

УДК 621.65.03

doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-74-83

Оптимизация проточной части осевого насоса с использованием поверхности отклика

Д.Г. Свобода¹, Е.А. Иванов¹, А.А. Жарковский¹, С.Ю. Щуцкий²

¹ Институт энергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

² АО «Центральное конструкторское бюро машиностроения»

Optimization of the Flow Part of an Axial Pump Using the Response Surface

D.G. Svoboda¹, E.A. Ivanov¹, A.A. Zharkovsky¹, S.Y. Shutsky²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

² JSC "Central Design Bureau of Mechanical Engineering"

Для проектирования высокоэффективной проточной части лопастного насоса необходимо использовать различные алгоритмы оптимизации, на основе которых происходит изменение геометрических параметров спроектированной проточной части с целью обеспечения необходимого значения какого-либо интегрального расчетного параметра. Рассмотрен численный метод поиска экстремума на основе одного из алгоритмов, включенного в состав инструмента оптимизации DesignXplorer, являющегося составным модулем программного комплекса ANSYS Workbench. Поверхность отклика (Response Surface Optimization) представляет собой некую математическую модель (метамодель), которая описывает аналитическую зависимость выходных параметров от входных. Функция построена на основе аппроксимации данных численного эксперимента (Design of Experiments). Использование этого метода позволило получить более эффективную проточную часть осевого насоса ОП-5 без проведения длительных экспериментальных исследований влияния ее геометрических параметров на характеристики насоса.

Ключевые слова: осевой насос, проточная часть, параметрическая оптимизация, критерии оптимизации, поверхность отклика, эффективность метода поиска

To design high-efficiency vane pump flow part it is necessary to use various optimization algorithms, based on which the geometrical parameters of designed flow part are changed in order to provide the required value of some integral design parameter. The article considers the numerical method for finding an extremum based on one of the algorithms included in the DesignXplorer optimization tool, which is an integral module of the Ansys Workbench software package. Response Surface Optimization (RSO) is a kind of mathematical model (metamodel) describing analytical dependence of output parameters on input parameters. The function is based on the approximation of the numerical experiment data (Design of Experiments). The use of this method allows obtaining more efficient flow path of the catalog axial pump OP-5 without performing lengthy experimental research of the effect of the geometric parameters of the flow path on the pump characteristics.

Keywords: axial pump, flow part, parametric optimization, optimization criteria, response surface, search method efficiency

Для оптимизации проточной части (ПЧ) осевого насоса необходимо создать параметрическую модель ступени, выбрать параметры гидродинамической математической модели (описывающей качественно и количественно рабочий процесс с достаточной точностью), выделить из множества входных параметров те, которые являются наиболее значимыми, выбрать критерии оптимизации и задать ограничения на входные и выходные параметры.

При сравнении оптимизационных алгоритмов обычно оценивают способность находить глобальный экстремум, необходимое число расчетных вариантов и зависимость решения от начального приближения.

При численной оптимизации формы ПЧ лопастных гидромашин используют детерминированные методы прямого численного нахождения экстремума [1], методы исследования пространства параметров на основе ЛП-тау последовательностей [2] и их усовершенствованные варианты [3, 4], а также стохастические методы, базирующиеся на генетическом алгоритме [5–7].

В последнее время получает распространение подход, основанный на аппроксимации функций отклика — целевых функций, найденных путем гидродинамического расчета течения вязкой жидкости в ПЧ осевого насоса в точках матрицы планирования эксперимента разного вида [8–12].

Этот подход является перспективным, так как после построения адекватной метамоделли для дальнейшей оптимизации ПЧ уже не нужно решать прямую гидродинамическую задачу расчета течения жидкости на каждом шаге оптимизационного процесса.

В связи с этим воспользуемся последним подходом для параметрической оптимизации ПЧ осевого насоса ОП-5 с экспериментально подтвержденной характеристикой [13].

Цель статьи — выработать рекомендации по оптимизационному алгоритму и получить коэффициент полезного действия (КПД) осевого насоса ОП-5, который значительно превышает КПД аналога.

