

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ РАЗМЕРОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПНЕВМОПРИВОДА НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО КПД

А. А. Шейпак

Реферат. В работе установлены основные размеры проточной части, влияющие на разброс КПД сверхзвуковых динамических приводов. Показано, что контроль качества изготовления целесообразно проводить посредством измерения основных размеров и оценки разброса КПД с помощью предварительно полученных регрессионных зависимостей.

Ключевые слова: сверхзвуковой динамический привод, разброс КПД, технологические допуски, планирование эксперимента

Введение

Рабочий процесс и характеристики динамического привода различных энергетических систем изучаются специалистами многих проектных и научных организаций. При проектировании динамического привода может быть использован инженерный опыт, накопленный при разработке регулирующих ступеней паровых турбин в судостроении и энергетике и некоторых типов турбин, применяемых в авиации для привода вспомогательных агрегатов.

Наиболее распространенным типом соплового аппарата для малоразмерных парциальных турбин является одиночные сопла с конической расширяющейся частью и цилиндрическим

косым срезом (сопло Лавалья), так как такая геометрия позволяет получить достаточную точность выполнения критического сечения и приемлемую эффективность проточной части. Это конструктивное исполнение соплового аппарата исключает заметный разброс по пропускной способности, поэтому в техническую документацию вносят, как правило, только одну величину: эффективный или мощностной коэффициент полезного действия (КПД). Основным элементом динамического пневмопривода является рабочее колесо в виде диска с лопатками. Развертка рабочего колеса и соплового аппарата представлены на рис. 1. Анализ геометрии проточной части позволяет наряду со строгим

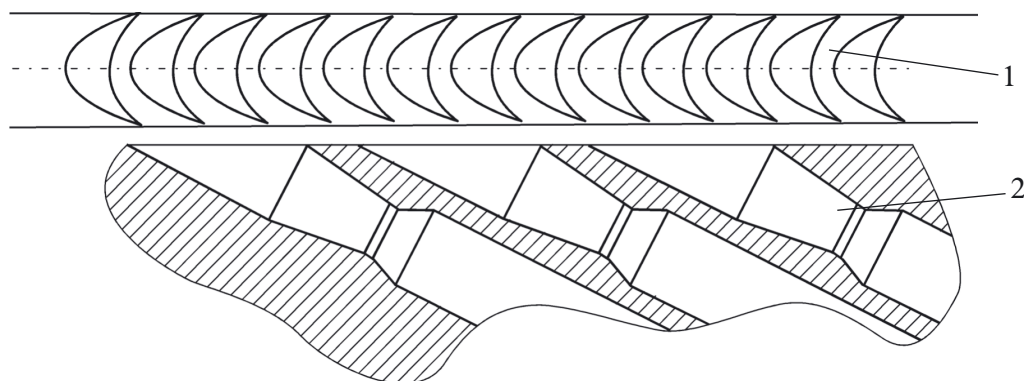


Рис. 1. Типовая решетка профилей:
1 – рабочее колесо; 2 – сопловой аппарат

определением «динамический пневмопривод» использовать термин «турбина», опуская название рабочего тела – «воздух».

Особенности рабочего процесса исследуемого динамического привода

Существенной особенностью рабочего процесса динамического привода является наличие системы нестационарных скачков уплотнения перед фронтом рабочей решетки и на выходе из нее. Внешние головные скачки уплотнения не только влияют на течение газа в межлопаточном канале рабочей решетки, но при некоторой толщине входной кромки воздействуют на распределение давлений и состояние пограничного слоя вдоль стенки сопла. В связи с этим было бы некорректно говорить о традиционном разделении потерь, рассматриваемом при расчетах турбин.

Если принять значение скоростного коэффициента соплового аппарата $\phi=0,90$ и скоростного коэффициента рабочей решетки $\psi=0,85$ для базового варианта турбины, получим распределение потерь при относительной скорости $U/C_0=0,20$ (U – окружная скорость на среднем диаметре турбины, м/с; C_0 – адиабатная скорость истечения газа, м/с). В распределении потерь

учитывались следующие показатели (табл. 1): экспериментальное значение КПД $\eta_{\text{экс}}$; расчетное значение КПД $\eta_{\text{расч}}$; относительные потери в сопловом аппарате ξ_c ; относительные потери в рабочем колесе ξ_k ; относительные потери с выходной скоростью $\xi_{\text{вых}}$; относительные потери на утечку $\xi_{\text{ут}}$; относительные потери на парциальный вход ξ_e .

