьирования и соответствующие этим комбинациям значения $\bar{h}_{\text{РК}}$.

Таблица 3

\bar{D}		$\bar{F}_{\text{РК}}$		$\bar{h}_{\text{РК}}$
-1	0,488	1	2,831	5,801
1	0,812	1	2,831	3,486
-1	0,488	-1	1,118	2,291
1	0,812	-1	1,118	1,377
$-\alpha$	0,4	0	1,975	4,937
α	0,9	0	1,975	2,194
0	0,65	$-\alpha$	0,65	1
0	0,65	α	3,3	5,077
0	0,65	0	1,975	3,039

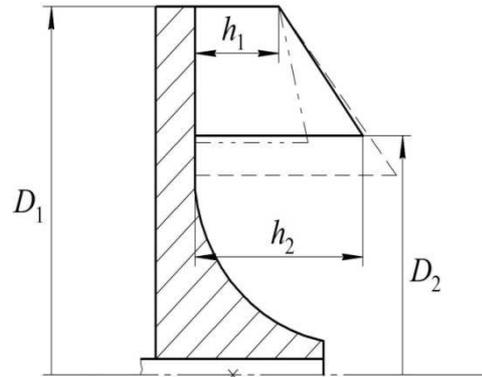


Рис. 3. Изменение геометрии меридионального сечения РК при одновременном варьировании факторами $\bar{F}_{\text{РК}}$ и \bar{D}

Из табл. 3 следует, что варьировать фактор $\bar{F}_{\text{РК}}$ в диапазоне значений 1,5...4,5 нельзя, поскольку значения параметра $\bar{h}_{\text{РК}}$ выходят за пределы допустимых (они выделены полужирным шрифтом). Наибольшее значение $\bar{h}_{\text{РК}}$ принимает при варьировании факторов \bar{D} и $\bar{F}_{\text{РК}}$ соответственно на нижнем и верхнем уровнях варьирования, а наименьшее – при варьировании $\bar{F}_{\text{РК}}$ на уровне «минус» α и \bar{D} в центре плана эксперимента.

Значение величины $\bar{F}_{\text{РК}}$ на верхнем уровне, при котором $\bar{h}_{\text{РК max}} = 4,5$ равно 2,196. Значение величины $\bar{F}_{\text{РК}}$ на уровне «минус» α , при котором $\bar{h}_{\text{РК min}} = 1,5$ равно 0,975. Величину $\bar{F}_{\text{РК}}$ на уровне α определим следующим образом:

$$\begin{aligned}\bar{F}_{PK\alpha} &= \frac{2\alpha\bar{F}_{PK1} - \bar{F}_{PK-\alpha}}{2\alpha - 1} = \\ &= \frac{2 \cdot 2,828 \cdot 2,196 - 0,975}{2 \cdot 2,828 - 1} = 2,458.\end{aligned}$$

Тогда значение \bar{F}_{PK} на нижнем уровне варьирования

$$\begin{aligned}\bar{F}_{PK-1} &= \bar{F}_{PK-\alpha} + \frac{\bar{F}_{PK\alpha} - \bar{F}_{PK-\alpha}}{2\alpha} = \\ &= 0,975 + \frac{2,458 - 0,975}{2 \cdot 2,828} = 1,237.\end{aligned}$$

Итак, принимаем следующие диапазоны варьирования факторов РК центростремительной турбины сверхмалой мощности и значения их величин на уровнях варьирования плана эксперимента:

$$\begin{aligned}\bar{D} &= 0,4 \dots 0,9 \quad (0,4; 0,488; 0,65; 0,812; 0,9); \\ \left(\frac{b}{t_{cp}}\right)_{PK} &= 1,2 \dots 2,2 \quad (1,2; 1,377; 1,7; 2,023; 2,2); \\ \beta_{2\phi} &= 15 \dots 60^\circ \quad (15^\circ; 22,96; 37,5; 52,04; 60^\circ); \\ \bar{F}_{PK} &= 0,975 \dots 2,458 \quad (0,975; 1,237; 1,716; 2,196; 2,458).\end{aligned}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ввиду особенностей рабочих процессов турбоприводов сверхмалой мощности основным способом их изучения является эксперимент. Поэтому требуется постановка новых экспериментальных исследований для нахождения зависимостей критериев оценки эффективности турбоприводов сверхмалой мощности от режимных и геометрических параметров турбин в диапазонах $\pi_t = 1,05 \dots 6$ и $Y_t = 0,1 \dots 0,6$. Обоснована целесообразность планирования факторного эксперимента.

Представлен общий метод выбора режимных и геометрических параметров малоразмерных турбоприводов различных типов при планировании эксперимента, показаны примеры его реализации в задаче выбора параметров турбин осевого и центростремительного типов при составлении ротататбельного ортогонального центрального композиционного плана.