В работе [14] приведены результаты исследования течения вязкой жидкости в ПЧ осевого насоса ОП-5 методами CFD. Анализ результатов показывает хорошую сходимость расчетных и экспериментальных характеристик этого насоса (рис. 1). В оптимальном режиме насос ОП-5 имеет коэффициент расхода $K_Q = 0,5$,

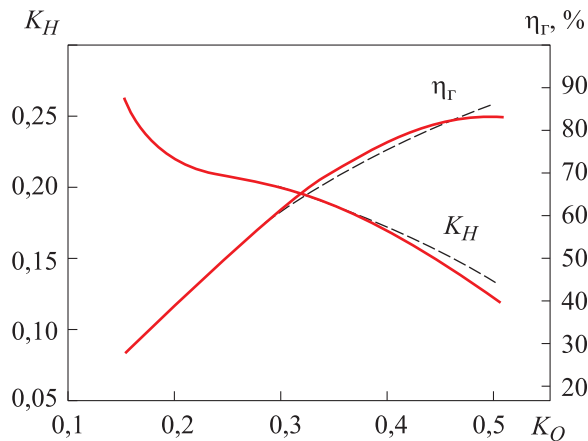


Рис. 1. Расчетные (—) и экспериментальные (---) зависимости коэффициента напора K_H и гидравлического КПД η_G от коэффициента расхода K_Q осевого насоса ОП-5

коэффициент напора $K_H = 0,14$, коэффициент быстроходности $n_s = 680$ и гидравлический КПД $\eta_G = 84$ %.

Для использования в оптимизационном цикле модель ПЧ осевого насоса ОП-5 параметризирована с помощью графического редактора DesignModeler программного комплекса ANSYS Workbench. В меридиональной плоскости построены втулочный и периферийный обводы ПЧ, задано положение входной и выходной кромок лопастей рабочего колеса (РК) и лопаток выправляющего аппарата (ВА), входная и выходная границы расчетной области.

С использованием специализированного инструмента BladeModeler в трех контрольных сечениях (по линиям тока у втулки, на периферии и средней геометрической линии) описаны геометрические формы плоских профилей РК и ВА в трех точках (на входной кромке, в средней точке, на выходной кромке) заданы значения углов вдоль линии тока, а также законы распределения углов охвата и толщин в профилях (рис. 2).

Углы в средней точке лопасти РК и ВА определяют угол охвата, а следовательно, длину и густоту решетки профилей РК и ВА.

Для полного описания трехмерной модели ПЧ осевого насоса потребовалось 19 геометрических параметров, заданных в редакторе DesignModeler: P1 (d_{vt}) — радиус втулки; P2 (d_{vt_in}) — размер, определяющий положение входной кромки лопасти на втулке; P3 (γ_{LE}) — угол наклона входной кромки лопасти РК, определяющий трапецевидную форму меридианной проекции лопасти;