Очевидно, что характеристики сверхзвуковых динамических приводов должны в заметной степени реагировать на величину толщины входной кромки рабочих лопаток ротора, определяющей интенсивность головных скачков уплотнения.

Формы входной кромки могут быть очень разными (рис. 2). Они определяются различной технологией изготовления ротора (литье или электроэрозия). Максимальные искажения носика обусловлены чрезмерной пескоструйной обработкой.

Эксперименты, проведенные с различными входными кромками рабочих лопаток, позволяют распространить на исследованный случай теорему о слабой зависимости гидравлических потерь от формы носика профиля, доказанную для гиперзвукового обтекания. Вследствие этого, в рабочих колесах малых размеров целесообразнее всего применять простые про-

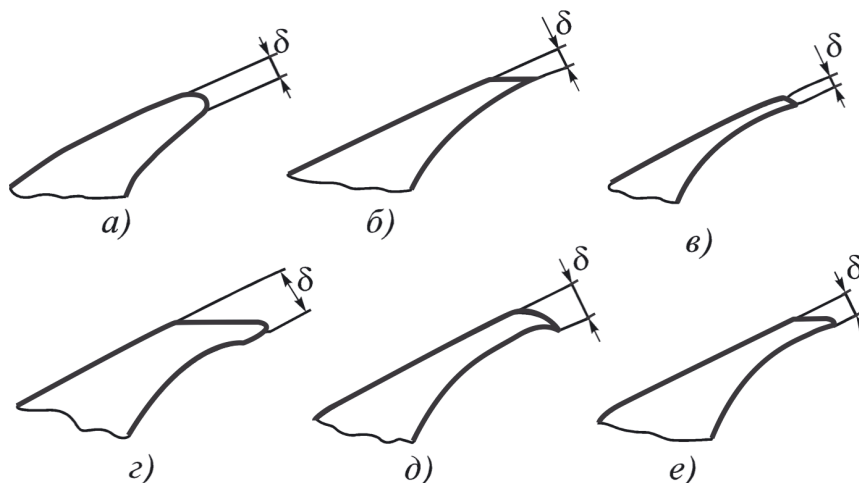


Рис. 2. Входные кромки рабочих лопаток ротора турбины различной формы и толщины δ

Таблица 1

КПД и распределение потерь для базового варианта турбины
при относительной скорости $U/C_0=0,20$

Параметры	КПД		Относительные потери				
	$\eta_{\text{экс}}$	$\eta_{\text{расч.}}$	ξ_c	ξ_k	$\xi_{\text{вых}}$	$\xi_{\text{ут}}$	ξ_e
Значения	0,42	0,41	0,19	0,14	0,18	0,04	0,04

фили, образованные дугами окружностей и прямыми линиями. Специальная профилировка, обеспечивающая ступенчатое торможение сверхзвукового потока, будет в силу малых абсолютных размеров и относительно большой толщины входной кромки менее эффективна, чем для паровых и газовых турбин больших размеров. Сопловой аппарат турбин обычно состоит из отдельных осесимметричных сопел с конической или профилированной расширяющейся частью.

Параметры динамического привода могут быть оптимизированы за счет рационального выбора геометрии проточной части, однако выигрыш для конкретных конструкций, как правило, получается незначительным.

Испытания пневмопривода методами пассивного планирования эксперимента

Неидентичность геометрии проточной части пневмопривода из-за технологических допусков на изготовление различных экземпляров динамического привода, выполненных по одним и тем же чертежам, приводит к существенным разбросам в величине КПД турбины. Особенно сильно технологические допуски сказываются на величине КПД при уменьшении масштаба турбины.

Для выяснения основных причин, вызывающих изменение КПД, следует детально проанализировать влияние различных геометрических размеров, определяющих проточную часть, на характер потока рабочего тела через турбину.

