

УДК: 621.22.011

А.В. Ратушный

Сумський Государственный Университет

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАПИЛЛЯРНОГО НАСОСА

В статье рассматриваются методологические основы определения оптимальных параметров конструкции капиллярного насоса. Такая конструкция должна обеспечить максимальные значения интегральных характеристик насоса – напора и КПД. Её выявление предлагается выполнить методом планирования эксперимента и нахождения соответствующего сочетания геометрических параметров капиллярного насоса.

Ключевые слова: капиллярный насос, оптимальные параметры, методика определения

О.В. Ратушний**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КАПІЛЯРНОГО НАСОСА**

У статті розглядаються методологічні основи визначення оптимальних параметрів конструкцій капілярного насоса. Така конструкція повинна забезпечити максимальні значення інтегральних характеристик насоса - напору і ККД. Її виявлення пропонується здійснити шляхом планування експерименту і знаходження відповідного поєднання геометричних параметрів капілярного насоса.

Ключові слова: капілярний насос, оптимальні параметри, методика визначення

A. Ratushnyi**METHOD OF DETERMINING THE OPTIMAL PARAMETERS OF A CAPILLARY PUMP**

The article discusses the methodological basis for determining the optimal design parameters of a capillary pump. Such a design should provide maximum values of the integral characteristics of the pump - head and efficiency. It is proposed to identify it by planning the experiment and finding the appropriate combination of the geometric parameters of a capillary pump.

Keywords: capillary pump, optimal parameters, method of determination

Вступлення. При разработке насосного оборудования, в том числе и работающего на принципиально новых физических принципах [1], в отличии от традиционных [2], необходимо знать, как влияют отдельные геометрические параметры рабочего органа на интегральные характеристики и правильно определять оптимальные соотношения между этими параметрами с целью обеспечения максимальной экономичности и эффективности насоса. Рабочий орган капиллярного насоса может представляться как пучок капилляров, сгруппированный тем или иным способом (рис. 1).

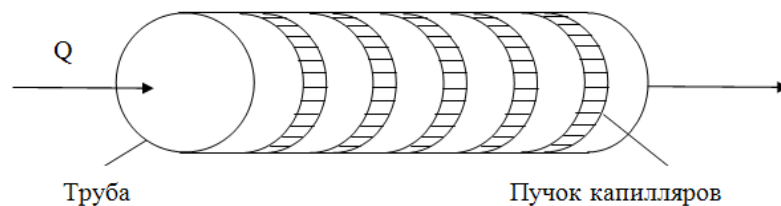


Рис. 1. Конструкция капиллярного насоса

Постановка проблемы. Исходя из приведённого в [3] анализа особенностей функционирования капиллярного насоса, можно утверждать, что достижение им максимальной напорности и КПД определяется в основном геометрией рабочего органа – то есть диска с пучком капилляров (рис 1). Так как процессы, происходящие в любом насосе, являются многофакторными, то для выявления оптимального соотношения геометрических параметров рабочего органа необходимо создать модель, характеризующую зависимость напора и КПД одновременно от нескольких основных влияющих факторов процесса. Исходя из опыта и рекомендаций решения подобных задач [4,5], было решено воспользоваться методикой планирования эксперимента [6-8].

Цели и задачи исследования. Цель исследования можно сформулировать следующим образом: разработать методику определения оптимальных параметров капиллярного насоса для обеспечения максимальных значений его интегральных характеристик.

Задача исследования: выбрать параметры оптимизации, основные факторы и уровни их варьирования, составить матрицу планирования, получить уравнение регрессии, получить в общем виде оптимальное соотношение факторов.

Методология исследования. В качестве методологии данного исследования использовались методики решения многокритериальных задач оптимизации.

Изложение основного материала. На данном этапе была поставлена задача получить математические модели зависимости напора и КПД от геометрических параметров рабочего органа капиллярного насоса – задача одновременного рассмотрения нескольких параметров оптимизации. Исследование сводилось к решению компромиссной задачи нахождения условного экстремума для одной поверхности отклика при ограничениях, накладываемых другой. Для этого использовался метод неопределённых множителей Лагранжа. Данный метод относительно несложен, хорошо зарекомендовал себя при планировании эксперимента и позволяет получить количественную оценку влияния отдельных параметров рабочего органа на параметры оптимизации, установить оптимальное соотношение его геометрических параметров, обеспечивающих максимальное повышение напора при варьируемых в приемлемом диапазоне значениях КПД.

