

УДК 504.4.054

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАЩИТЫ ОТ РАЗМЫВА БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ГЭС, ПОСТРОЕННЫХ НА ЛЕСОПОКРЫТЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Гайдуков Г. А.

*ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», Красноярск, Россия (660049, Красноярск, проспект Мира, 82), e-mail: [gaidukov-gennadi@mail.ru](mailto:gaidukov-gennadi@mail.ru)*

Приведена и описана методика обработки экспериментальных данных. Представлен анализ результатов экспериментальных исследований по нахождению коэффициента гашения волны жестким волногасителем и получена математическая модель, описывающая процесс диссипации волны. Полученные данные были проверены на наличие грубых измерений, и таковые были отброшены. После проводилась проверка однородности дисперсий с помощью G-критерия Кохрена, и гипотеза об однородности выборочных оценок дисперсии выходного параметра была принята с доверительной вероятностью 95 %. После был проведен расчет коэффициентов регрессии, с дальнейшей проверкой их значимости, для этого использовался t-критерий Стьюдента, незначимые коэффициенты были исключены. В результате статистической обработки данных экспериментов программой Statgraphics была получена математическая модель в виде уравнения регрессии. По полученной математической модели построили поверхность отклика, она была адекватна. После было выведено уравнение регрессии для натуральных значений факторов.

Ключевые слова: ложе водохранилища, ГЭС, абразионные процессы, размыв берегов, диссипация волн, эрозия.

## PROTECTION FROM EROSION OF THE SHORES OF HYDROELECTRIC RESERVOIRS BUILT IN THE WOODED AREAS

Gaidukov G. A.

*FGBOU VPO "Siberian State Technological University", Krasnoyarsk, Russia (660049, Krasnoyarsk, Mira, 82), E-mail: [gaidukov-gennadi@mail.ru](mailto:gaidukov-gennadi@mail.ru)*

Shows and describes the methodology of data processing. The analysis of the results of experimental studies on the determination of the coefficient of damping the waves hard volnogasitelem and the mathematical model, describing the process of dissipation of wave. The data obtained were beaten, checked for gross measurements and those were rejected. After verification of homogeneity of variances was carried out using the G-Cochran test and the hypothesis of homogeneity of variance of sample estimates of the output parameter was received with a confidence level of 95 %. After we calculated the regression coefficients, with a further test of their significance, for it used t - Student's t test, insignificant factors were excluded. As a result of statistical processing of experimental data was obtained by the program Statgraphics mathematical model in the form of the regression equation. In the resulting mathematical model constructed response surface, it was adequate. After the regression equation was derived for natural values of the factors.

Key words: bed of the reservoir, hydro electric station, abrasion processes, coastal erosion, dissipation of wave, erosion.

### Введение

Строительство крупных ГЭС в Сибири с водохранилищами явилось причиной создания больших открытых акваторий и волн, высота которых зависит от расстояния разгона и ветровых условий.

Под воздействием ветро-волновых нагрузок происходит размыв береговой линии водохранилищ [3].

Размыв берегов является причиной поступления большого количества древесной массы на акваторию водохранилища. Возникает проблема защиты береговой линии от размыва. Волногасители полного профиля для этих целей использовать нецелесообразно. Можно

использовать плавучие волногасители и формировать их из имеющихся на акватории лесоматериалов [4].

В работе представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований жесткого плавучего волногасителя.

В процессе исследований необходимо получить качественный и количественный эффект взаимодействия волн с плавучими волногасителями:

– определить коэффициент гашения волн в зависимости от характеристик волн и геометрических параметров плавающего волногасителя;

– установить математическую модель взаимодействия волн с плавучим волногасителем.

Программа экспериментальных исследований реализована комплексом активных многофакторных опытов.

В основу обработки результатов эксперимента легли регрессивный анализ, включающий метод наименьших квадратов и статистическая обработка данных.

Методы планирования и обработки результатов экспериментов получили широкое распространение и достаточно опробованы [1, 6, 7]. Поэтому коротко отметим основные пункты, которые были выполнены при обработке опытов.