Такой анализ принципиально возможно провести, записав уравнение Навье–Стокса и граничные условия для вязкого сжимаемого газа в трехмерных каналах соплового аппарата и вращающегося рабочего колеса. В настоящее время решение такой задачи даже для современных ЭВМ затруднительно. Поэтому была сделана попытка решить ее методами, принятыми в теории планирования эксперимента.

Планирование эксперимента позволяет управлять экспериментом и проводить анализ его результатов при неполном знании механизма явления. Полные дифференциальные или интегродифференциальные уравнения, описывающие объект, при этом не записываются. Образно говоря, «оператором», решающим систему уравнений, является сам объект, причем решение получается в виде разложения в ряд неизвестного точного решения. Естественно, что одному и тому же разложению соответствует бесконечное множество исходных систем, так что восстановить исходную систему не представляется возможным. Наиболее простым способом является проведение пассивного эксперимента при произвольном изменении аргументов с применением аппарата регрессионного анализа для обработки его результатов. После этого можно наметить дальнейший ход экспериментов [1].

За основные размеры, технологические допуски на изготовление которых определяют возможный разброс КПД, были приняты (рис. 3):

- расстояние между рабочим колесом и сопловым аппаратом δ_0 , мм*;
- минимальное расстояние от центра оси

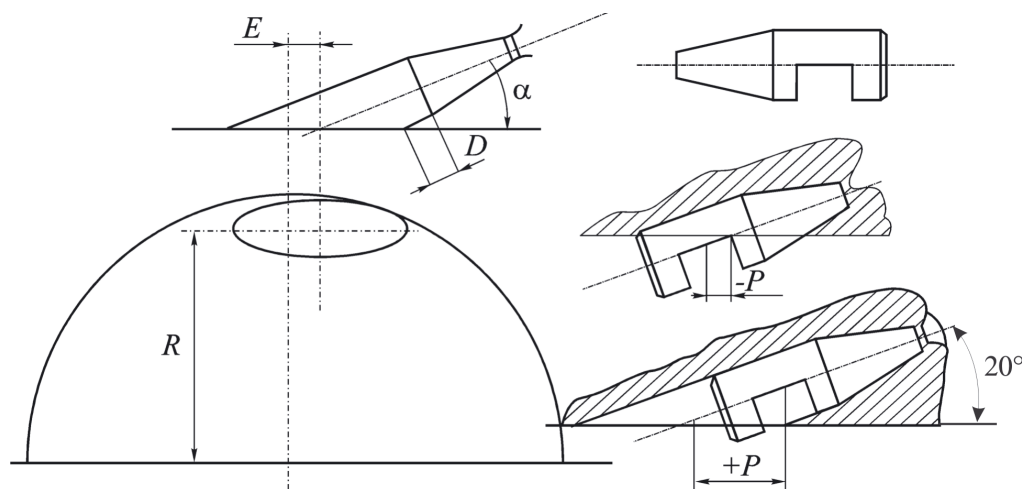


Рис. 3. Основные размеры турбины

*Параметр δ_0 устанавливается при сборке.

вращения до оси сопла R , мм;

- смещение центра сопла E , мм;
- минимальный размер цилиндрического участка сопла D , мм;
- угол установки сопла α , град;
- толщина входной кромки лопатки ротора δ , мм (см. рис. 2).

Из-за трудности непосредственного определения величины D (см. рис. 3) с помощью специального шаблона находилась линейно-зависящая от нее величина P :

$$P = D \cos 20^\circ + E(25 - 6/\tan 20^\circ) \cos 20^\circ.$$

Для удобства расчетов значение R масштабировано: $R = R_{\text{изм}} / 20$.

В ходе эксперимента было проведено измерения 84 экземпляров турбины, которые составили первую партию. Для анализа каждого параметра бралась разность его значения в каждой точке измерения и номинального значения. За номинальное значение принималось математическое ожидание той или иной величины. Отклонения геометрических размеров в этой партии в некоторых случаях заметно превышали допустимые чертежной документацией (табл. 2).