В качестве параметров оптимизации были приняты напор (y_h) и КПД (y_n) рабочего органа. Исходя из ранее проведённых исследований, в качестве основных факторов, влияющих на параметры оптимизации, были приняты:

x_1 – толщина единичного диска с пучком капилляров l , мм;

x_2 – диаметр единичного капилляра d , мм

x_3 – диаметр капиллярного диска D , мм;

x_4 – расстояние между соседними капиллярными дисками s , мм.

Основные уровни и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Факторы	Кодовые обознач.	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			верхний +1	основной 0	нижний -1
l , мм	x_1	3	13	8	5
d , мм	x_2	0,2	0,6	0,4	0,2
D , мм	x_3	10	35	25	15
s , мм	x_4	3	13	8	5

Таблица 2

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
1	1	1	1	1	1
2	1	-1	1	1	1
3	1	1	-1	1	1
4	1	-1	-1	1	1
5	1	1	1	-1	1
6	1	-1	1	-1	1
7	1	1	-1	-1	1
8	1	-1	-1	-1	1
9	1	1	1	1	-1
10	1	-1	1	1	-1
11	1	1	-1	1	-1
12	1	-1	-1	1	-1
13	1	1	1	-1	-1
14	1	-1	1	-1	-1
15	1	1	-1	-1	-1
16	1	-1	-1	-1	-1

В качестве плана эксперимента был принят полный факторный эксперимент, позволяющий получить оценки влияния каждого фактора на параметры оптимизации. Факторный эксперимент осуществляем с помощью матрицы планирования (табл. 2), одинаковой для всех схем, в которой использовались кодированные значения факторов [8**Помилка! Закладку не визначено.**]. Параметры оптимизации предлагается вычислять в каждом опыте при одинаковом количестве капилляров, принятом равным 10.

Для оптимизационного анализа использовали линейную модель:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4, \quad (1)$$

где b_i – значение коэффициентов уравнения регрессии.

Они определяются следующим образом:

$$b_i = \sum_1^N \frac{x_{ij}y_j}{N}, \quad (2)$$

где x_{ij} – кодированное значение i -го фактора в j -м опыте;

y_j – значение параметра оптимизации в j -м опыте;

N – число опытов в матрице планирования.

Дисперсию параметра оптимизации вычисляем по результатам трёх опытов в центре плана, то есть при $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 0$.

Дисперсия параметра оптимизации

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{u=s} (y_u - \bar{y})^2}{n_o - 1}, \quad (3)$$

где n_o – число опытов в центре плана;

y_u – значение параметра оптимизации в u -м опыте в центре плана.

Дисперсия коэффициентов регрессии

$$s^2\{b_i\} = \frac{s_y}{N}, \quad (4)$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b_i = t \cdot s^2\{b_i\}, \quad (5)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента. Согласно [8**Помилка! Закладку не визначено.**] принимаем $t = 2,2$.

Далее необходимо определить величины коэффициентов регрессии, которые больше соответствующих доверительных интервалов. Они будут являться статистически значимыми.

Проверку адекватности моделей производится по F -критерию Фишера [8].

$$F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2}, \quad (6)$$

Дисперсия адекватности

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{f}, \quad (7)$$

где y_j – экспериментальное значение параметра оптимизации в j -м опыте;

\hat{y}_j – значение параметра оптимизации;

f – число степеней свободы, $f = N - (k + 1)$, k – число факторов, равное 4.

Табличное значение F_m согласно [8] принимаем 19,4 для всех схем и параметров оптимизации. Адекватность моделей оценивалась, исходя из сравнения F_m и F_p . Модель следует признать адекватной, если выполняется условие $F_m > F_p$ или же $F_m - F_p > 0$.

Уравнения, получаемые из (1), с соответствующими числовыми значениями b_i , связывающие параметры оптимизации с основными факторами, являются также функцией отклика. Для нахождения оптимальных значений параметров оптимизации необходимо решить компромиссную задачу методом неопределённых множителей Лагранжа. Необходимо найти режимы, обеспечивающие максимальный напор рабочего органа при задаваемых значениях КПД капилляра. Отметим, что определение диапазона возможных значений КПД капилляра является предметом отдельного исследования и в данной статье не рассматривается. Каждому из этих значений будут отвечать значения максимального напора. Режимы, обеспечивающие выполнение данного требования и будут являться оптимальными. Они могут быть установлены нахождением условного максимума функции y_h при ограничениях, налагаемых функцией y_h .

