

УДК [627.83:627.82] (575.2) (04)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВХОДНОГО ОГОЛОВКА ОРТО-ТОКОЙСКОГО КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ВОДОСБРОСА

О.В. Атаманова – докт. техн. наук, доц.
А.С. Костина – аспирантка

Optimization of entrance hatchway parameters of Orto-Tokoy emergency spillway with use of the experiment planning is described.

Для увеличения пропускной способности входного оголовка катастрофического водосброса была предложена [1] усовершенствованная конструкция комбинированного водослива практического профиля (рис. 1). Водосливной пролет предложенного водослива выполнен в форме сложной трапеции, что позволило увеличить пропускную способность водослива при больших напорах воды.

С целью оптимизации параметров предложенной конструкции необходимо было провести гидравлические исследования с использованием оптимального планирования экспериментов.

Решение задачи оптимального планирования экспериментов осуществляли по методу

Бокса-Уилсона (крутое восхождение) [2] путем сочетания движения по градиенту с методом факторного планирования. При этом движение к оптимуму свершалось по кратчайшему пути. Алгоритм поиска точки экстремума по методу крутого восхождения сводился к следующему:

- проводился полный факторный эксперимент (ПЭФ) с центром в точке;
- выполнялся статистический анализ полученных данных с вычислением оценки параметров (коэффициентов регрессии b_i), которые являются составляющими вектора-градиента;

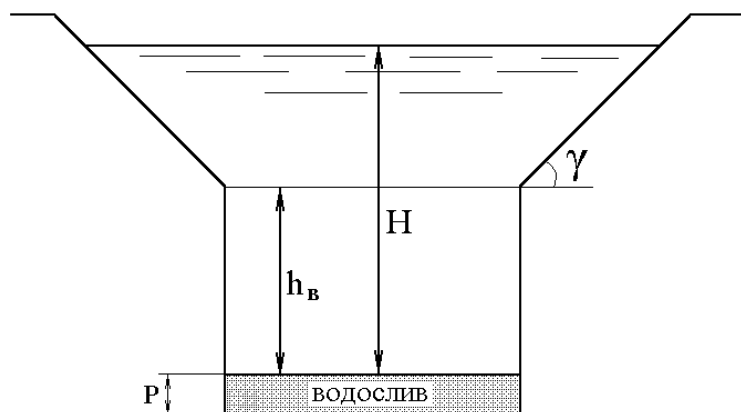


Рис. 1. Конструкция усовершенствованного входного оголовка.

➤ выбирались несколько значений параметров λ , определяющего положение точек на линии крутого восхождения. Для этого выполнялось следующее:

- а) находились произведения $b_i \Delta \tilde{x}_i$;
- б) устанавливался сектор, для которого произведение $b_i \Delta \tilde{x}_i$ являлось максимальным по абсолютной величине $\max_i \{ |b_i \Delta \tilde{x}_i| \} = |b_0| \Delta \tilde{x}_0$. Этот фактор назначался базовым;
- в) выбиралось значение параметра $\lambda = \lambda_l$ для первого шага восхождения:

$$\lambda_l = \frac{\mu}{|b_0|}; \quad (1)$$

причем сдвиг по базовому фактору $\tilde{x}_0 - \tilde{x}_{00}$ от основного уровня принимался не превышающим интервал варьирования $\Delta \tilde{x}_0$, поэтому $\mu = 0 \dots 1$;

г) вычислялись шаги и координаты первой точки крутого восхождения:

$$\begin{cases} \tilde{x}_i^{(1)} - x_{i0} = \frac{\mu}{|b_0|} (b_i \Delta \tilde{x}_i) = \lambda_l (b_i \Delta \tilde{x}_i); \\ \tilde{x}_i^{(1)} = \lambda_l (b_i \Delta \tilde{x}_i) + \tilde{x}_{i0}; \end{cases} \quad (2)$$

д) определялись шаги и координаты последующих точек по линии восхождения:

$$\begin{cases} \tilde{x}_i^{(h)} - \tilde{x}_{i0} = \lambda_h (b_i \Delta \tilde{x}_i) = h \lambda_l (b_i \Delta \tilde{x}_i); \\ \tilde{x}_i^{(1)} = \lambda_l (b_i \Delta \tilde{x}_i) + \tilde{x}_{i0}; \end{cases} \quad (3)$$

где h – номер шага по пути восхождения;

е) выбирался опыт, имеющий наилучший результат;

➤ условия наилучшего опыта принимались за основной уровень в следующей серии опытов, и цикл крутого восхождения повторялся.