В качестве первого приближения было выбрано линейное уравнение

$$\eta = b_0 + b_1 \delta_0 + b_2 R + b_3 E + b_4 P + b_5 \delta + b_6 \alpha, \quad (1)$$

где $b_0 - b_6$ – коэффициенты регрессии (табл. 3).

Уравнение (1) записано в осредненных отклонениях параметров, т.е. величины переменных R , E , P , α представляют собой результат осреднения значений переменных для трех сопел.

Влияние на величину КПД всех факторов оценивается с помощью множественного коэффициента корреляции (МКК):

$$\text{МКК} = \sqrt{1 - (\sum (y - \bar{y})^2 / \sum (y - \bar{y})^2)},$$

где $\bar{y}$ – среднее значение КПД; $\bar{y}$ – значение КПД в соответствии с уравнением регрессии.

Если вклад, вносимый коэффициентами регрессии, равен нулю, то

$$\sum (y - \bar{y})^2 = \sum (y - \bar{y})^2 \text{ и } \text{МКК} = 0.$$

Если же уравнение регрессии полностью описывает результаты эксперимента, то

$$\sum (y - \bar{y})^2 = 0 \text{ и } \text{МКК} = 1.$$

МКК можно интерпретировать как меру линейной связи между экспериментально определяемыми значениями η и множеством всех независимых переменных. Частные коэффициенты корреляции между функцией η и аргументами в нашем случае имеют значения, приведенные в табл. 4.

Значительная корреляционная связь отмеча-

Таблица 2

Отклонения геометрических размеров для первой партии турбин

Размер	R , мм	α , град	δ , мм	δ_0 , мм	D , мм	E , мм
Значение	63,1	19°30′	0,59	2,4	-3,9	4,7
Среднее квадратическое отклонение	0,4	20′	0,13	0,6	2,6	3,9

Таблица 3

Коэффициенты регрессии для уравнения (1)

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
0,3319	-0,007460	0,1648	0,001678	0,0002908	-0,1080	0,002395

Таблица 4

Частные коэффициенты корреляции

$r\{\eta, \delta_0\}$	$r\{\eta, R\}$	$r\{\eta, E\}$	$r\{\eta, P\}$	$r\{\eta, \delta\}$	$r\{\eta, \alpha\}$
0,276	0,159	0,221	0,027	0,679	0,046

ется у δ ; заметная – у δ_0 , R , E ; более слабая – у α и P . МКК для уравнения (1) равен 0,719, что свидетельствует о хорошей аппроксимации при помощи линейного уравнения. Для определения влияния на КПД отдельных факторов был сделан ряд контрольных расчетов: уравнение (1) решалось каждый раз с последовательным исключением одного из аргументов. При этом МКК изменялся, как указано в табл. 5.

Из приведенных данных следует, что на КПД наибольшее влияние оказывает толщина входной кромки лопатки ротора. Анализ частных коэффициентов корреляции между аргументами уравнения (1) показал, что между величинами R , E , P , α существует заметная корреляционная связь. Поэтому уравнение (1) было дополнено членами с произведениями переменных, которые наиболее коррелированы

$$\eta = b_0 + b_1\delta_0 + b_2R + b_3E + b_4P + b_5\delta + b_6\alpha + b_7\delta_0R + b_8\delta_0E + b_9\delta_0\delta + b_{10}\delta_0\alpha + b_{11}RE + b_{12}RP + b_{13}R\alpha + b_{14}EP + b_{15}E\delta + b_{16}E\alpha + b_{17}P\alpha. \quad (2)$$

Для уравнения (2) МКК = 0,772.

Далее для улучшения представления поверхности отклика в уравнение регрессии были добавлены члены с переменными в более высоких степенях без осреднения величин E , P , α :

$$\eta = b_0 + b_1\delta_0 + b_2\delta_0^2 + b_3\delta_0^3 + b_4R + b_5R^2 + b_6R^3 + b_7E_1 + b_8E_1^2 + b_9E_2 + b_{10}E_2^2 + b_{11}E_3 + b_{12}E_3^2 + b_{13}P_1 + b_{14}P_1^2 + b_{15}P_2 + b_{16}P_2^2 + b_{17}P_3 + b_{18}P_3^2 + b_{19}\delta + b_{20}\delta^2 + b_{21}\delta^3 + b_{22}\alpha_1 + b_{23}\alpha_1^2 + b_{24}\alpha_1^3 + b_{25}\alpha_2^2 + b_{26}\alpha_2^3 + b_{27}\alpha_3 + b_{28}\alpha_3^2 + b_{29}\alpha_3^3, \quad (3)$$

где E_1 – E_3 – смещения центров сопел 1–3; P_1 – P_3 – величины, измеренные для сопел 1–3; α_1 – α_3 – углы установки сопел 1–3.