Для решения этой задачи составляем вспомогательная функция $F(x_1, x_2, x_3, x_4, \lambda)$, которая может быть представлена в виде

$$F = f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \lambda[\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4) - y_h], \quad (8)$$

где $f(x_1, x_2, x_3, x_4) = b_{0h} + b_{1h}x_1 + b_{2h}x_2 + b_{3h}x_3 + b_{4h}x_4$;

$\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4) = b_{0\eta} + b_{1\eta}x_1 + b_{2\eta}x_2 + b_{3\eta}x_3 + b_{4\eta}x_4$.

Дифференцируя $F(x_1, x_2, x_3, x_4, \lambda)$ по $x_1, x_2, x_3, x_4, \lambda$ соответственно и приравнявая к нулю частные производные, получим систему уравнений. Решая эту систему при заданном значении y_h , находим точки условных экстремумов. Однако при решении полученной системы найденные значения x_1, x_2, x_3, x_4 могут выходить за область эксперимента, поэтому исследуемое факторное пространство необходимо ограничить поверхностью

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = \rho^2 \quad (6)$$

и находить условные экстремумы, варьируя ρ . При этом данный параметр увеличиваем до тех пор, пока корни системы находятся в области эксперимента или незначительно выходят из неё.

Максимальное значение ρ можно найти, используя зависимость кодированных значений факторов x_1 - x_4 и натуральных:

$$x_i = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^o}{\varepsilon_i}, \quad (10)$$

где x_i – натуральное значение i -го фактора;

\bar{x}_i^o – натуральное значение основного уровня i -го фактора;

ε_i – интервал варьирования i -го фактора.

Придавая x_i предельные значения и используя зависимость (9) можно определить область допустимых значений ρ , при которой значения факторов оставались в области эксперимента. Вспомогательная функция в данном случае имеет вид:

$$F = b_{0h} + b_{1h}x_1 + b_{2h}x_2 + b_{3h}x_3 + b_{4h}x_4 + \lambda_1(b_{0\eta} + b_{1\eta}x_1 + b_{2\eta}x_2 + b_{3\eta}x_3 + b_{4\eta}x_4 - y_h) + \lambda_2(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - \rho^2)$$

Дифференцируя её по всем аргументам и приравнявая нулю частные производные, получим следующую систему уравнений, которую при принятых значениях y_h и ρ можно решить с использованием соответствующих программных продуктов, например Mathcad.

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{1h} + b_{1\eta} \lambda_1 + 2x_1 \lambda_2 = 0 \\ b_{2h} + b_{2\eta} \lambda_1 + 2x_2 \lambda_2 = 0 \\ b_{3h} + b_{3\eta} \lambda_1 + 2x_3 \lambda_2 = 0 \\ b_{4h} + b_{4\eta} \lambda_1 + 2x_4 \lambda_2 = 0 \\ b_{0\eta} + b_{1\eta} x_1 + b_{3\eta} x_3 + b_{4\eta} x_4 - y_\eta = 0 \\ x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - \rho^2 = 0 \end{array} \right.$$

Выводы. Сформулированная методика поиска оптимальной конструкции капиллярного насоса для обеспечения его максимального напора и КПД позволяет изготовить необходимое количество исследуемых моделей методом 3d-печати с наперед известными геометрическими параметрами. Далее планируется проведение натурных испытаний соответствующих образцов. По их результатам путём расчёта по представленной методике и будет получено оптимальное сочетание параметров насоса.

Список использованных источников:

1. Ратушный, А. В. Путь к новой парадигме развития: особенности перехода к VI технологическому укладу и постиндустриальному обществу / А. В. Ратушный, А. А. Дрофа // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки») — 2017. № 60 — С. 199-205.
2. Михайлов, А. К. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование. / А. К. Михайлов, В. В. Малюшенко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 288 с.
3. Ратушный, А.В. Концепция капиллярного насоса [Текст] / А.В. Ратушный, Д.Р. Васильченко, А.А. Дрофа // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки»). — 2018. — Вип. 63 — С. 189-195.
4. Мандрыка А.С. Оптимизация реверсивных насосных решеток с применением планирования эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст]/ А.С. Мандрыка. // Энергетическое машиностроение. – 1972. – № 16. – с. 112-118.
5. Герман В.Ф. Создание и исследование сточно-массных свободновихревых насосов повышенной экономичности: автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.04.13/ В. Ф. Герман. – М., 1985. – 15 с.
6. Львовский Е.Н. Статические методы построения эмпирических формул [Текст] / Е.Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.
7. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
8. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А.А. Спиридонов. – М.: Наука, 1981. – 279 с.

Рецензент:

Ковалёв И.А. к.т.н, профессор, заведующий кафедрой Прикладной гидроаэромеханики СумГУ

Стаття надійшла до редакції 15.12.2018