

УДК 622.24.054.32

Параметрическая оптимизация проточной части высокоскоростного турбобура

Д.Г. Свобода, В.А. Щур, Д.И. Сидоркин, А.А. Куншин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Parametric optimization of flow part of high-speed turbodrill

D.G. Svoboda, V.A. Shchur, D.I. Sidorkin, A.A. Kunshin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Приведены результаты исследований по параметрической оптимизации проточной части гидравлической турбины высокоскоростного турбобура. Разработанная параметрическая модель использована как исходная для оптимизации геометрических параметров проточной части. Выполнены корреляционные исследования, позволившие определить параметры проектирования, которые оказывают наибольшее влияние на интегральные энергетические характеристики турбины, и они были заданы как входные параметры оптимизации. Проведена оптимизация проточной части с использованием прямых методов и суррогатной предсказательной метамодели. Получен существенный прирост эффективности проточной части турбобура.

EDN: EJNOVQ, <https://elibrary/ejnovq>

Ключевые слова: высокоскоростной турбобур, параметрическая модель, оптимизация проточной части, прямые методы, поверхность отклика, критерии оптимизации

The article presents the results of research on parametric optimization of the flow part of the hydraulic turbine of a high-speed turbodrill. The developed parametric model was used as an initial model for optimization of the flow part geometry. Correlation studies were performed, which allowed to determine the design parameters that have the greatest influence on the integral energy characteristics of the turbine and were set as input parameters for optimization. Optimization of the flow section using direct methods and a surrogate predictive model was carried out. A significant increase in the efficiency of the turbine flow part was obtained.

EDN: EJNOVQ, <https://elibrary/ejnovq>

Keywords: high-speed turbodrill, parametric model, optimization of flow part, direct methods, response surface, optimization criteria

Создание любого технического объекта включает в себя элементы оптимизации. Проектировщик стремится получить наилучшее решение среди всех возможных путем перебора вариантов конструкции гидромашин и геометрических параметров ее проточной части (ПЧ).

Цель работы — параметрическая оптимизация спроектированной ПЧ турбобура, направ-

ленная на улучшение его энергетических и интегральных характеристик и удовлетворяющая заданным критериям оптимизации [1–3].

Параметрическая ПЧ состоит из геометрической 3D-модели, таблицы размеров (параметров проектирования) и информации о взаимосвязях размеров. При изменении одного из параметров происходит автоматическое перестроение конфигурации модели и расчетной

сетки. Это позволяет, используя специализированные программы, проводить вариативное проектирование ПЧ в соответствии с выбранным оптимизационным алгоритмом. Для каждого варианта геометрических параметров ПЧ выполняются численный расчет течения рабочей жидкости методами CFD, анализ результатов решения задачи и выбор следующего шага изменения параметров проектирования [4–6].

Сложность и эффективность решения задачи оптимизации определяется совокупностью следующих показателей: количеством параметров проектирования (числом переменных, определяющих размерность пространства параметров), типом и количеством наложенных ограничений, критериями оптимизации.

В связи с этим правильная параметризация исследуемой ПЧ является одним из важнейших факторов эффективности ее последующей оптимизации. Для лопастных гидромашин создание параметрической модели осложняется тем обстоятельством, что многие геометрические параметры ПЧ являются взаимосвязанными. Поэтому изменение в процессе оптимизации одних приводит к корректировке других [7].

При этом изменение разных параметров проектирования по-разному воздействует на энергетические параметры гидромашин. Степень этого влияния можно определить путем проведения корреляционных исследований по результатам прямых гидродинамических расчетов.

Алгоритм решения задачи оптимизации включает в себя следующие шаги:

- создание параметрической модели ПЧ;
- задание параметров расчетной математической модели, адекватно и качественно (с приемлемой погрешностью) описывающей рабочий процесс в гидромашине;
- определение тех геометрических параметров проектирования, которые являются наиболее значимыми, и задание их в качестве входных параметров оптимизации;
- определение выходных параметров и критериев оптимизации, которые будут заданы в качестве целевых функций;
- задание ограничивающих диапазонов изменения входных и выходных параметров;
- выбор наиболее быстродействующего и эффективного метода поиска экстремума (локального и глобального) целевой функции.

Объектом исследования являлась ПЧ высокоскоростного турбобура, который находит все

более широкое применение в качестве гидравлического привода забойного бурового оборудования [8, 9].

Турбобур представляет собой гидравлическую турбину, работающую на буровом растворе и создающую вращательный момент, передающийся на долото. Конструктивно турбобур включает в себя несколько турбинных секций, каждая из которых состоит из корпуса, статора и рабочего колеса (РК).

Поток промывочной жидкости (ПЖ) через бурильную колонну подается в первую ступень турбобура. Межлопастные каналы неподвижного статора выполняют функцию направляющего аппарата (НА), т. е. направляют поток ПЖ на лопасти РК турбины с необходимыми углом и скоростью. Энергия движущейся ПЖ создает силы, стремящиеся повернуть ротор, жестко связанный с валом турбины.

Очевидно, что углы установки лопаток НА и РК, а также расход ПЖ оказывают наибольшее влияние на создаваемый в турбобуре крутящий момент, который является важнейшим параметром бурового оборудования. При этом на практике применяются как низкомоментные высокооборотные турбины, так и высокомоментные низкооборотные [10]. Вопросы проектирования высокооборотных турбобуров, разработка математической модели и апробация созданных моделей рассмотрены в работах [11, 12].

Проведены численные исследования и определены параметры математической модели численного расчета течения и потерь вязкой жидкости в ПЧ первой ступени высокооборотной турбины методами CFD, которая позволяет с высокой точностью рассчитывать прогнозируемые характеристики турбины высокооборотного турбобура (с частотой вращения $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$) со средним диаметром $D = 197 \text{ мм}$. Разработана параметрическая модель ПЧ турбины, которую можно использовать как исходную для оптимизации ее геометрических параметров.

Для повышения эффективности оптимизационного процесса принято решение на те же параметры турбобура спроектировать более упрощенную параметрическую модель. Основой для ее создания явилось профилирование лопастной системы НА и РК турбинной секции в меридианной проекции (рис. 1).

Меридианная проекция ПЧ включала в себя следующие эскизы: Inlet — вход; Outlet — вы-

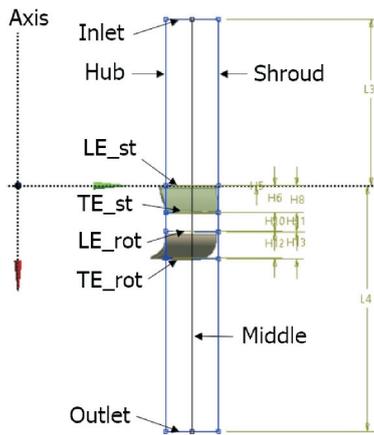


Рис. 1. Модель меридианной проекции ПЧ турбины

ход из расчетной области; Hub и Shroud — втулочная и периферийная линии тока; Middle — средняя линия тока (на расстоянии 0,5 размаха лопасти); эскизы, описывающие входную LE_st и выходную TE_st кромки лопасти НА; эскизы, описывающие входную LE_rot и выходную TE_rot кромки лопасти РК.

Для адекватного моделирования подвода и отвода ПЖ входную (Inlet) и выходную (Outlet) границы расчетной области размещали на достаточном удалении от лопастной системы — не менее чем на три ширины ПЧ.

Размеры H5, H6, H8 определяют положение кромок лопаток НА, размеры H11, H12, H13 —

положение кромок лопастей РК, а размер H10 — осевое расстояние между лопатками НА и лопастями РК. Эти параметры проектирования можно задавать как входные параметры оптимизации.

В целях повышения эффективности оптимизационного процесса расчетная модель не учитывала область радиального зазора в камере турбины.

Трехмерную ПЧ создавали в графическом редакторе DesignModeler с использованием специализированного инструмента FlowPath панели BladeEditor, предназначенной для работы с геометрическими параметрами лопастных турбомашин.

Создание профилей лопастей НА и РК выполняли с помощью инструмента Blade.