Поиск прекращался, когда все коэффициенты b_i линейной модели объекта становились незначительными. Это свидетельствовало о выходе целевой функции в область экстремума.

В соответствии с принятым алгоритмом на основе априорного ранжирования были выбраны следующие оптимизированные факторы исследуемой конструкции: напор на водосливе H , высота прямоугольной части водослива h , высота порога p , угол наклона боковой стенки γ . В качестве параметра оптимизации целесообразно было назначить коэффициент расхода водослива M , характеризующий его пропускную способность:

$$M = \frac{Q}{b\sqrt{2g}H^{3/2}}, \quad (4)$$

где Q – расход истечения; b – длина водослива по гребню.

Анализ априорных данных позволил выбрать основные условия факторов и интервалы варьирования (табл. 1) с последующей реализацией плана эксперимента 2.

Матрица планирования эксперимента, отклики опытов и расчетные столбцы взаимодействия факторов при исследовании водосливов приведены в табл. 2.

Возможности проведения регрессионного анализа проверялись однородностью дисперсий по критерию Кохрена [2]:

$$G_{расч} = \frac{S_{n\max}^2}{\sum_1^n S_n^2} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{1,05 \cdot 10^{-3}} = 0,143, \quad (5)$$

Таблица 1

Уровни варьируемых факторов

Уровень фактора	Кодовые обозначения	Напор H , мм	Высота h , мм	Высота порога P , мм	Угол наклона γ , градус
		x_1	x_2	x_3	x_4
Основной уровень	0	75	60	40	45
Интервал варьирования	Δx_i	10	5	5	15
Верхний уровень	+1	85	65	45	60
Нижний уровень	-1	65	55	35	30

где $S_{n\max}^2$ – максимальная дисперсия, $\sum_1^n S_n^2$ – суммарная дисперсия (табл. 2).

При сравнении с табличным значением для степеней свободы числителя $f_1=2$ и знаменателя $f_2=16$ при уровне значимости $\alpha=0,05$ (5% ошибка):

$$G_{табл}(2; 16; 0,05)=0,335$$

$$0,143 < 0,335, \quad (6)$$

т.е. $G_{расч} < G_{табл}$.

Из (6) следует, что гипотеза об однородности дисперсий результатов проведенных опытов может быть принята.

Рассчитанная дисперсия воспроизводимости:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_1^N S_n^2 = \frac{1,05 \cdot 10^{-3}}{16} = 6,56 \cdot 10^{-5}, \quad (7)$$

где N – число опытов.

На основе (7) определим ошибку эксперимента:

$$S_y = \sqrt{S_y^2} = \sqrt{6,56 \cdot 10^{-5}} = 0,0081. \quad (8)$$

Значимость коэффициентов проверялась по критерию Стьюдента [2]. Для полного факторного эксперимента ошибки всех коэффициентов уравнения регрессии равны между собой и определяются следующим образом:

$$S_{(b_i)} = \frac{S_y}{\sqrt{N \cdot r}} = \frac{0,0081}{\sqrt{16 \cdot 3}} = 0,0012, \quad (9)$$

где r – повторность опытов.

Доверительный интервал $2\Delta b_i$ включает критическое значение критерия Стьюдента $t_{кр}$, которое выбиралось для числа степеней свободы $N(r-1)=16(3-1)=32$ и при уровне зависимости $\alpha=0,05$ выбранное значение $t_{кр}=2,038$. Расчетное значение половины доверительного интервала:

$$\Delta b_i = t_{кр} \cdot S_{(b_i)} = 2,038 \cdot 0,0012 = 0,0024. \quad (10)$$

Анализируя значимость коэффициентов регрессии, можно сделать вывод о том, что незначимым можно признать воздействие факторов x_1x_3 , x_2x_3 , x_2x_4 , x_3x_4 , $x_1x_2x_3$, $x_1x_3x_4$ поскольку:

$$b_{13} = -0,0006 < \Delta b_i = 0,0024$$

$$b_{23} = 0,0019 < \Delta b_i = 0,0024$$

$$b_{24} = -0,0006 < \Delta b_i = 0,0024$$

$$b_{34} = -0,0006 < \Delta b_i = 0,0024$$

$$b_{123} = 0,0006 < \Delta b_i = 0,0024$$

$$b_{134} = 0,0019 < \Delta b_i = 0,0024$$

При этом мы не можем удалить из уравнения одночлен b_3x_3 , как одного из четырех основных составляющих, даже несмотря на малое влияние на процесс фактора x_2 [4].