Несмотря на громоздкий вид уравнения (3), МКК возрос незначительно (до 0,774). Поэтому все значения аргументов были осреднены и добавлены члены с более высокой степенью R . Уравнение регрессии приняло тогда следующий вид:

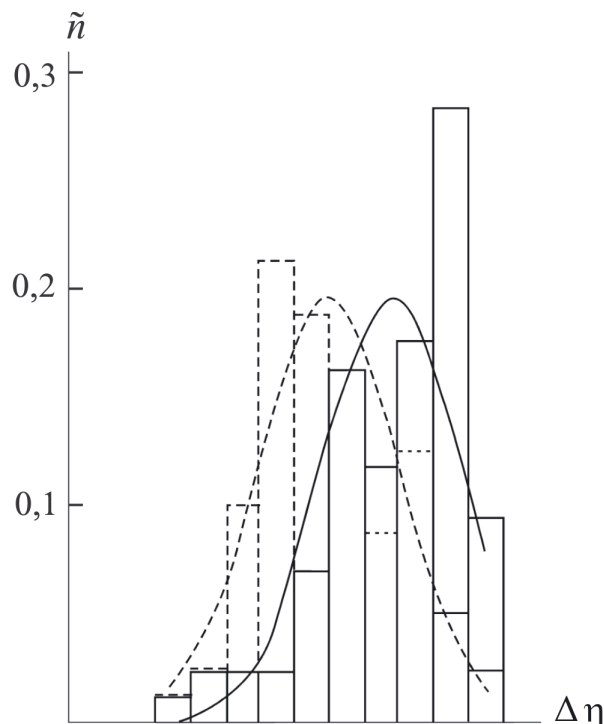


Рис. 4. Гистограмма КПД для двух партий турбин; — 1-я партия, $n=84$; ---- 2-я партия, $n=79$; $\tilde{\eta}=n_i/n$, где n_i – число турбин i -го диапазона изменения КПД, n – общее число турбин

$$\eta = b_0 + b_1\delta_0 + b_2\delta_0^2 + b_3R + b_4R^2 + b_5R^3 + b_6R^4 + b_7R^5 + b_8E + b_9E^2 + b_{10}P + b_{11}P^2 + b_{12}\delta + b_{13}\delta^2 + b_{14}\delta^3 + b_{15}\alpha + b_{16}\alpha^2 + b_{17}\alpha^3. \quad (4)$$

Для уравнения (4) МКК = 0,763. Значения МКК рассматриваемых уравнений свидетельствуют о достаточно хорошем представлении поверхности отклика с помощью полиномиальной зависимости.

Возможные значения отклонения аргумента и соответствующие этим отклонениям изменения КПД представлены в табл. 6.

По данным табл. 6 влияние наиболее значимого фактора – толщины входной кромки лопаток ротора – такое же, как и по эмпирическому уравнению, полученному другим путем [2]. После проведения анализа экспериментальных данных по партии из 84 турбин, технологический

Таблица 5

Изменение МКК при последовательном исключении аргументов уравнения (1)

Исключая δ_0	исключая R	исключая E	исключая P	исключая δ	исключая α
0,696	0,715	0,707	0,723	0,339	0,723