Вид профиля определяется законами изменения угла установки лопасти $\beta = f(S)$, угла охвата $\varphi = f(S)$ и толщины $\delta = f(S)$, где S — координата профиля вдоль линии тока. Эти графики строили по трем опорным точкам (на входной и выходной кромках, и средней точке, расположенной на расстоянии $S = 0,5S_{max}$) для трех линий тока (Hub, Shroud, Middle).

Графики геометрических параметров, построенные на периферийной линии тока, приведены на рис. 2.

Все обозначенные опорные точки графиков также могут быть заданы как входные параметры оптимизации.

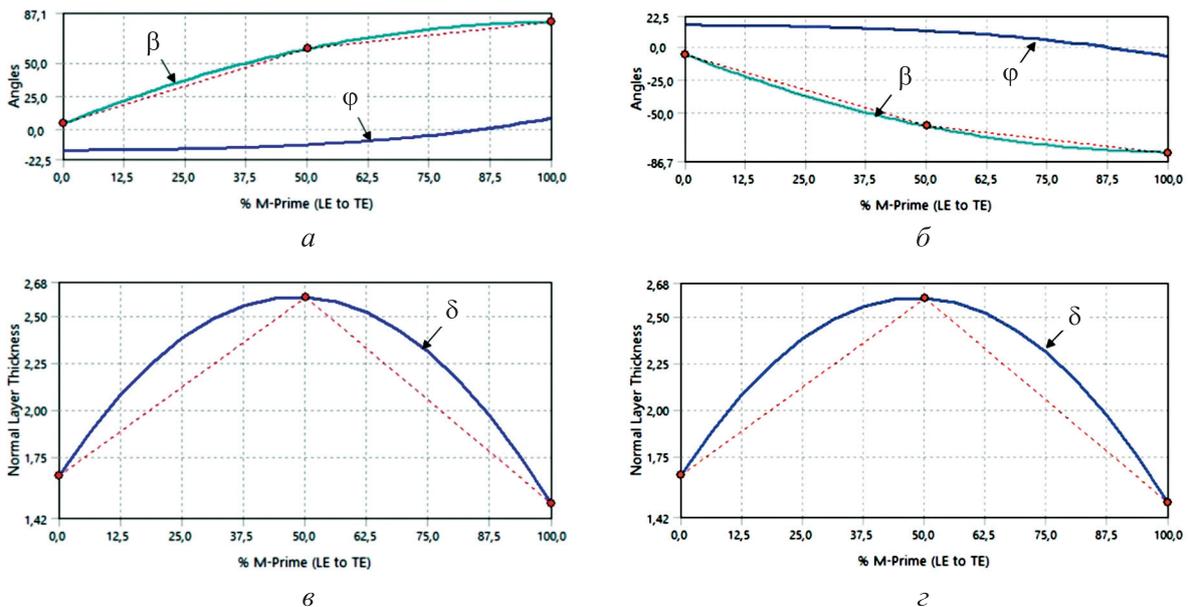


Рис. 2. Зависимости геометрических параметров от координаты профиля вдоль линии тока S: а и б — углы установки β и охвата φ , град, лопатки НА и лопасти РК соответственно; в и г — толщины δ , мм, лопатки НА и лопасти РК соответственно

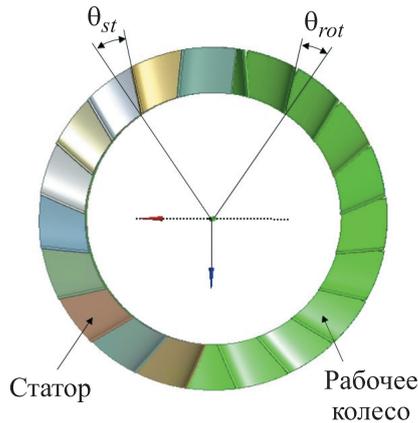


Рис. 3. Модель профилирования лопастей по углу охвата

В целях изменения радиального положения входной кромки лопасти в плоскости, перпендикулярной оси вращения, дополнительно выполнялся сдвиг профилей НА и РК вдоль линии тока на некоторый начальный угол θ_{st} и θ_{rot} (рис. 3). Это позволило обеспечить более плавное натекание потока ПЖ на входные кромки лопаток НА и лопастей РК.

Модель новой спроектированной лопастной системы турбобура приведена на рис. 4.

Лопастная система экспортировалась в сеточный генератор TurboGrid, где выполнялась дискретизация расчетной области. Для домена НА количество гексаэдрических элементов блочно-структурированной сетки составляло 123 000, для домена РК — 206 000.

Рассматривали разные варианты граничных условий на входе и выходе расчетной модели:

- на входе в расчетную область задавали статическое давление 766,0 кПа, на выходе — ста-

тическое давление 101,3 кПа, т. е. создавали перепад статического давления на турбине 664,7 кПа; расход ПЖ через турбину Q определяли по результатам численного расчета;

- на входе в расчетную область (Inlet) задавали массовый расход ПЖ через один межлопастной канал турбины в номинальном режиме ее работы, который был определен по результатам первого расчета $G = 4,89$ кг/с, а на выходе (Outlet) — статическое давление 101,3 кПа; перепад статического давления на турбине определяли по результатам численного расчета.

По результатам численного расчета для разных вариантов граничных условий математической модели получены значения интегральных параметров ступени турбины при среднем диаметре $D = 197$ мм и частоте вращения $n = 2500$ мин⁻¹, приведенные в табл. 1, где КПД — коэффициент полезного действия.

Из табл. 1 следует, что значения интегральных параметров турбины не зависят от варианта задания граничных условий. В первом варианте режим работы турбины определяется давлением на входе в турбину, во втором — подаваемым на турбину расходом ПЖ.

Анализ результатов численного расчета показал, что спроектированная ПЧ турбины имеет хорошие характеристики: крутящий момент $M_{кр} = 205,0$ Н·м; гидравлические КПД турбины $\eta_{г.т} = 85,7\%$, РК $\eta_{РК} = 90,3\%$ и НА $\eta_{НА} = 4,4\%$; мощность $N = 53,7$ кВт.

Очевидно, что геометрические параметры созданной ПЧ не являются оптимальными. Поэтому дальнейшее повышение энергетических характеристик турбины является актуальной задачей совершенствования турбобура.

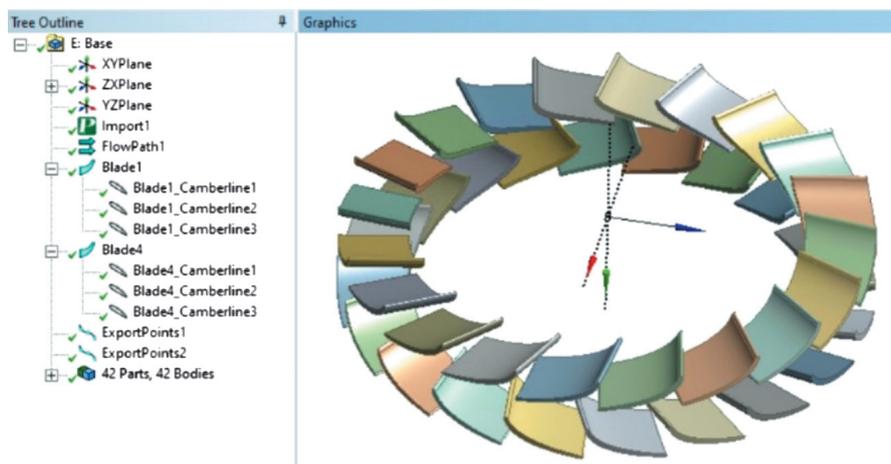


Рис. 4. Модель лопастной системы турбобура

Таблица 1

Параметры математической модели и результаты численных расчетов

Параметр	Значение для варианта граничных условий	
	1	2
Условие периодичности	Модель с условием периодичности	
Статическое давление на входе, кПа	766	–
Массовый расход ПЖ через один канал на входе, кг/с	–	4,89
Статическое давление на выходе, кПа	101,3	101,3
Объемный расход ПЖ через турбину, л/с	98,1	98,1
Тип анализа	Стационарный	
Модель турбулентности	<i>k-Eps</i>	<i>k-Eps</i>
Условие на интерфейсе	Осреднение по давлению	
Перепад статического давления, кПа:		
на РК	297,6	297,7
на турбине	651,0	651,0
Напор турбины, м	65,39	65,39
Крутящий момент, Н·м	205,3	205,3
Мощность, кВт	53,75	53,75
Гидравлический КПД, %:		
РК	90,38	90,38
турбины	85,69	85,70
Потери в НА, м (%)	3,040 (4,43)	3,039 (4,43)
Окружная скорость потока на периферии РК, м/с	18,97	18,97
Абсолютная скорость на входе НА, м/с	5,28	5,28
Отношение окружной скорости потока на периферии к абсолютной скорости потока на входе в НА, м/с	3,59	3,59
Быстроходность	124,3	124,3