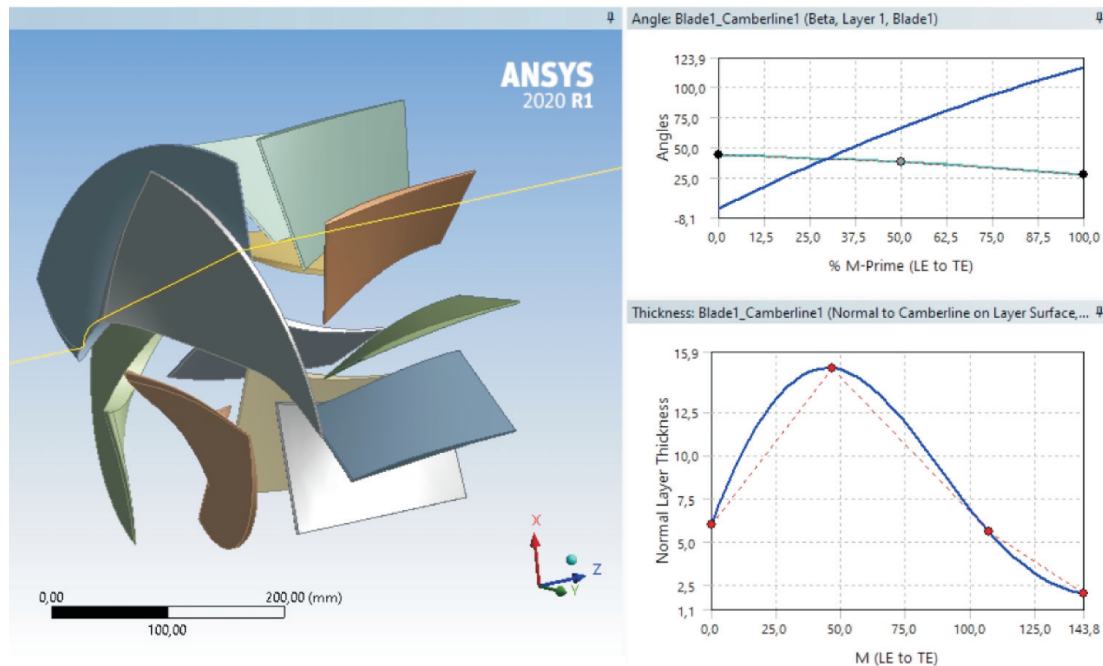


Рис. 2. Результаты проектирования лопастной системы в модуле BladeModeler

P4 (L_h) и P5 (L_s) — длина лопасти РК в меридианной проекции на втулке и периферии; P6 (L_{va}) — длина лопатки ВА в меридианной проекции на периферии; P7 (gap) — осевое расстояние между лопастями РК и ВА (заданное постоянным по высоте лопасти); P8 ($theta_1$) — угол смещения входной кромки лопасти на периферии в плоскости, перпендикулярной оси вращения РК; P9 ($theta_2$) — угол смещения входной кромки лопатки ВА на периферии в плоскости, перпендикулярной оси вращения; P10 ($beta1s$) и P13 ($beta1h$) — входной угол установки лопасти РК на периферии и втулке; P11 ($beta1s_{ave}$) и P14 ($beta1h_{ave}$) — угол в средней точке лопасти РК на периферии и втулке; P12 ($beta2s$) и P15 ($beta2h$) — выходной угол лопасти РК на периферии и втулке; P16 ($beta3s$) и P18 ($beta3h$) — входной угол установки лопатки ВА на периферии и втулке; P17 ($beta3s_{ave}$) и P19 ($beta3h_{ave}$) — угол в средней точке лопатки ВА на периферии и втулке.

Для экономии ресурсов и машинного времени использована модель с условием периодичности. Дискретизация расчетной области выполнена на основе гексаэдрической блочно-структурированной сетки [15]. Количество элементов сетки для РК составило 80 000, для ВА — 60 000.

В препроцессоре были заданы следующие граничные условия:

- на входе в расчетную область — полная энергия, равная 1 атм в абсолютной системе координат;
- на выходе — массовый расход через все сектора в оптимальном режиме работы насоса;
- стандартная двухпараметрическая высокорейнольдсовая модель турбулентности — $k-Eps$;
- на поверхности интерфейса — осреднение (Stage) по давлению — Constant Total Pressure;
- число итераций — 2000;
- невязки (среднеквадратичная погрешность расчета) — 10^{-5} .

Напор насоса рассчитывался как разность полных энергий на выходе e_{outlet} и входе e_{inlet} расчетной области:

$$H = \frac{e_{outlet} - e_{inlet}}{\rho g},$$

где ρ — плотность рабочей жидкости; g — ускорение свободного падения.

Гидравлический КПД определялся выражением

$$\eta_r = \frac{N}{N_b} = \frac{\rho g H Q}{M \omega},$$

где N — полезная мощность насоса; N_b — мощность на приводном валу насоса; Q — расход насоса; M — суммарный момент на всех вращающихся поверхностях лопастной системы насоса; ω — угловая скорость вращения РК.

По результатам численного расчета получены следующие интегральные параметры насоса: напор $H = 4,35$ м; гидравлический КПД $\eta_r = 84,97$ %. Уже при 500 итерациях среднеквадратичная погрешность падает до 10^{-5} , интегральные параметры перестают изменяться. Поэтому для уменьшения времени вычислений в каждой точке оптимизационного цикла численный расчет был ограничен 500 итерациями.

Оптимизация исходной ПЧ проведена с использованием инструмента DesignXplorer, где реализован подход к определению оптимального решения на основе построения поверхности отклика (Response Surface Optimization — RSO). Поверхность отклика представляет собой некую математическую модель (метамодель), которая аналитически описывает 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 результатов оптимизации зависит от качества построенной метамодели и требует обязательной верификации.

Выходными являлись следующие параметры: P20 (Head) — напор насоса H ; P21 (Efficiency) — гидравлический КПД насоса η_r ; P22 (PowerZ) — затраченная мощность. Критерий оптимизации — максимальный гидравлический КПД насоса $\eta_r \leq 100$ %. Накладываемые ограничения: напор насоса должен находиться в диапазоне $4 \text{ м} \leq H \leq 5 \text{ м}$.

Основой создания метамодели является база данных эксперимента (Design of Experiments — DOE), представленная в виде таблицы с массивом значений входных параметров, изменяющихся в заданном диапазоне (в рассматриваемом случае ± 10 %). Цель планирования эксперимента — получение репрезентативной выборки данных для RSO.

Для исследования пространства параметров использованы три метода: центральный композиционный план (Central Composite Design), латинский гиперкуб (Latin Hypercube Sampling Design) и пользовательская выборка на основе вариантов, полученных методом поиска ЛП-тау последовательностей [2].