Таблица 6

Отклонения аргумента и изменение КПД для различных уравнений регрессии

Аргументы	Ур-е	δ_0 , мм	R , мм	E , мм	P , мм	δ , мм	α , град
Отклонение		+1	+1	+1	+1	+0,1	+1
Изменение КПД, %	(1)	-2,2	+2,5	+0,5	+0,1	-3,3	+0,7
Изменение КПД, %	(3)*	-1,5	+3	0,6	—	-2,8	+2,3
Изменение КПД, %	(4)	-1,9	+2,4	+0,5	—	-2,9	+0,69
Отклонение		-1	-1	-1	-1	-0,1	-1
Изменение КПД, %	(1)	+2,2	-2,5	-0,5	-0,1	+3,3	-0,7
Изменение КПД, %	(3)*	+0,65	-3	-0,6	—	+2,4	-2,1
Изменение КПД, %	(4)	+1,2	-2,4	-0,5	—	+2,4	-0,62
* В уравнении (3) вместо аргумента E используется E_2 , вместо $\alpha - \alpha_2$.							

процесс изготовления турбин был модернизирован для уменьшения разброса при выполнении определяющих размеров (факторов). Гистограмма КПД для следующей партии турбин ($n=79$) с улучшенной технологией изготовления значительно ближе к закону нормального распределения, а дисперсия значимо отличается от дисперсии предыдущей партии по критерию Фишера (рис. 4).

При применении классического регрессионного анализа и обработке результатов многофакторного пассивного эксперимента возникает целый ряд трудностей принципиального порядка. В нашем случае следует учитывать следующие обстоятельства.

1. Независимые переменные варьируют в очень узком интервале значений, и весьма сложно описать поверхность отклика полиномами высокого порядка по результатам измерений, проводящихся в окрестности одной точки.

2. При пассивном многофакторном эксперименте трудно оценить влияние ошибки эксперимента на точность представления результатов опыта принятой математической моделью.

3. Невозможно разделить эффекты влияния независимых переменных, которые попарно коррелированы.

В силу указанных причин после проведения вышеописанного регрессионного анализа пас-

сивного многофакторного эксперимента было принято решение провести ряд дополнительных исследований, результаты которых приведены далее.

Испытания пневмопривода методами активного планирования эксперимента

Влияние технологических допусков на параметры пневмопривода изучалось на экспериментальной односопловой машине (рис. 5) методами активного планирования эксперимента [1].

Этот пневмопривод является сверхзвуковой одноступенчатой воздушной турбиной с одиночным сопловым аппаратом: средний диаметр $D = 120$ мм; высота лопатки $l_p = 10$ мм; диаметр критического сечения сопла $d_{kp} = 5,6$ мм; диаметр выходного сечения сопла $d_a = 8$ мм. Конструкция турбины позволяет при помощи двух эксцентриков менять положение сопла относительно ротора (размеры R и E приведены на рис. 3). Возможный диапазон изменения положения центра сопла ограничен окружностью $r = 6$ мм с величинами $R = 60$ мм, $E = 5,5$ мм.

Первая серия экспериментов проводилась при значении осевого зазора $\delta_0 = 2,4 \pm 0,1$ мм; значения факторов взяты на границах области и в ее центре. Полученные величины КПД, приведенные к $U/C_0 = 0,13$, представлены

в табл. 7. Там же даны величины эмпирических среднеквадратических отклонений S КПД.

Из анализа данных табл. 7 видно, что в этом случае КПД зависит только от величины R . Для нахождения экстремума эмпирической функциональной зависимости был применен метод «золотого сечения». Результаты этих экспериментов при постоянных значениях осевого зазора $\delta_0 = 2,4$ мм и величины смещения $E = 5,5$ мм представлены в табл. 8.

Так как изменения КПД при изменениях радиуса на ± 1 мм незначительны, можно считать оптимальными значениями факторов следующие:

$$R = 60 \pm 1 \text{ мм}; E = 5,5 \pm 0,1 \text{ мм}; \eta = 0,286.$$

Физически положение оптимума определяется на основании простого геометрического факта: проекция газовой струи не должна выходить за пределы лопаток рабочего колеса.

Следующая серия экспериментов проводилась для величины осевого зазора $\delta_0 = 5,2 \pm 0,1$ мм (табл. 9).