Для описания геометрических параметров ПЧ турбины использовали следующие девятнадцать параметров проектирования (рис. 5):

- P1 (L_{na}) — длина НА в продольном (осевом) направлении (размер H15);
- P2 (L_{axial}) — осевое расстояние между лопастными системами НА и РК (размер H16);
- P3 (L_{rk}) — длина РК в продольном (осевом) направлении (размер H17).
- P4 ($Beta_{1h_{na}}$) — геометрический угол входной кромки лопатки НА на втулочной линии тока (рис. 6, а);
- P5 ($Beta_{2h_{na}}$) — геометрический угол выходной кромки лопатки НА на втулочной линии тока;

• P6 ($Beta_{mh_{na}}$) — геометрический угол в средней точке $\beta_{mh_{na}}$ (на расстоянии $S = 0,5S_{max}$, где S_{max} — максимальное значение S) лопатки НА на втулочной линии тока;

- P7 ($Beta_{1s_{na}}$) — геометрический угол входной кромки лопатки НА на периферийной линии тока;
- P8 ($Beta_{2s_{na}}$) — геометрический угол выходной кромки лопатки НА на периферийной линии тока;
- P9 ($Beta_{ms_{na}}$) — геометрический угол в средней точке (на расстоянии $S = 0,5S_{max}$) лопатки НА на периферийной линии тока;
- P10 ($Beta_{1h_{rk}}$) — геометрический угол входной кромки лопасти РК на втулочной линии тока (рис. 6, б);

ID	Parameter Name	Value	Unit
Input Parameters			
Base (A1)			
P1	L_na	15	mm
P2	L_axial	10	mm
P3	L_rk	15	mm
P4	Beta_1h_na	4,35	degree
P5	Beta_2h_na	80,4	degree
P6	Beta_mh_na	60,5	degree
P7	Beta_1s_na	4,35	degree
P8	Beta_2s_na	80,4	degree
P9	Beta_ms_na	60,5	degree
P10	Beta_1h_rk	-6	degree
P11	Beta_2h_rk	-80	degree
P12	Beta_mh_rk	-60	degree
P13	Beta_1s_rk	-6	degree
P14	Beta_2s_rk	-80	degree
P15	Beta_ms_rk	-60	degree
P16	Theta_s_na	-10	degree
P17	Theta_s_rk	10	degree
P18	Z_na	20	
P19	Z_rk	20	
New input parameter			
	New name	New expression	
Output Parameters			
CFX (C1)			
P20	Q	0,098105	m ³ s ⁻¹
P21	Mrk	205,45	J
P22	KPDrk	90,439	
P23	KPD	85,747	
P24	dHs	3,0413	m

Рис. 5. Параметры проектирования ПЧ турбины

- P11 (Beta_2h_rk) — геометрический угол выходной кромки лопасти РК на втулочной линии тока;
- P12 (Beta_mh_rk) — геометрический угол в средней точке (на расстоянии $S = 0,5S_{max}$) лопасти РК на втулочной линии тока;
- P13 (Beta_1s_rk) — геометрический угол входной кромки лопасти РК на периферийной линии тока;
- P14 (Beta_2s_rk) — геометрический угол выходной кромки лопасти РК на периферийной линии тока;
- P15 (Beta_ms_rk) — геометрический угол в средней точке (на расстоянии $S = 0,5S_{max}$) лопасти РК на периферийной линии тока;
- P16 (Theta_s_na) — угол θ_{st} смещения входной кромки лопатки НА на периферии в плоскости перпендикулярной оси вращения РК;
- P17 (Theta_s_rk) — угол θ_{rot} смещения входной кромки лопасти РК на периферии в плоскости перпендикулярной оси вращения РК;
- P18 (Z_na) — количество лопаток НА;
- P19 (Z_rk) — число лопастей РК.

Углы установки лопатки β^* в инструменте BladeModeler отсчитывают от осевого направления. Для приведения их к общепринятой системе отсчета, где угол β измеряют от плоскости, перпендикулярной оси (тангенциального направления), используют преобразование $\beta = 90^\circ - \beta^*$.

В качестве выходных параметров задавали следующие интегральные величины (см. рис. 5):

- P20 (Q) — расход через турбину;
- P21 (Mrk) — крутящий момент на РК турбины;
- P22 (KPDrk) — гидравлический КПД РК;
- P23 (KPD) — гидравлический КПД турбины;
- P24 (dHs) — потери в НА.

Ввиду большого количества входных параметров, описывающих параметрическую ПЧ турбины, выполнено корреляционное исследование влияния входных параметров на отклик системы, и наиболее значимые из них (Relevant input parameters) заданы как входные параметры оптимизации. Это позволило исключить из оптимизационного процесса маловажные параметры и тем самым снизить размерность расчетной модели.

Корреляционная матрица (Correlation Matrix) состоит из коэффициентов корреляции R для каждого из входных параметров.

Статический коэффициент корреляции R показывает наличие и степень взаимосвязи между двумя переменными (входными и выходными параметрами). Эта взаимосвязь может

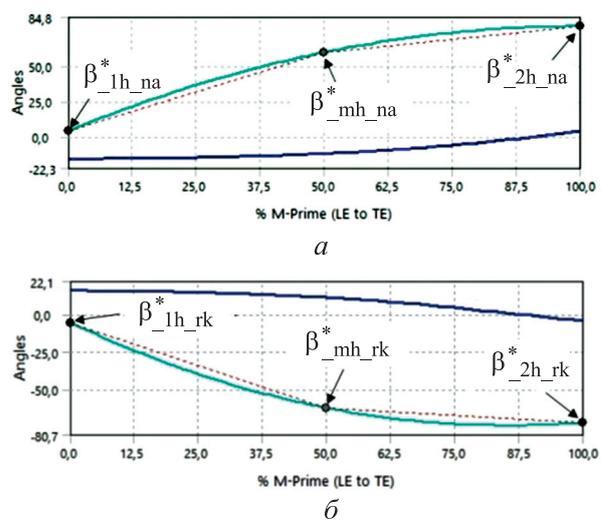


Рис. 6. Зависимости углов установки β^* , град, лопатки во втулочном сечении НА (а) и лопасти во втулочном сечении РК (б) от ее длины S , %

быть положительной или отрицательной. Значение коэффициента находится в диапазоне $-1...+1$. Коэффициент со знаком плюс означает, что по мере увеличения входного параметра значение выходного параметра также имеет тенденцию к возрастанию. При отрицательном значении R увеличение входного параметра вызывает уменьшение выходного. Чем ближе коэффициент к крайним значениям, тем сильнее взаимосвязь. При коэффициенте корреляции $R \geq \pm 0,3$ связь между параметрами можно считать существенной.

Количественную оценку статических коэффициентов R выполняли на основе ранговой корреляции по методу Спирмена (Spearman), используя ранги данных и выявляя монотонное соотношение между двумя переменными.

Метод определения корреляции параметров основан на численных расчетах таблицы, состоящей из случайной выборки точек пространства параметров, сформированной с помощью алгоритма латинского гиперкуба.

Диапазон изменения входных параметров ограничен $\pm 10\%$ (табл. 2), что позволило создать достаточно экономную таблицу эксперимента.

По результатам гидродинамического расчета получены данные таблицы эксперимента и рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена R для каждого входного параметра.

Матрица корреляции с численными значениями коэффициентов R и ее графическое представление показаны на рис. 7, а и б.