Метод центрального композиционного плана, заданный в программе по умолчанию, явля-

ется пятиуровневым дробным факторным экспериментом и состоит из центральной, осевых и диагональных точек. Количество расчетных точек зависит от числа входных параметров, типа плана и дробности, позволяющей ограничить количество точек. Для девятнадцати входных параметров и дробности 10 количество вариантов в таблице эксперимента по такому плану составило 551.

Метод латинского гиперкуба представляет собой усовершенствованную версию метода Монте-Карло. Здесь расчетные точки случайным образом распределены по ортогональной сетке пространства параметров так, чтобы любые две точки не имели одинаковых значений какого-либо входного параметра. В этом случае значение каждого входного параметра встречается в пространстве только один раз. Данным методом была сформирована достаточно экономная таблица эксперимента, состоящая из 100 вариантов.

DesignXplorer дает возможность пользователю создать вместо стандартного плана эксперимента собственный (Custom). На основе метода исследования пространства параметров построена пользовательская таблица эксперимента, где в качестве генератора случайных точек заданы ЛП-тау последовательности [2]. Этот стохастический метод использован в работах по оптимизации элементов ПЧ центробежных насосов [3].

Апробация этого метода должна была проверить его эффективность для решения задачи оптимизации ПЧ насоса. Для девятнадцати входных параметров сгенерирована таблица из 128 расчетных точек. Диапазон изменения параметров составлял ± 10 %.

Расчетные распределения параметров P11 и P12 в пространстве, полученные методами ЛП-тау, латинского гиперкуба и центрального композиционного плана, показаны на рис. 3. Здесь отмечены точки с лучшим вариантом ПЧ, выявленные по результатам гидродинамического расчета точек из таблицы эксперимента. Диапазон варьирования гидравлического КПД и напора насоса и их значения для лучшего варианта ПЧ ($\eta_{r \max}$ — максимальное значение гидравлического КПД; $H_{\text{ном}}$ — номинальный напор), полученные стохастическими методами, приведены в таблице.

Таким образом, уже на этапе создания таблицы данных эксперимента происходит оптимизация с использованием стохастического ме-

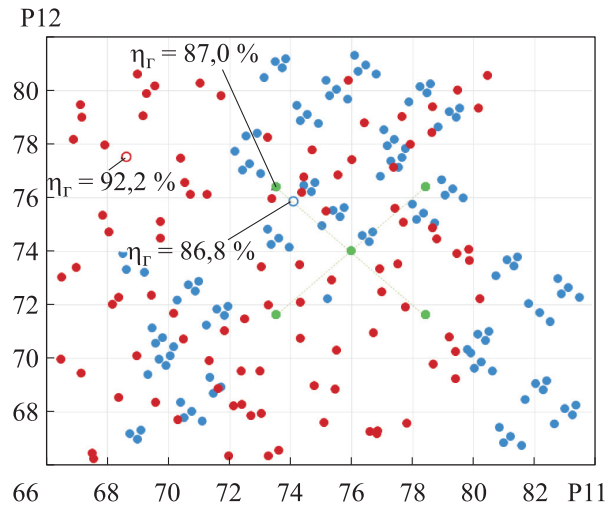


Рис. 3. Расчетные распределения параметров P11 и P12 в пространстве, полученные методами ЛП-тау (●), латинского гиперкуба (●) и центрального композиционного плана (●)

тогда, который позволяет отыскать точку в окрестностях глобального экстремума целевой функции.

Как видно из рис. 3, метод латинского гиперкуба по сравнению с методами ЛП-тау и центрального композиционного плана обеспечивает более равномерное распределение параметров в пространстве, что позволило найти вариант геометрической формы ПЧ с гидравлическим КПД насоса $\eta_r = 92,2\%$.

Для более объективной оценки эффективности метода поиска ЛП-тау диапазон изменения входных параметров в таблице поиска был расширен до $\pm 15\%$. Создана новая таблица эксперимента и проведен расчет в новых точках. Расширение диапазона изменения параметров для метода ЛП-тау не увеличило равномерность распределения исследовательских точек и не позволило найти вариант с более высоким гидравлическим КПД насоса. Сделан вывод, что при использовании метода ЛП-тау для более точного нахождения глобального экстремума недостаточно 128 расчетных точек при девятнадцати входных параметрах.

На основе таблицы эксперимента построена поверхность отклика — метамодель, описывающая аналитическую зависимость выходных параметров от входных. Для аппроксимации данных в таблице DOE в DesignXplorer можно применить один из шести методов: генетическую агрегацию, полином второго порядка, кригинг, непараметрическую регрессию, нейронную сеть и разреженную сетку.