Разработанный авторами метод выбора параметров малоразмерных турбоприводов способствовал разработке плана эксперимента, который минимизирует временные и материальные затраты на испытания турбин сверхмалой мощности, а также обеспечивает возможность получения достоверных и обоснованных ре-

зультатов в виде регрессионных зависимостей критериев оценки эффективности турбоприводов сверхмалой мощности от параметров – влияющих факторов эксперимента в выбранных диапазонах их варьирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ состояния проблемы повышения эффективности турбоприводов сверхмалой мощности и пути ее решения / В. А. Григорьев [и др.] // Авиационно-космическая техника и технологии. НАУ ХАИ. Х., 2010. № 7. С. 168–172.
2. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Адлер. М.: Наука, 1976. 279 с.
3. Матвеев В. Н. Исследование возможности улучшения массовых и габаритных характеристик бортовых энергетических установок космических аппаратов // Тр. IX Всесоюзн. конф. по микроэнергетике. Куйбышев: КУАИ, 1987. С. 114–117.
4. Гишваров А. С., Агеев Г. К. Исследования авиационных силовых установок с применением планирования эксперимента. Уфа: Уфим. гос. авиац. техн. ун-т, 2009. 216 с.
5. Наталевич А. С. Воздушные микротурбины. М.: Машиностроение, 1979. 192 с.
6. Матвеев В. Н., Сивиркин Д. В., Тихонов Н. Т. Влияние густоты рабочей решетки на экономичность центростремительных микротурбин с полным подводом рабочего тела // Вестник СГАУ. Серия: Актуальные проблемы производства. Технология, организация, управление. Самара: СГАУ. 1998. С. 63–66.
7. Матвеев В. Н., Сивиркин Д. В., Тихонов Н. Т. Обобщение экспериментальных исследований влияния перекрыш на КПД центростремительных микротурбин // Вестник СГАУ. Серия: Актуальные проблемы производства. Технология, организация, управление. Самара: СГАУ. 1998. С. 124–136.
8. Матвеев В. Н., Мусаткин Н. Ф. Выбор оптимальной величины соотношения высот лопаток на выходе и входе в закрытое рабочее колесо центростремительной микротурбины // Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей: сб. науч. тр. Куйбышев, 1986. С. 92–96.
9. Тихонов Н. Т., Пфайфле Э. Э. Совместное влияние высоты лопаток соплового аппарата и степени парциальности на экономичность осевой микротурбины // Известия вузов. Энергетика. Казань, 1989. № 3. С. 105–106.
10. Тихонов Н. Т., Пфайфле Э. Э. Влияние эффективного угла сопловой решетки на экономичность осевой микротурбины с полным впуском // Изв. вузов. Авиационная техника. Казань, 1989. № 1. С. 111–113.
11. Мусаткин Н. Ф., Тихонов Н. Т. Влияние верхней и нижней перекрыш на КПД парциальной

осевой микротурбины // Изв. вузов. Авиационная техника. Казань, 1979. № 3. С. 106–108.

12. **Тихонов А. Н., Калинина Н. Н., Тихонов Н. Т.** Экспериментальное исследование влияния конструктивного угла выхода потока из рабочего колеса на экономичность воздушной центробежной микротурбины // Изв. вузов. Энергетика. Казань, 1981. № 12. С. 92–94.

13. **Матвеев В. Н.** Метод проектного расчета многорежимных турбоприводов на базе центробежных микротурбин // Вестник СГАУ. Серия: Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Выпуск 3, часть 2. Самара, 1999. С. 14–19.

14. **Khuri A. I., Cornell J. A.** Response Surfaces: Designs and Analyses. Dekker, New York, 1987. 405 p.

ОБ АВТОРАХ

Григорьев Владимир Алексеевич, проф. каф. теории двигателей летательн. аппаратов, проректор по общ. вопр. Самарск. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. С. П. Королева (нац. иссл. ун-т), Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (КуАИ, 1970). Д-р техн. наук (СГАУ, 1998). Иссл. в обл. оптимизации рабочего процесса ВРД, автоматизации науч. исследований и испытаний ВРД.

Радько Владислав Михайлович, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик по эксплуатации летательн. аппаратов и авиац. двигателей (КуАИ, 1994). Канд. техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (СГАУ, 1997). Иссл. в обл. рабочих процессов малоразмерных турбоприводов.

Калабухов Дмитрий Сергеевич, асп. той же каф. Дипл. инженер-механик по эксплуатации летательн. аппаратов и авиац. двигателей (СГАУ, 2010). Иссл. в обл. рабочих процессов малоразмерных турбоприводов.