Анализ данных, приведенных на рис. 7, позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние на выходные интегральные параметры турбины оказывают следующие входные параметры:

- на гидравлический КПД турбины (P23 — КПД) — P8 (Beta_2s_na, $R = -0,4476$); P14 (Beta_2s_rk, $R = 0,3663$); P15 (Beta_ms_rk, $R = 0,202$); P9 (Beta_ms_na, $R = -0,144$); P6 (Beta_mh_na, $R = -0,14048$); P1 (L_na, $R = 0,1036$);

- на крутящий момент (P21 — Mrk) — P14 (Beta_2s_rk, $R = -0,4927$); P8 (Beta_2s_na,

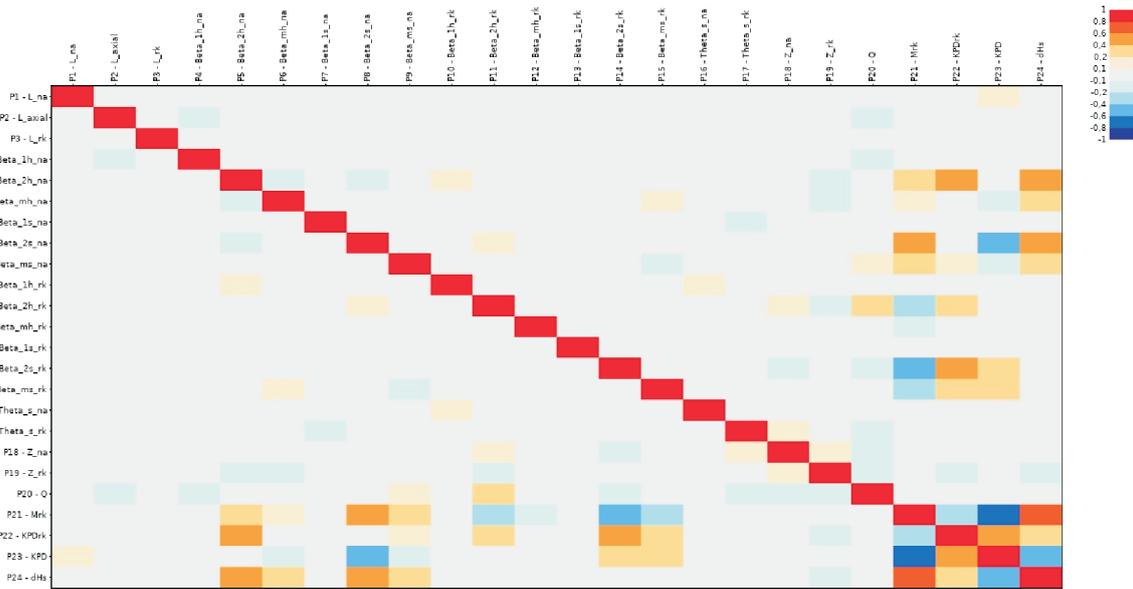
Таблица 2

Диапазоны изменения входных параметров

Параметр	Единица измерения	Значение	
		Минимальное	Максимальное
P1 (L_na)	мм	13,5	16,5
P2 (L_axial)	мм	9	11
P3 (L_rk)	мм	13,5	16,5
P4 (Beta_1h_na)	град	3,915 ($\beta = 86,085$)	4,785 ($\beta = 85,215$)
P5 (Beta_2h_na)	град	72,36 ($\beta = 17,64$)	88,44 ($\beta = 1,56$)
P6 (Beta_mh_na)	град	54,45 ($\beta = 35,55$)	66,55 ($\beta = 23,45$)
P7 (Beta_1s_na)	град	3,915 ($\beta = 86,085$)	4,785 ($\beta = 85,215$)
P8 (Beta_2s_na)	град	72,36 ($\beta = 17,64$)	88,44 ($\beta = 1,56$)
P9 (Beta_ms_na)	град	54,45 ($\beta = 35,55$)	66,55 ($\beta = 23,45$)
P10 (Beta_1h_rk)	град	-6,6 ($\beta = 83,4$)	-5,4 ($\beta = 84,6$)
P11 (Beta_2h_rk)	град	-88 ($\beta = 2$)	-72 ($\beta = 18$)
P12 (Beta_mh_rk)	град	-66 ($\beta = 24$)	-54 ($\beta = 36$)
P13 (Beta_1s_rk)	град	-6,6 ($\beta = 83,4$)	-5,4 ($\beta = 84,6$)
P14 (Beta_2s_rk)	град	-88 ($\beta = 2$)	-72 ($\beta = 18$)
P15 (Beta_ms_rk)	град	-66 ($\beta = 24$)	-54 ($\beta = 36$)
P16 (Theta_s_na)	град	-11	-9
P17 (Theta_s_rk)	град	9	11
P18 (Z_na)	-	10	20
P19 (Z_rk)	-	10	20