Использован метод Genetic Aggregation, который с целью повышения качества создаваемой поверхности для каждого параметра запускает итерационный генетический алгоритм. График статистических критериев (Goodness Of Fit) позволяет удостовериться в верности аппроксимации расчетных данных и оценить качество созданной RSO (рис. 4).

Как видно из рис. 4, расчетные точки выходных параметров достаточно близко ложатся на прямую линию. Это означает, что спрогнозировано достаточно высокое качество поверхности отклика.

Качество RSO также оценивается по значениям коэффициента детерминации R^2 , среднеквадратической ошибке, относительной среднеквадратической ошибке и относительной ошибке абсолютного максимума. Коэффициент детерминации R^2 (определяемый как разность единицы и доли дисперсии случайной ошибки модели) показывает, насколько хорошо RSO отражает изменчивость выходного параметра (он должен быть как можно ближе к единице).

Для учета влияния входных параметров на выходные с использованием инструментов Local Sensitivity выполнен анализ чувствительности. Столбчатая диаграмма чувствительности (рис. 5) показывает изменение выходного параметра при изменении каждого из входных. Здесь высота столбца зависит от относительной величины $(Output_{max} - Output_{min})/Output_{avg}$, где $Output_{max}$, $Output_{min}$ и $Output_{avg}$ — максимальное, минимальное и среднее значение параметра соответственно.

Результаты расчета стохастическими методами

Метод	Количество точек	Диапазон варьирования		$\eta_{r, \max}$ %	$H_{\text{ном}}$, м
		η_r , %	H , м		
ЛП-тау	128	30,0...87,0	0,6...6,0	86,8	4,47
Латинский гиперкуб	100	12,0...92,2	0,1...6,4	92,2	4,92
Центральный композиционный план	551	83,0...87,0	2,9...5,2	87,0	4,17

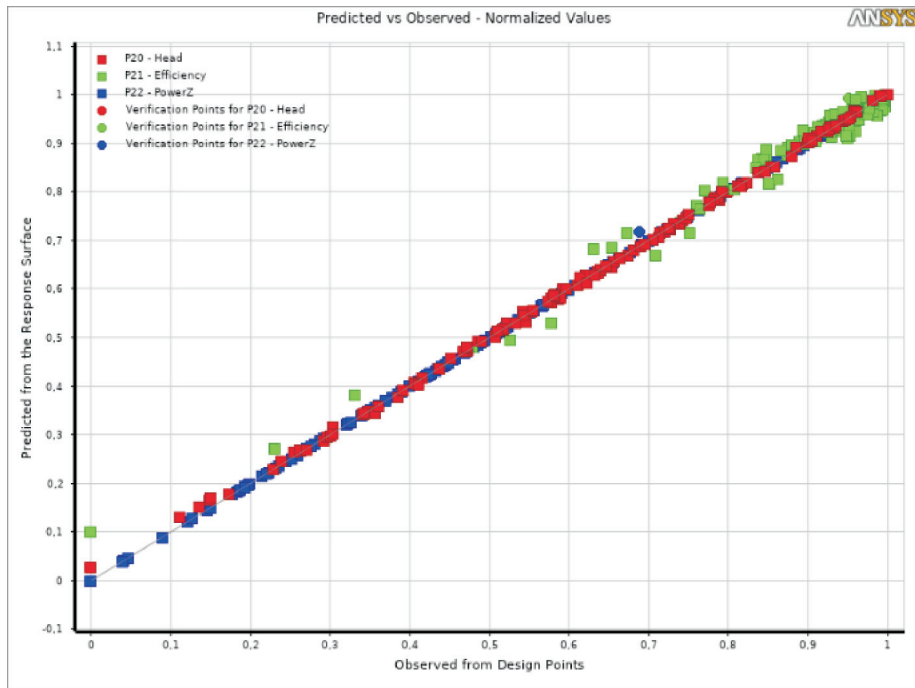


Рис. 4. График прогноза качества RSO

Как видно из рис. 5, на напор осевого насоса наибольшее влияние оказывают следующие параметры: P11 — угол в средней точке лопасти РК на периферии, P12 — выходной угол лопасти РК на периферии, P14 — угол в средней точке лопасти РК на втулке, P15 — выходной угол лопасти РК на втулке, P10 — входной угол

установки лопасти РК на периферии и КПД насоса.