В рассматриваемом случае КПД явно зависит от двух факторов: R и E . Для нахождения оптимума результаты эксперимента были представлены в виде полинома второго порядка:

$$\eta = a_0 + a_1 E + a_2 E^2 + a_3 R + a_4 R^2.$$

По данным табл. 9 коэффициенты имеют следующие значения:

$$a_0 = -5,664; a_1 = 0,002403; a_2 = -0,00001388; a_3 = 0,19567; a_4 = -0,001611.$$

Экстремум получен при

$$R = 60,7 \text{ мм}; E = 86,5 \text{ мм}.$$

Оптимальное значение E выходит за дости-

жимые границы. Поэтому следующая серия экспериментов была проведена в окрестности точки $R = 60$ мм, $E = 11,5$ мм. Результаты эксперимента приведены в табл. 10.

Экспериментальные значения КПД в табл. 10 незначимо отличаются друг от друга по критерию Стьюдента. Поэтому точка экстремума в данной серии экспериментов определяется следующими значениями параметров:

$$R = 60 \pm 1 \text{ мм}; E = 11,5 \pm 0,55 \text{ мм}; \delta_0 = 5,2 \pm 0,1 \text{ мм}; \eta = 0,301.$$

Физически, как и в случае $\delta_0 = 2,4$ мм, экстремум соответствует такому положению сопла, при котором проекция газовой струи не выходит за пределы лопаток рабочего колеса.

Результаты серии экспериментов при значении осевого зазора $\delta_0 = 0,9 \pm 0,1$ мм приведены в табл. 11.

Результаты этой серий экспериментов аналогичны результатам, представленным в табл. 9. Точка экстремума определяется следующими значениями параметров:

$$R = 60 \text{ мм}; E = 5,5 \pm 0,1 \text{ мм}; \delta_0 = 0,9 \pm 0,1 \text{ мм}; \eta = 0,304.$$

Проведенное исследование подтвердило результаты, полученные методом пассивного планирования эксперимента, и позволило уточнить количественное влияние параметров R , E и δ_0 на величину КПД динамического пневмопривода. При комбинации этих размеров, обеспечивающей работу турбины в области экстремума, разброс КПД из-за технологических допусков будет наименьшим.

Особенно сильное влияние размеров R , E и δ_0 наблюдается на динамических пневмопри-

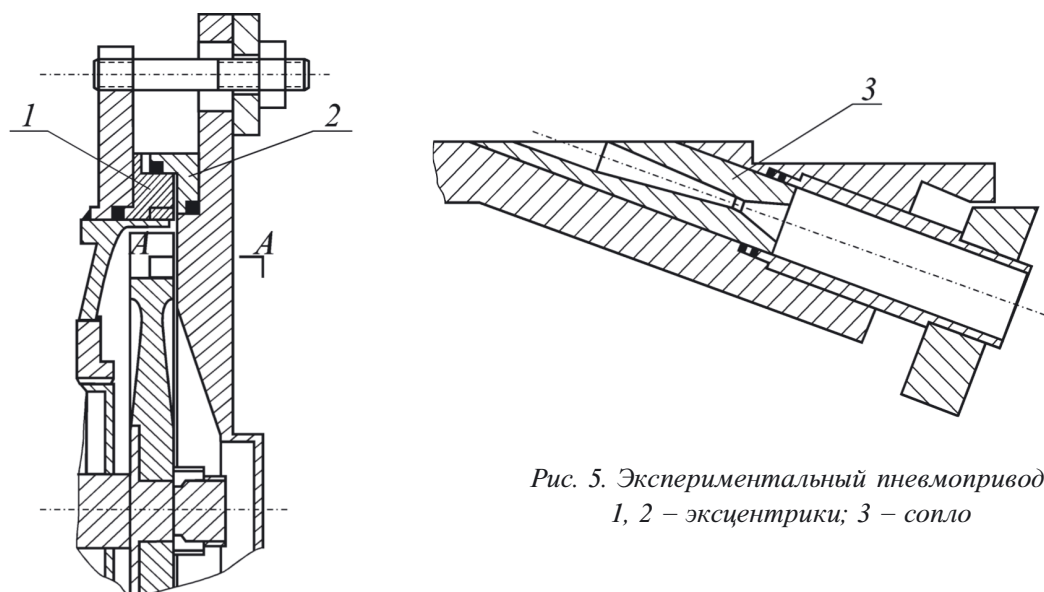


Рис. 5. Экспериментальный пневмопривод:
1, 2 – эксцентрики; 3 – сопло

Таблица 7

Среднеквадратические отклонения и КПД при $\delta_0 = 2,4 \pm 0,1$ мм

№	R, мм	E, мм	η	S
1	60	+ 5,5	0,288	0,005
2	66	+5,5	0,203	0,004
3	54	+ 5,5	0,148	0,002
4	60	- 0,5	0,283	0,005
5	60	11,5	0,290	0,006