Name	P1 - L_na	P2 - L_axial	P3 - L_rk	P4 - Beta_1h_na	P5 - Beta_2h_na	P6 - Beta_mh_na	P7 - Beta_1s_na	P8 - Beta_2s_na	P9 - Beta_ms_na	P10 - Beta_1h_rk	P11 - Beta_2h_rk	P12 - Beta_mh_rk	P13 - Beta_1s_rk	P14 - Beta_2s_rk	P15 - Beta_ms_rk	P16 - Theta_s_na	P17 - Theta_s_rk	P18 - Z_na	P19 - Z_rk	P20 - Q	P21 - Mrk	P22 - KPDrk	P23 - KPD	P24 - dHs
P1 - L_na	1	0,022255	-0,045839	0,024132	-0,089906	0,035157	-0,058106	-0,093114	0,091582	-0,061346	0,097192	-0,004698	0,035995	-0,026397	0,012726	0,001911	-0,075813	0,00797	-0,057113	0,015262	-0,024438	0,097657	0,103673	0,05746
P2 - L_axial	0,022255	1	-0,076662	-0,130529	-0,022385	-0,033828	0,033892	-0,02463	-0,044526	0,040204	-0,024561	-0,004532	0,061485	0,01871	0,034015	0,024881	0,032622	0,036265	0,020248	-0,108434	0,043303	0,012593	0,023691	-0,033171
P3 - L_rk	-0,045839	-0,076662	1	-0,079563	0,012897	0,026792	0,008413	0,033823	-0,088619	0,017643	0,07087	-0,056841	0,003561	0,040261	0,030972	-0,056307	0,029381	0,031522	0,067165	-0,054108	0,063247	-0,023872	-0,099929	0,020482
P4 - Beta_1h_na	0,024132	-0,130529	0,012897	1	0,046181	0,012411	-0,047558	0,019495	0,032345	-0,025639	-0,026397	0,052175	0,056611	-0,05099	-0,095142	0,015342	-0,006574	0,037885	0,050003	-0,134148	0,079074	0,050317	-0,06133	0,046447
P5 - Beta_2h_na	-0,089906	-0,022385	0,012897	0,046181	1	-0,10189	0,088801	-0,117691	0,053355	0,145876	-0,032639	0,033529	0,053147	-0,02092	-0,098383	0,034148	-0,015657	0,058293	-0,134421	-0,099525	0,309669	0,419415	-0,08643	0,465563
P6 - Beta_mh_na	0,035157	-0,033828	0,026792	0,012411	-0,10189	1	-0,010046	-0,038894	0,016153	-0,073122	0,022783	-0,02746	0,037202	-0,020493	0,132819	0,062788	-0,046656	-0,041403	-0,102504	-0,043554	0,175743	0,060161	-0,140485	0,24301
P7 - Beta_1s_na	-0,058106	0,033892	0,008413	-0,047558	0,088801	-0,010046	1	0,055298	0,036897	0,009385	0,041136	-0,028698	-0,03772	0,046987	-0,009603	-0,148054	0,022992	-0,031677	0,054748	0,055859	0,024524	-0,083921	-0,090514	
P8 - Beta_2s_na	-0,093114	-0,02463	0,033823	0,019495	-0,117691	-0,038894	0,055298	1	-0,048844	-0,054129	0,107324	-0,001852	-0,023616	-0,076688	-0,021598	0,011562	0,052233	0,008221	-0,030748	-0,014103	0,0430267	-0,023931	-0,4476	0,580932
P9 - Beta_ms_na	0,091582	-0,044526	-0,088619	0,032345	0,053355	0,016153	0,036897	-0,048844	1	0,072866	0,01152	-0,020157	0,021833	0,003859	-0,105648	-0,00055	-0,03623	0,052928	-0,049063	0,100315	0,270293	0,103918	-0,144008	0,350691
P10 - Beta_1h_rk	-0,061346	0,040204	0,017643	-0,025639	0,145876	-0,032639	0,015587	-0,054129	0,072866	1	-0,061757	-0,056307	0,034527	0,01145	0,03717	0,158789	-0,071104	-0,035221	0,054903	-0,091672	-0,014787	0,093034	0,05833	-0,018369
P11 - Beta_2h_rk	0,097192	-0,024561	0,07087	-0,026397	-0,032639	0,022783	0,009385	0,107324	0,01152	-0,061757	1	-0,057925	-0,049367	0,058186	0,03607	0,053147	-0,029728	0,142839	-0,129632	0,223371	-0,269685	0,239676	0,084098	0,065505
P12 - Beta_mh_rk	-0,004698	-0,004532	-0,056841	0,052175	-0,033529	-0,02746	0,041136	-0,001852	-0,020157	-0,056307	-0,057925	1	-0,053595	-0,058997	-0,091203	-0,056633	-0,005077	-0,065921	0,03123	0,087375	-0,184464	0,069083	0,053579	-0,09527
P13 - Beta_1s_rk	-0,035995	0,061485	-0,003561	0,036611	0,033147	0,037202	-0,028698	-0,023616	0,021833	0,034527	-0,049367	-0,053595	1	-0,028575	-0,009774	0,033484	-0,04738	-0,042556	-0,064005	-0,073958	0,032568	0,002045	0,043154	0,006571
P14 - Beta_2s_rk	-0,026397	0,01871	0,040261	-0,05099	-0,020248	-0,03772	-0,076688	0,003859	0,01145	0,058186	-0,058997	-0,028575	-0,009774	1	0,022648	-0,039743	0,041745	-0,130743	0,076875	-0,156259	0,492756	0,473806	0,36637	-0,081162
P15 - Beta_ms_rk	0,012726	0,034015	0,030972	-0,095142	-0,098383	0,132819	0,046987	-0,021598	-0,105648	0,03717	0,03607	0,091203	0,009774	0,022648	1	0,069626	-0,032867	0,01902	-0,034485	0,037074	0,346629	0,238921	0,202034	-0,090551
P16 - Theta_s_na	0,001911	0,024881	-0,056307	0,015342	0,034148	0,062788	-0,009603	0,011562	-0,00055	0,158789	-0,056307	0,034527	0,01145	0,03717	0,069626	1	-0,088672	-0,002552	0,00474	0,042892	-0,026739	0,067192	0,07795	-0,000171
P17 - Theta_s_rk	-0,075813	0,032622	0,029381	-0,006374	-0,015657	-0,046656	-0,148054	0,052233	-0,03623	-0,071104	-0,029728	-0,005077	-0,04736	0,041745	-0,032867	-0,088672	1	0,045652	-0,165409	0,032173	0,046736	-0,051417	0,033935	
P18 - Z_na	0,00797	-0,033625	0,031522	0,037885	0,088293	-0,041403	0,022992	0,008221	0,052928	-0,035221	0,142839	0,065921	-0,042556	-0,130743	0,01902	-0,002552	0,112256	1	0,106459	-0,165809	0,047141	0,004666	-0,078236	0,07024
P19 - Z_rk	-0,057113	0,020248	0,067165	0,030003	-0,134421	-0,102504	-0,031677	-0,030748	-0,049063	0,054903	-0,129632	0,03125	-0,064005	0,076875	-0,034485	0,00474	-0,045652	0,106459	1	-0,103598	0,038611	-0,121048	-0,06186	-0,137202
P20 - Q	0,015262	-0,108434	-0,054108	-0,134148	-0,099525	-0,043554	0,054748	-0,014103	0,100315	-0,091672	0,223371	0,087375	-0,079598	-0,156259	0,037074	0,042892	-0,165409	-0,165809	0,032173	1	-0,089414	0,004666	0,04183	-0,065836
P21 - Mrk	-0,024438	-0,043303	0,063247	0,079074	0,309669	0,175743	0,055859	0,430267	0,270293	-0,01487	-0,269685	-0,146464	0,032568	-0,492756	-0,346629	-0,26739	0,032173	0,047141	-0,038611	-0,089414	1	-0,269412	-0,785197	0,705173
P22 - KPDrk	0,097657	0,103673	0,023872	-0,005317	0,419415	0,060161	0,024524	-0,023931	0,103918	0,059034	0,239876	0,068083	0,002045	0,473806	0,238921	0,067192	-0,046736	0,004666	-0,121048	0,088245	-0,269412	1	0,424988	0,278642
P23 - KPD	0,103673	0,023691	-0,099929	-0,06133	-0,08643	-0,140485	-0,083921	-0,4476	-0,144008	0,05833	0,084098	0,053579	0,043154	0,36637	0,202034	0,097795	-0,051417	-0,078236	-0,041686	0,04183	-0,785197	0,424988	1	-0,56007
P24 - dHs	0,05746	-0,033171	0,002482	0,046447	0,465563	0,24301	0,090514	0,580932	0,350691	-0,018369	0,065505	-0,09527	0,006571	-0,081162	-0,090551	-0,000171	0,033935	0,07024	-0,137202	-0,065836	0,705173	0,278642	-0,56007	1

а



б

Рис. 7. Матрица корреляции с коэффициентами R (а) и ее графическое представление (б)

R = 0,43); P15 (Beta_ms_rk, R = -0,3466); P5 (Beta_2h_na, R = 0,3096); P9 (Beta_ms_na, R = 0,27); P11 (Beta_2h_rk, R = -0,2696); P6 (Beta_mh_na, R = 0,1757); P12 (Beta_mh_rk, R = -0,1644);

- на расход в турбине (P20 — Q) — P11 (Beta_2h_rk, R = 0,2233); P17 (Theta_s_rk, R = -0,1654); P18 (Z_na, R = -0,1658); P14 (Beta_2s_rk, R = -0,1562); P4 (Beta_1h_na, R = -0,1341); P19 (Z_rk, R = -0,10359); P2 (L_axial, R = -0,1084); P9 (Beta_ms_na, R = 0,1003);

- на КПД ПК (P22 — KPDrk) — P14 (Beta_2s_rk, R = 0,4738); P5 (Beta_2h_na, R = 0,4194); P11 (Beta_2h_rk, R = 0,2398); P15 (Beta_ms_rk, R = 0,2389); P19 (Z_rk, R = -0,121);

- на потери в НА (P21 — dHs) — P5 (Beta_2h_na, R = 0,4655); P9 (Beta_ms_na, R = 0,35069); P6 (Beta_mh_na, R = 0,243); P19 (Z_rk, R = -0,1372).

Этот вывод подтверждает и столбчатая диаграмма чувствительности, показывающая зависимость выходного параметра от каждого из входных по отдельности (рис. 8).

Сводная таблица входных параметров, сортированных в порядке уменьшения значимости (Relevance), приведена на рис. 9. Для каждого входного параметра отображено наибольшее значение значимости для какого-то выходного параметра (Output Parameter), а также — значение коэффициента корреляции и вклад в коэффициент детерминации R².

В сводной таблице значение Relevance Threshold (порог релевантности/значимости) задано равным 0,5, т. е. входные параметры с большим значением являются основными и попадают в категорию важнейших (Major Input Parameters). Входные параметры с меньшим значением относятся к категории Minor Input Parameters.