Максимальное значение гидравлического КПД $\eta_{\Gamma \max}$ определенное по RSO, составило 93,1 % при напоре насоса $H = 4,51$ м.

Оптимизация по RSO выполнено по аналитической функции — метамодели с использо-



Рис. 5. Столбчатая диаграмма чувствительности

P20 - Head (Pa)			P21 - Efficiency (kg m ⁻² s ⁻³)		P22 - PowerZ (J)
Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference		
★★★ 4,3149	2,53%	★★★ 95,479	0,03%		17631
★★★ 4,4228	5,09%	★★★ 85,479	-10,45%		18383
★★★ 4,235	0,63%	★★★ 95,471	0,02%		17377
★★★ 4,3412	3,15%	★★★ 85,556	-10,37%		18028
★★★ 4,2085	0,00%	★★★ 95,455	0,00%		17334
★★★ 4,372	3,89%	★★★ 85,654	-10,27%		18135

Рис. 6. Результаты верификации расчетных точек

ванием какого-либо алгоритма, заложенного в DesignXplorer (Screening, NLPQL, MISQP, MOGA). Такая оптимизация требует небольших затрат времени и вычислительной мощности, которые расходятся только на этапе расчета данных в таблице эксперимента. По результатам оптимизации методом MOGA для данной поверхности установлено, что лучший вариант геометрической формы ПЧ имеет гидравлический КПД $\eta_r = 95,4$ %. Значения выходных параметров в итоговой таблице расчета выделены цветом. Это означает, что их значения являются приближенными и содержат в себе возможность погрешности аппроксимации RSO в окрестностях глобального экстремума.

Поэтому полученное максимальное значение гидравлического КПД требует верификации — подтверждения прямым гидродинамическим расчетом данного варианта ПЧ. DesignXplorer позволяет проверить точки-кандидаты, обновляя их в режиме реального расчета. Результаты «реального» расчета, выделенные черным шрифтом, отображены рядом со значениями, вычисленными по RSO (рис. 6).

Проверочные расчеты показали, что значения гидравлического КПД лучших вариантов ПЧ, полученные путем оптимизации по поверхности отклика, не совпадают с результатами «реального» расчета и завышены примерно на 10 %. Это означает, что в области глобального экстремума RSO построена недостаточно точно и требуется ее корректировка.

В связи с этим пересчитанные точки-кандидаты были добавлены в качестве уточняющих точек (Refinement Point), и повторно создана новая RSO. Максимальное значение гидравлического КПД по вновь созданной поверх-

ности отклика уменьшилось до 92,9 % при напоре насоса $H = 4,84$ м.

Далее проводилась оптимизация по поверхности отклика с использованием метода NLPQL, представляющего собой градиентный алгоритм, основанный на квазиньютоновских методах. После двенадцати шагов поиска по уточненной поверхности отклика гидравлический КПД лучшего варианта ПЧ составил 93,9 %.

Для достижения требуемой точности результатов оптимизации по созданной метамодели требуется провести несколько итераций по уточнению RSO и верификации полученных значений лучших точек-кандидатов. Качество создаваемой поверхности отклика изначально зависит от метода аппроксимации.

Когда метамоделю создана, верифицирована и обеспечивает допустимую погрешность вычисления выходных параметров, выбранный метод оптимизации с использованием метамодели уже не будет иметь большого значения, так как оптимизация по аналитической функции по сравнению с таковой прямыми методами дает большое преимущество по времени.

Выводы

1. Оптимизация с использованием метамодели является перспективным методом, так как требует минимальных затрат времени и ресурсов. Однако необходимо добиться, чтобы созданная метамоделю (суррогатная математическая модель) обладала достаточной точностью, особенно в окрестности глобального экстремума целевой функции.

2. При создании плана эксперимента необходимо обеспечить более равномерное распре-

деление точек в пространстве параметров. Это позволит найти глобальный экстремум и существенно повысит качество прогноза поверхности отклика. Наиболее экономичным и эффективным среди рассмотренных является метод латинского гиперкуба.

3. На основе анализа чувствительности вместо первоначальных девятнадцати входных па-

раметров для оптимизационного исследования выбраны шесть, которые оказывают наибольшее влияние на интегральные характеристики насоса.

4. С использованием описанного алгоритма достигнуто повышение гидравлического КПД исходного варианта насоса с 84 до 93 %.