Проверка адекватности математической модели проводилась по критерию Фишера [3]:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum(\bar{y} - \hat{y})^2}{N - (K + 1)} = \frac{0,000716}{16 - 9} = 1,02 \cdot 10^{-4}, \quad (11)$$

где $(K+1)$ – количество значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Расчетные значения критерия Фишера:

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S_n^2} = \frac{1,02 \cdot 10^{-4}}{1,0510^{-3}} = 0,1. \quad (12)$$

Табличный критерий Фишера:

$$F_{табл}(005; 7; 32) = 2,3.$$

Поскольку $F_{расч} < F_{табл}$, можно сделать заключение о адекватности линейной математической модели:

$$\hat{y} = 0,463 + 0,0031x_1 - 0,0031x_2 + 0,002x_3 -$$

$$-0,0144x_4 + 0,008x_1x_2 - 0,0094x_1x_4 -$$

$$-0,0044x_2x_3x_4 + 0,0031x_1x_2x_3x_4. \quad (13)$$

Пользуясь уравнением (13), реализуем движение по градиенту в поисках оптимума. Расчеты сведем в табл. 3.

В результате проведения серии опытов был получен ряд оптимизируемых параметров комбинированного входного оголовка и водослива практического профиля. При восхождении по градиенту были установлены наиболее рациональные параметры выбранных факторов для принятых размеров модели сооружения: расчетный напор на водосливе $H_p=73$ мм, допустимая высота прямоугольных стенок $h_g=61$ мм, высота порога водослива $P=43$ мм, угол наклона боковой стенки $\gamma=30^\circ$.

Переведя получены данные с модели на натуру и выразив их в относительных единицах, был сделан вывод о следующих значениях оптимизируемых факторов:

1. Расчетный напор H_p на водосливе определяется из условия пропуск расчетного расхода Q_p . В нашем случае $H_p=2,57$ м.
2. Высоту вертикальной части боковых стенок рекомендуется принять равной $h_g = 0,836 \cdot H_p$ или через высоту водослива $h_g = 1,5 \cdot P$.

Крутое восхождение при оптимизации параметров входного оголовка

Последовательность операции крутого восхождения	Исследуемые факторы				Оптимизируемый параметр			
	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_{1n}	Y_{2n}	Y_{3n}	\bar{Y}_n
Коэффициент регрессии, b_i	0,0031	-0,0031	0,002	-0,0144				
Интервал варьирования, Δx_i	10	5	5	15				
$b_i \Delta x_i$	0,031	-0,016	0,01	-0,22				
Сдвиг по базовому фактору: $\lambda_i = \frac{\mu}{ b_i }$				$\frac{0,5}{0,014}$				
Шаг $\cong \lambda_i(b_i \Delta x_i)$	1,12	-0,6	0,4	-7,9				
Округленный шаг	2	-1	1	-5				
Опыты на линии восхождения:								
1	77	59	41	40	0,45	0,46	0,47	0,46
2	79	58	42	35	0,47	0,47	0,46	0,47
3	81	57	43	30	0,51	0,50	0,51	0,51
4	83	56	44	25	0,50	0,52	0,51	0,51
5	81	57	43	30	0,49	0,50	0,50	0,50
6	79	58	43	30	0,50	0,49	0,51	0,50
7	77	59	43	30	0,49	0,49	0,48	0,49
8	75	60	43	30	0,49	0,48	0,47	0,48
9	73	61	43	30	0,47	0,47	0,48	0,47
10	71	62	43	30	0,43	0,44	0,45	0,44
11	69	63	43	30	0,42	0,42	0,42	0,42

3. Высота порога водослива принимается из условия расположения гребня водослива на отметке НПУ. В нашем случае $P=1,5$ м.
4. Угол наклона боковой стенки трапециевидальной части к линии горизонта должен приниматься $\gamma = 28^\circ \dots 32^\circ$.

Установленные значения конструктивных и гидравлических параметров комбинированного входного оголовка и водослива практического профиля вошли в методику расчета конструкции катастрофического водосброса.

Литература

1. Костина А.С. Пропускная способность входного оголовка поверхностного катастрофического водосброса на примере Орто-Токойской плотины // Архитектура и строительство: Сб. науч. тр. – Бишкек, 2003. – С. 292–299.
2. Финни Д. Введение в теорию планирования эксперимента. – М.: Наука, 1970. – 287 с.
3. Гинберг А.М. и др. Оптимизация технологических процессов в гальванотехнике. – М.: Машиностроение, 1972. – 128 с.
4. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1969. – 300 с.