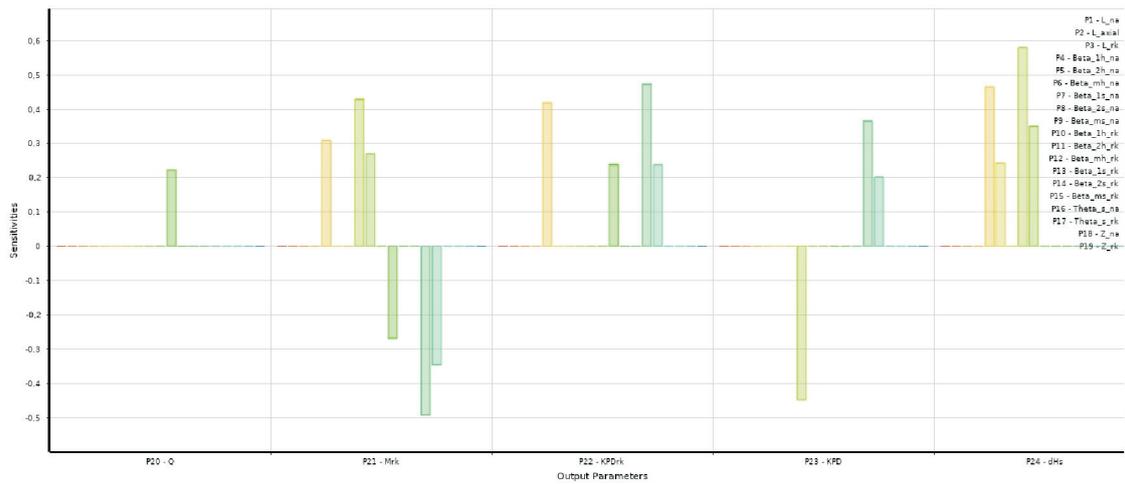


Рис. 8. Столбчатая диаграмма чувствительности входных параметров

По результатам проведенных корреляционных исследований из девятнадцати входных параметров восемь (P2, P3, P4, P7, P16, P17, P18, P19) были исключены из оптимизационного процесса и зафиксированы постоянными.

Для оптимизации ПЧ турбины использованы математические алгоритмы и методы, имеющиеся в программном комплексе ANSYS Workbench. Программный пакет ANSYS Workbench включает в себя инструменты DesignXplorer, где реализованы разные подходы оптимизации: прямые методы — Direct Optimization и оптимизация с использованием поверхности отклика — Response Surface Optimization (RSO) [13, 14].

Поверхность отклика представляет собой некую математическую модель (метамодель),

которая описывает аналитическую зависимость выходных параметров от входных. Функция строится на основе аппроксимации данных численного эксперимента — Design of Experiments (DOE). RSO отображает в анализируемом пространстве аппроксимированные значения выходных параметров без необходимости проведения гидродинамического расчета во всех точках. Достоверность получаемых результатов зависит от качества построенной суррогатной метамодели и требует обязательной верификации.

Прямые методы оптимизации основаны на фактических гидродинамических расчетах каждой точки (варианта ПЧ), полученной в соответствии с оптимизационным алгоритмом, заложенным в применяемом методе. Поэтому результаты оптимизации изначально являются достоверными.

Результаты оптимизации оценивают по значению выходного параметра, заданного в качестве критерия. Критерием оптимизации может быть один выходной параметр (однокритериальная оптимизация), либо требуется улучшить сразу несколько показателей (многокритериальная оптимизация).

При этом надо понимать, что одновременное достижение разных целей является сложной и в большинстве случаев невыполнимой задачей. Это связано с тем, что между критериями обычно существуют конфликты. Поэтому при многоцелевой оптимизации решение не является единственным, а образует так называемое множество парето-оптимальных решений, из которых проектировщик, основываясь на собственном опыте, выбирает единственное.

Filtering Method				
Relevance Threshold	0,5			
Configuration	Filtering on Correlation Value and R2 Contribution, with a maximum of 19 major input parameters			
Filtering Output Parameters	P20 - Q, P21 - Mrk, P22 - KPDrk, P23 - KPD, P24 - dHs			
Major Input Parameters				
Input Parameter	Best Relationship With Filtering Output Parameter			
	Relevance	Output Parameter	R2 Contribution	Correlation Value
P8 - Beta_2s_na	1	P21 - Mrk	0,21739	0,49339
P10 - Beta_1h_rk	1	P20 - Q	0,23867	0,15681
P14 - Beta_2s_rk	1	P22 - KPDrk	0,30748	0,59284
P4 - Beta_1h_na	0,95925	P20 - Q	0,21066	-0,13415
P5 - Beta_2h_na	0,90638	P21 - Mrk	0,16187	0,32442
P11 - Beta_2h_rk	0,83185	P22 - KPDrk	0,17699	0,33457
P15 - Beta_ms_rk	0,76703	P20 - Q	0,1077	0,18855
P2 - L_axial	0,72081	P20 - Q	0,089381	0,16234
P19 - Z_rk	0,67367	P20 - Q	0,072969	-0,1465
P9 - Beta_ms_na	0,60982	P23 - KPD	0,095238	-0,15458
P1 - L_na	0,60522	P24 - dHs	0,097256	0,25054
P12 - Beta_mh_rk	0,5986	P20 - Q	0,051191	0,087375
P6 - Beta_mh_na	0,56803	P22 - KPDrk	0,056354	0,1607
P18 - Z_na	0,56715	P20 - Q	0,04354	-0,16581
Minor Input Parameters				
Input Parameter	Best Relationship With Filtering Output Parameter			
	Relevance	Output Parameter	R2 Contribution	Correlation Value
P3 - L_rk	0,48833	P20 - Q	0,027792	-0,10394
P16 - Theta_s_na	0,48652	P20 - Q	0,027484	0,042892
P17 - Theta_s_rk	0,46689	P24 - dHs	0,04465	-0,13137
P13 - Beta_ls_rk	0,45831	P20 - Q	0,022976	-0,079598
P7 - Beta_ls_na	0,45424	P20 - Q	0,022368	0,11449

Рис. 9. Таблица значимости входных параметров

При оптимизации ПЧ турбины турбобура рассматривали случаи, когда в качестве критерия задавали: максимизацию гидравлического КПД турбины, максимизацию крутящего момента и одновременную максимизацию этих двух выходных параметров.

На первом этапе применяли направленный метод ASO (Adaptive Single-Objective — адаптивная однокритериальная оптимизация), представляющий собой итерационный градиентный метод с анализом результатов, полученных на предыдущей итерации.

Бюджет оптимизации (количество вызовов расчетной модели) ограничивали 240 расчетными точками.

В качестве граничных условий задавали второй вариант (см. табл. 1) при постоянном расходе ПЖ через турбину $Q = 98,1$ л/с.

Получены следующие результаты.

1. Цель — максимальный гидравлический КПД турбины. На остальные выходные параметры ограничения не накладывались.

По результатам оптимизации для лучшего варианта геометрических параметров ПЧ определены следующие интегральные параметры: $\eta_{г.т} = 88,6$ %; $\eta_{г.ПК} = 95,5$ %; $M_{ПК} = 104,0$ Н·м; потери в НА $\Delta h_{НА} = 2,0$ м.

В процессе оптимизации происходило постепенное сужение диапазона изменения входных параметров и автоматическое сгущение исследуемых точек в области экстремума (рис. 10).

2. Цель — максимальный крутящий момент на турбине с ограничением до 300 Н·м. На остальные выходные параметры ограничения не накладывались.

По результатам оптимизации для лучшего варианта геометрических параметров ПЧ получены следующие интегральные параметры:

$\eta_{г.т} = 77,0$ %; $\eta_{г.ПК} = 79,0$ %; $M_{ПК} = 317,0$ Н·м; $\Delta h_{НА} = 2,4$ м.

На втором этапе применяли многокритериальные методы оптимизации АМО (Adaptive Multi-objective Optimization — адаптивная многообъектная оптимизация) и MOGA (Multi-objective Genetic Algorithm — многоцелевой генетический алгоритм) со следующими критериями: максимальный гидравлический КПД турбины и максимальный крутящий момент на турбине с ограничением 300 Н·м.

3. Оптимизация методом АМО — оптимизационный метод, объединяющий поверхность отклика RSO и генетический алгоритм.

По результатам оптимизации для трех лучших кандидатов получены следующие интегральные параметры:

• $\eta_{г.т} = 82,0$ %; $\eta_{г.ПК} = 88,7$ %; $M_{ПК} = 309,1$ Н·м; $\Delta h_{НА} = 7,2$ м;

• $\eta_{г.т} = 80,7$ %; $\eta_{г.ПК} = 89,3$ %; $M_{ПК} = 312,3$ Н·м; $\Delta h_{НА} = 9,5$ м;

• $\eta_{г.т} = 80,9$ %; $\eta_{г.ПК} = 86,6$ %; $M_{ПК} = 303,8$ Н·м; $\Delta h_{НА} = 6,1$ м.