Литература

- [1] Volkov A.V., Parygin A.G., Ryzhenkov A.V. et al. Optimization algorithm of parameters of low head microhydropower plant at an early design stage. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 2016, vol. 11, no. 22, pp. 10878–10886.
- [2] Соболев И.М., Статников Р.Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва, Дрофа, 2006. 175 с.
- [3] Чабурко П.С., Ломакин В.О., Кулешова М.С. и др. Комплексная оптимизация проточной части герметичного насоса методом ЛП-Тау поиска. *Насосы. Турбины. Системы*, 2016, № 1, с. 55–61.
- [4] Твердохлеб И., Костюк А., Соколов С. Современный подход к энергоэффективности насосного оборудования. *Насосы и оборудование*, 2014, № 4–5, с. 20–21.
- [5] Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н. и др. *Численное моделирование течений в турбомашинных*. Новосибирск, Наука, 2006. 202 с.
- [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 гидропневмоавтоматика. Сб. науч. тр. Межд. науч.-тех. конф.* Санкт-Петербург, Изд-во СПбПУ, 2016, с. 114–123.
- [7] Гарагулова А.К., Горбачева Д.О., Чирков Д.В. Сравнение генетических алгоритмов MOGA и NSGA-II на задаче оптимизации формы рабочего колеса гидротурбины. *Вычислительные технологии*, 2018, т. 23, № 5, с. 21–36, doi: <https://doi.org/10.25743/ICT.2018.23.5.003>
- [8] Гарагулова А.К. Ускорение алгоритмов многоцелевой оптимизации путем использования суррогатных моделей. *Тез. XIX Всерос. конф. молод. ученых по математическому моделированию и информационным технологиям*. Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2018, с. 15–16.
- [9] Валюхов С.Г., Галдин Д.Н., Коротков В.В. и др. Использование аппроксимационных моделей для выполнения оптимизации профиля рабочего колеса центробежного насоса. *Насосы. Турбины. Системы*, 2020, № 2, с. 58–65.
- [10] Чубань М.А. Аппроксимация поверхности отклика для использования в процессе параметрического синтеза машиностроительных конструкций. *Вестник Нац. техн. ун-та ХПИ*, 2015, № 43, с. 161–164.
- [11] Валюхов С.Г., Оболонская Е.М., Боровикова М.М. Оптимизация двухзавиткового отвода центробежного насоса с помощью программного комплекса ANSYS. *Труды МНТК СИНТ21*. Воронеж, 2021, с. 9–17.
- [12] Галдин Д.Н., Кретицин А.В., Печкуров С.В. Оптимизация профиля пространственного рабочего колеса центробежного насоса с использованием параметризованной модели проточной части и искусственной нейронной сети. *Труды МНТК СИНТ21*. Воронеж, 2021, с. 31–42.
- [13] Азарх Д.Н., Попова Н.В. *Осевые насосы*. Москва, ВИГМ, 1961. 36 с.
- [14] Свобода Д.Г., Жарковский А.А., Иванов Е.А. Создание осевых насосов с высоким КПД и незападающей формой характеристики. *Вестник машиностроения*, 2019, № 4, с. 37–41.
- [15] *TurboGrid user's guide*. Release 18.2. ANSYS, 2017. 187 p.