Таблица 8

Среднеквадратические отклонения и КПД при $\delta_0 = 2,4$ мм

№	R, мм	η	S
1	60	0,288	0,005
2	54	0,148	0,002
3	66	0,203	0,004
4	62	0,277	0,008
5	61	0,280	0,007
6	59	0,291	0,003

Таблица 9

Среднеквадратические отклонения и КПД при $\delta_0 = 5,2 \pm 0,1$ мм

№	R, мм	E, мм	η	S
1	60	+ 5,5	0,291	0,005
2	66	+ 5,5	0,245	0,004
3	54	+ 5,5	0,217	0,005
4	60	- 0,5	0,275	0,003
5	60	+11,5	0,304	0,006

Таблица 10

Среднеквадратические отклонения и КПД в окрестности точки R=60 мм, E = 11,5 мм

№	R, мм	E, мм	η	S
1	58,5	11,1	0,299	0,007
2	61,5	11,1	0,301	0,007
3	60	11,5	0,304	0,007
4	59	11,3	0,304	0,006
5	61	11,3	0,305	0,007

Таблица 11

Среднеквадратические отклонения и КПД при $\delta_0 = 0,9 \pm 0,1$ мм

№	R, мм	E, мм	η	S
1	60	5,5	0,309	0,009
2	60	11,5	0,305	0,006
3	60	-0,5	0,300	0,003
4	66	5,5	0,192	0,002
5	54	5,5	0,156	0,005

водах, конструкция которых предусматривает так называемый внутренний перепуск для обеспечения расхода воздуха на вспомогательные устройства. Перепуск осуществляется за счет большого радиального зазора и неравенства средних диаметров рабочего колеса и соплового аппарата (97,5 мм и 100 мм соответственно). В этом случае небольшие изменения размера E приводят к заметным изменениям КПД (отклонение величины смещения за пределы допустимого было вызвано уводкой соплового аппарата при сварке и последующей торцовкой под заданный осевой зазор).

Заключение

В результате исследований были установлены основные размеры проточной части сверхзвуковых динамических пневмоприводов, влияющие на разброс КПД. Контроль качества изготовления целесообразно проводить посредством измерения основных размеров и оценки

разброса КПД с помощью предварительно полученных регрессионных зависимостей методами планирования экспериментов.

Методы планирования эксперимента нашли широкое применение при анализе химических и биологических процессов. Настоящая работа показывает перспективность этих методов для контроля качества изделий машиностроения.

Список литературы

1. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
2. Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод: учебник. Ч. 2. Гидравлические машины и гидропневмопривод / Под ред. А.А. Шейпака. 5-е изд. – М.: МГИУ, 2008. – 352 с.
3. Паровые и газовые турбины: учеб. для вузов / М.А. Трубилов, Г.В. Арсеньев, В.В. Фролов и др.; под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 351 с.

**ШЕЙПАК
Анатолий
Александрович**

E-mail: asheyp@mail.msiu.ru
Тел. +7 (495) 677-88-30

Доктор технических наук, профессор кафедры электротехники, теплотехники, гидравлики и энергетических машин МГИУ. Академик Российской академии транспорта, профессор и действительный член Международной академии наук Сан-Марино, действительный член Международной академии наук и искусств. Заместитель председателя Научно-методического совета по теплотехнике, член Научно-методического совета по механике и председатель Научно-методической комиссии по гидравлике Министерства образования и науки Российской Федерации. Специалист в области термодинамики и теплотехники, гидравлических и тепловых машин различного назначения. Автор более 200 работ, в том числе трех монографий, учебника, 40 изобретений.

Материал поступил в редакцию 06.07.2009