4. Оптимизация методом MOGA — итерационный метод оптимизации, основанный на алгоритме, аналогичном эволюционному методу естественного отбора.

По результатам оптимизации для трех лучших кандидатов получены следующие интегральные параметры:

• $\eta_{г.т} = 82,9$ %; $\eta_{г.ПК} = 90,8$ %; $M_{ПК} = 305,6$ Н·м; $\Delta h_{НА} = 8,0$ м;

• $\eta_{г.т} = 81,5$ %; $\eta_{г.ПК} = 88,1$ %; $M_{ПК} = 313,83$ Н·м; $\Delta h_{НА} = 7,0$ м;

• $\eta_{г.т} = 81,8$ %; $\eta_{г.ПК} = 94,86$ %; $M_{ПК} = 301,5$ Н·м; $\Delta h_{НА} = 13,5$ м.

Также была отработана методика оптимизации с использованием метамоделей. Алгоритм включал в себя следующие этапы: расчет значе-

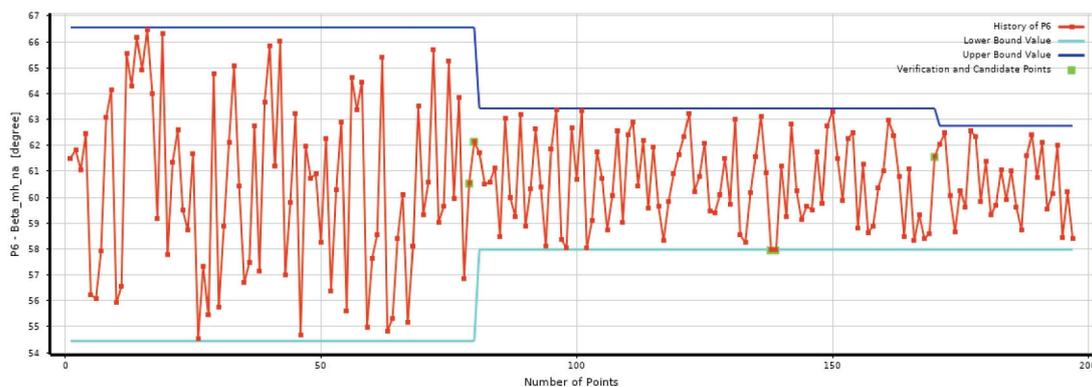


Рис. 10. Изменение входного параметра P6 в процессе оптимизационного поиска методом ASO

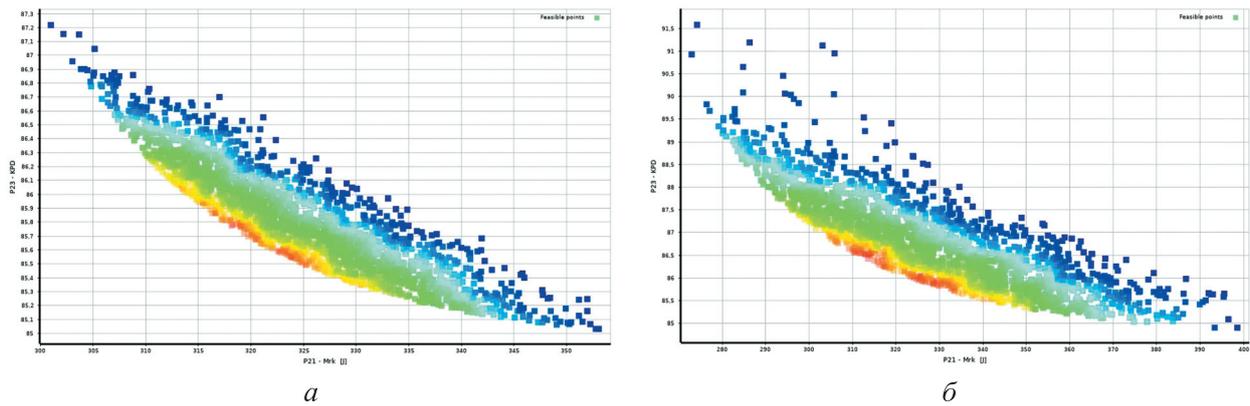


Рис. 11. Фронты Парето для пятого (а) и шестого (б) вариантов

ний переменных пространства откликов (формирование обучающей выборки данных таблицы эксперимента); аппроксимация этих данных для создания метамодел; оптимизация ПЧ по созданной поверхности отклика.

5. План эксперимента DOE — Central Composite Design (центральный композиционный план); метод построения метамодел — Genetic Aggregation; оптимизация по поверхности RSO — алгоритм MOGA.

6. План эксперимента DOE — Latin Hypercube Sampling Design (план по латинскому гиперкубу); метод построения метамодел — Genetic Aggregation; оптимизация по поверхности RSO — алгоритм MOGA.

Разница между пятым и шестым вариантами заключалась в выборе эффективного плана численного эксперимента DOE с целью получения максимального количества информации об исследуемом объекте при ограниченном количестве обращений к исходной расчетной модели. Количество точек таблицы эксперимента DOE определяет число вызовов «тяжелой» расчетной модели, что обуславливает временные затраты на гидродинамический расчет течения ПЖ.

Полученные при создании матрицы планирования эксперимента данные использовали как обучающую (тренировочную) выборку для построения предсказательной (суррогатной) метамодел.

Распределения выходных параметров в двумерном пространстве откликов $\eta_{г.т}$ — M_{PK} , полученные по результатам оптимизационных расчетов пятого и шестого вариантов, приведены на рис. 11, а и б.

Следует учитывать, что поверхность отклика строится между расчетными точками таблицы DOE и содержит в себе погрешность аппроксимации, поэтому суррогатная модель

может оказаться недостаточно точной. Достоверность полученных результатов существенно зависит от качества созданной метамодел. Точность прогнозирования значений выходных параметров (напора и КПД) можно повысить в результате дальнейшего дообучения метамодел.

Выводы

1. Спроектирована параметрическая модель ПЧ гидравлической турбины высокооборотного турбобура, которая не содержит усложняющие факторы и является удобной для оптимизации ее геометрических параметров.

2. Определены параметры проектирования ПЧ, которые оказывают наибольшее влияние на интегральные энергетические характеристики гидравлической турбины и могут быть заданы как входные параметры оптимизации.

3. Уже на этапе расчета корреляционной матрицы, по сути, выполняется оптимизация стохастическим методом, позволяющая определить точки вблизи глобального экстремума.

4. Градиентные методы обладают высокой скоростью сходимости. Однако они всегда ищут оптимум вблизи заданной конфигурации, поэтому требуют хорошего начального приближения. Как самостоятельные методы хорошо подходят для поиска локального экстремума функции.

5. При многокритериальной оптимизации существует противоречие между целями, например, максимальная эффективность и максимальный крутящий момент. Поэтому проектировщик должен выбирать конкретную конфигурацию ПЧ из фронта парето-оптимальных решений на основе субъективной экспертной оценки и компромисса.