References

- [1] Volkov A.V., Parygin A.G., Ryzhenkov A.V. et al. Optimization algorithm of parameters of low head microhydropower plant at an early design stage. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 2016, vol. 11, no. 22, pp. 10878–10886.
- [2] Sobol' I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Choice of optimal parameters in multicriteria problems]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 175 p. (In Russ.).
- [3] Chaburko P.S., Lomakin V.O., Kuleshova M.S. et al. Complex wet end part optimization of hermetic pump with LP-Tau method. *Nasosy. Turbiny. Sistemy* [Pumps. Turbines. Systems], 2016, no. 1, pp. 55–61. (In Russ.).
- [4] Tverdokhlebl I., Kostyuk A., Sokolov S. Modern approach to energy efficiency of pump equipment. *Nasosy i oborudovanie*, 2014, no. 4–5, pp. 20–21. (In Russ.).
- [5] 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.).
- [6] Sokolova M.A., Rigin V.E., Semenova A.V. [Optimization modeling of impeller blade shape “using efficiency dependence on discharge” criteria]. *Gidravlicheskie mashiny, gidropnevmoprivody i gidropnevmootomatika. Sb. nauch. tr. Mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Hydraulic Machines, Hydraulic Pneumatic Actuators and Hydraulic Pneumatic Control Systems. Proc. Sci. Int. Sci.-Tech. Conf.]. Sankt-Petersburg, Izd-vo SPbPU Publ., 2016, pp. 114–123. (In Russ.).
- [7] Garagulova A.K., Gorbacheva D.O., Chirkov D.V. Comparative analysis of MOGA and NSGA-II on the case study of optimization for the profile of the hydraulic turbine runner. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies], 2018, vol. 23, no. 5, pp. 21–36, doi: <https://doi.org/10.25743/ICT.2018.23.5.003> (in Russ.).
- [8] Garagulova A.K. [Speedup of multicriteria optimization algorithm by using surrogate models]. *Tez. XIX Vseros. konf. molod. uchenykh po matematicheskomu modelirovaniyu i informatsionnym tekhnologiyam* [Proc. XIX Russ. Conf. of Young Scientists on Mathematical Modelling and Informaion Technologies]. Novosibirsk, IVT SO RAN Publ., 2018, pp. 15–16. (In Russ.).
- [9] Valyukhov S.G., Galdin D.N., Korotkov V.V. et al. Using approximation models to optimize the impeller profile of a centrifugal pump. *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, 2020, no. 2, pp. 58–65. (In Russ.).
- [10] Chuban' M.A. The approximation of the response surface for using in the process of the parametric synthesis of the engineering structures. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta KhPI*, 2015, no. 43, pp. 161–164. (In Russ.).
- [11] Valyukhov S.G., Obolonskaya E.M., Borovikova M.M. [Optimizing double-volute of centrifugal pump using ANSYS software complex]. *Trudy MNTK SINT21* [Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. SINT21]. Voronezh, 2021, pp. 9–17. (In Russ.).
- [12] Galdin D.N., Kretinin A.V., Pechkurov S.V. [Optimization of a spatial working wheel profile for a centrifugal pump using parametrized model of a flow part and artificial neural network]. *Trudy MNTK SINT21* [Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. SINT21]. Voronezh, 2021, pp. 31–42. (In Russ.).
- [13] Azarkh D.N., Popova N.V. *Osevyie nasosy* [Axial pumps]. Moscow, VIGM Publ., 1961. 36 p. (In Russ.).
- [14] Svoboda D.G., Zharkovskiy A.A., Ivanov E.A. Development of axial pumps with high efficiency and non-falling form of characteristics. *Vestnik mashinostroeniya*, 2019, no. 4, pp. 37–41. (In Russ.).
- [15] *TurboGrid user's guide*. Release 18.2. ANSYS, 2017. 187 p.

Информация об авторах

СВОБОДА Дмитрий Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы энергетического машиностроения. Институт энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая ул., д. 29, e-mail: svoboda.dmitry@gmail.com). svoboda_d@mail.ru).

ИВАНОВ Евгений Александрович — аспирант Высшей школы энергетического машиностроения. Институт энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая ул., д. 29, e-mail: 20evgeniy08@mail.ru).

ЖАРКОВСКИЙ Александр Аркадьевич — доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы энергетического машиностроения. Институт энергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая ул., д. 29, e-mail: azharkovsky@pef.spbstu.ru).

ЩУЦКИЙ Сергей Юрьевич — кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора. АО «Центральное конструкторское бюро машиностроения» (190020, Санкт-Петербург, Российская Федерация, наб. Обводного канала, д. 138, к. 1, лит. Б, e-mail: Shutckiy@ckbm.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Свобода Д.Г., Иванов Е.А., Жарковский А.А., Щуцкий С.Ю. Оптимизация проточной части осевого насоса с использованием поверхности отклика. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 8, с. 74–83, doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-74-83

Please cite this article in English as:

Svoboda D.G., Ivanov E.A., Zharkovsky A.A., Shutsky S.Y. Optimization of the Flow Part of an Axial Pump Using the Response Surface. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 8, pp. 74–83, doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-74-83

Information about the authors

SVOBODA Dmitry Gennadyevich — 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, Politekhnikeskaya St., Bldg. 29, e-mail: svoboda.dmitry@gmail.com).

IVANOV Evgeny Aleksandrovich — Postgraduate Student, Higher School of Power Engineering. Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, Russian Federation, Politekhnikeskaya St., Bldg. 29, e-mail: 20evgeniy08@mail.ru).

ZHARKOVSKY Aleksandr Arkadyevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Higher School of Power Engineering. Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, Russian Federation, Politekhnikeskaya St., Bldg. 29, e-mail: azharkovsky@pef.spbstu.ru).

SHUTSKY Sergey Yuryevich — Candidate of Science (Eng.), First Deputy General Director. JSC "Central Design Bureau of Mechanical Engineering" (190020, Saint Petersburg, Russian Federation, Emb. Obvodnogo kanala, Bldg. 138, Block 1, lit. B, e-mail: Shutckiy@ckbm.ru).