Литература

- [1] Свобода Д.Г., Жарковский А.А. *Оптимизация проточной части лопастного насоса с использованием численных методов Ansys CFX*. Санкт-Петербург, Политех-Пресс, 2019. 89 с.
- [2] Банди Б. *Методы оптимизации*. Москва, Радио и связь, 1988. 127 с.
- [3] Банников Д.В. *Оптимизационное проектирование проточных частей гидротурбин и анализ течения в них методами математического моделирования*. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, Институт вычислительных технологий СО РАН, 2010. 151 с.
- [4] Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н. и др. *Численное моделирование течений в турбомашинах*. Новосибирск, Наука, 2006. 202 с.
- [5] Омран М., Жарковский А.А., Щур В.А. и др. Методика проектирования и оптимизации лопастной системы радиально-осевой гидротурбины. *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*, 2023, т. 7, № 1, с. 47–54, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-47-54>
- [6] Соколова М.А., Ригин В.Е., Семенова А.В. Оптимизационное проектирование формы лопасти рабочего колеса с использованием критерия «зависимость КПД от расхода». *Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневоавтоматика. Сб. науч. тр. Межд. науч.-тех. конф.* Санкт-Петербург, Изд-во СПбПУ, 2016, с. 114–123.
- [7] Свобода Д.Г., Жарковский А.А., Борщев И.О. и др. Оптимизация проточной части осевого насоса ОД-11. *Насосы. Турбины. Системы*, 2022, № 3, с. 72–82.
- [8] Хлебников Д.А., Мяслицин Н.Ю. Методы совершенствования турбобура для бурения в крепких породах. *Бурение и нефть*, 2013, № 6, с. 47–52.
- [9] Симонянц С.Л. Проектирование турбины турбобура повышенной мощности для бурения алмазными долотами. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море*, 2011, № 12, с. 19–23.
- [10] Балденко Ф.Д. *Расчеты бурового оборудования*. Москва, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012, с. 384–409.
- [11] Dvoynikov M.V., Sidorkin D.I., Kunshin A.A. et al. Development of hydraulic turbodrills for deep well drilling. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, no. 16, art. 7517, doi: <https://doi.org/10.3390/app11167517>
- [12] Двойников М.В., Сидоркин Д.И., Юртаев С.Л. и др. Бурение глубоких и сверхглубоких скважин с целью поиска и разведки новых месторождений полезных ископаемых. *Записки Горного института*, 2022, т. 258, pp. 945–955, doi: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.55>
- [13] Kadhim H.T., Rona A. Design optimization workflow and performance analysis for contoured endwalls of axial turbines. *Energy*, 2018, vol. 149, no. 8, pp. 875–889, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.001>
- [14] Семенова А.В., Чирков Д.В., Скороспелов В.А. Применение метода многоцелевой оптимизации для проектирования формы лопасти рабочего колеса поворотной лопастной гидротурбины. *Известия Самарского Научного Центра РАН*, 2013, т. 15, № 4–2, с. 588–593.

References

- [1] Svoboda D.G., Zharkovskiy A.A. *Optimizatsiya protochnoy chasti lopastnogo nasosa s ispolzovaniem chislennykh metodov Ansys CFX* [Optimization of the flow part of a vane pump using Ansys CFX numerical methods]. Sankt-Petersburg, Politekh-Press Publ., 2019. 89 p. (In Russ.).
- [2] Bandi B. *Metody optimizatsii* [Methods of optimization]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988. 127 p. (In Russ.).
- [3] Bannikov D.V. *Optimizatsionnoe proektirovanie protochnykh chastey gidroturbin i analiz techeniya v nikh metodami matematicheskogo modelirovaniya*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Optimization design of flowing parts of hydraulic turbines and the analysis of flow in them by methods of mathematical modelling. Kand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, Institut vychislitelnykh tekhnologiy SO RAN Publ., 2010. 151 p. (In Russ.).

- [4] Chernyy S.G., Chirkov D.V., Lapin V.N. et al. *Chislennoe modelirovanie techeniy v turbomashinakh* [Numerical modelling of flows in turbomachines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2006. 202 p. (In Russ.).
- [5] Omran M., Zharkovskiy A.A., Shchur V.A. et al. Technique for designing and optimization of the Francis turbine blade system. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye* [Omsk Scientific Bulletin. Ser. Aviation–Rocket and Power Engineering], 2023, vol. 7, no. 1, pp. 47–54, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-47-54> (in Russ.).
- [6] Sokolova M.A., Rigin V.E., Semenova A.V. [Optimization design of impeller blade shape using the criterion ‘dependence of efficiency on flow rate’. *Gidravlicheskie mashiny, gidropnevmoprivody i gidropnevmootomatika. Sb. nauch. tr. Mezhd. nauch.–tekh. konf.* [Hydraulic Machines, Hydropneumatic Drives and Hydropneumatic Automatics. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.]. Sankt-Petersburg, Izd-vo SPbPU Publ., 2016, pp. 114–123. (In Russ.).
- [7] Svoboda D.G., Zharkovskiy A.A., Borshchev I.O. et al. Optimization of the flowing part of the OD-11 axle pump. *Nasosy. Turbiny. Sistemy* [Pumps. Turbines. Systems], 2022, no. 3, pp. 72–82. (In Russ.).
- [8] Khlebnikov D.A., Myalitsin N.Yu. Turbodrill's improvement methods for drilling in hard rocks. *Burenie i neft*, 2013, no. 6, pp. 47–52. (In Russ.).
- [9] Simonyants S.L. Designing of a turbo–drill turbine of increased power in case of drilling by means of diamond drill-bits. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i more* [Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea], 2011, no. 12, pp. 19–23. (In Russ.).
- [10] Baldenko F.D. *Raschety burovogo oborudovaniya* [Drilling equipment calculations]. Moscow, RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2012, pp. 384–409. (In Russ.).
- [11] Dvoynikov M.V., Sidorkin D.I., Kunshin A.A. et al. Development of hydraulic turbodrills for deep well drilling. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, no. 16, art. 7517, doi: <https://doi.org/10.3390/app11167517>
- [12] Dvoynikov M.V., Sidorkin D.I., Yurtaev S.L. et al. Drilling of deep and ultra–deep wells for prospecting and exploration of new raw mineral fields. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2022, vol. 258, pp. 945–955, doi: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.55> (in Russ.).
- [13] Kadhim H.T., Rona A. Design optimization workflow and performance analysis for contoured endwalls of axial turbines. *Energy*, 2018, vol. 149, no. 8, pp. 875–889, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.001>
- [14] Semenova A.V., Chirkov D.V., Skorospelov V.A. Application the multi–purpose optimization method for design the form of the driving wheel blade at rotary–blade hydro turbine. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2013, vol. 15, no. 4–2, pp. 588–593. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.12.2024

Информация об авторах

СВОБОДА Дмитрий Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы энергетического машиностроения. Институт энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая ул., д. 29, e-mail: svoboda_dg@spbstu.ru).

ЩУР Василий Алексеевич — кандидат технических наук, доцент Высшей школы энергетического машиностроения. Институт энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая ул., д. 29, e-mail: tshur_va@spbstu.ru).

Information about the authors

СВОБОДА Dmitri Gennadevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Higher School of Power Engineering. Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, Russian Federation, Politechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: svoboda_dg@spbstu.ru).

SHCHUR Vasily Alekseevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Higher School of Power Engineering. Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, Russian Federation, Politechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: tshur_va@spbstu.ru).

СИДОРКИН Дмитрий Иванович — кандидат технических наук, доцент Высшей школы автоматизации и робототехники. Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая ул., д. 29, e-mail: sidorkin_di@spbstu.ru).

КУНШИН Андрей Андреевич — кандидат технических наук, инженер Инжинирингового центра аддитивных технологий и производства в нефтегазовой отрасли. Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая ул., д. 29, e-mail: kunshin_aa@spbstu.ru).

SIDORKIN Dmitry Ivanovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Higher School of Automation and Robotics. Institute of Machinery, Materials, and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, Russian Federation, Politechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: sidorkin_di@spbstu.ru).

KUNSHIN Andrey Andreevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Engineering Center for Additive Technologies and Production of Oil & Gas Industry. Institute of Machinery, Materials, and Transport. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, Russian Federation, Politechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: kunshin_aa@spbstu.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Свобода Д.Г., Шур В.А., Сидоркин Д.И., Куншин А.А. Параметрическая оптимизация проточной части высокоскоростного турбобура. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 11, с. 90–103.

Please cite this article in English as:

Svoboda D.G., Shchur V.A., Sidorkin D.I., Kunshin A.A. Parametric optimization of flow part of high-speed turbo-drill. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 11, pp. 90–103.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

**«Основы компоновки бортового оборудования
космических аппаратов»**

Авторы: А.В. Туманов, В.В. Зеленцов, Г.А. Щеглов

Рассмотрены этапы проектирования космического аппарата и основные документы, необходимые для выполнения его компоновки. Изложены требования, предъявляемые к компоновке целевого оборудования, а также к аппаратуре системы управления движением и другим системам бортового оборудования. Даны критерии оценки качества выполненной компоновки и обширный иллюстративный материал по обеспечивающим системам бортового оборудования. Описаны элементы бортового оборудования и приведены нормативные документы, регламентирующие его компоновку.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, которые авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов, обучающихся по специальности «Космические летательные аппараты и разгонные блоки».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>