Результаты многофакторного эксперимента обрабатывались методами, разработанными для получения математических моделей с целью описания исследуемого процесса. При планировании были заложены *планы Ко*, которые позволяют аппроксимировать поверхность отклика полиномами общего вида [6].

*Волногаситель – гладкая заякоренная пластина*

Результаты двухфакторного эксперимента (*план Ко-2*) по определению коэффициента гашения энергии волн плавающим волногасителем, который имеет форму пластины без шероховатостей.

В соответствии с задачами исследований необходимо получить математические модели для описания исследуемого процесса в виде функциональной зависимости:

$$K = f(L/\lambda, h), \quad (1)$$

где  $L/\lambda$  – отношение длины волногасителя к длине волны;

$h$  – высота волны.

Уровни варьирования факторов представлены в табл.1.

Количество параллельных опытов предварительно было принято равным  $n=7$ .

Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни			Шаг варьирования	Размерность
	-1	0	1		
$h$	2.5	6.25	10	3.75	см
$L/\lambda$	0.25	0.5	0.75	0.25	-

В результате проведенных опытов получены значения выходных величин и проведен первичный анализ.

Среднее значение выходной величины рассчитывается по формуле:

$$\bar{Y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество повторений опытов.

Выборочные дисперсии по каждому опыту рассчитываются по следующей формуле:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2. \quad (3)$$

Среднеквадратическое отклонение

$$S_j = \sqrt{S_j^2}. \quad (4)$$

Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения выходных величин

№ опыта	Значение выходных величин						
	Y1j	Y2j	Y3j	Y4j	Y5j	Y6j	Y7j
1	3,74	4,00	3,74	3,84	3,61	3,56	4,00
2	2,50	2,30	2,34	2,45	2,45	2,33	2,27
3	2,45	2,90	2,34	2,30	2,27	2,50	2,70
4	1,75	1,89	1,72	1,56	1,71	1,77	1,45
5	1,92	1,88	2,11	1,84	2,00	1,80	1,84
6	1,05	1,15	1,25	1,01	1,06	1,10	1,14
7	1,51	1,50	1,62	1,59	1,73	1,65	1,67
8	1,80	1,55	1,79	1,69	1,81	1,84	1,75
9	1,33	1,08	1,29	1,38	1,45	1,19	1,13

### Проверка на наличие грубых измерений

Наличие дублированных опытов позволяет оценить имеющиеся выборки по каждому опыту на предмет грубых измерений. Для этого сомнительный результат исключают из выборки.

По оставшимся данным вычисляют:

- среднее арифметическое

$$\bar{Y}_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} Y_i}{n-1}, \quad (5)$$

где  $i = 1 \dots 7$ ,

$j = 1 \dots 9$ .

- оценка дисперсии

$$S_j^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-1} (Y_i - \bar{Y}_j)^2. \quad (6)$$

Затем определяется расчетное значение t-критерия Стьюдента для сомнительного результата:

$$t_{\text{расч}} = \frac{|Y_i - \bar{Y}_j|}{S}. \quad (7)$$

По выбранному уровню значимости  $q$  и числу степеней свободы  $f$  находим табличное значение критерия ( $t_{\text{табл}}$ ) по таблице [2]. Табличное значение критерия Стьюдента равно  $t_{\text{табл}} = 2,26$ .

Некоторые значения  $t_{\text{расч}}$  больше чем  $t_{\text{табл}}$ , следовательно, матрица имеет промахи, и дальнейший расчет ведем по статистикам усеченной выборки.

Чтобы избежать промахов – грубых измерений, дальнейшие расчеты проведем по среднему значению усеченной матрицы.

Данные проверки на наличие промахов занесены в таблицу 3.

Таблица 3. Результаты проверки на наличие промахов

№ опыта	Значения выходной величины						Грубая ошибка	Среднее значение	Дисперсия	Стоткл	$T_{\text{расч}}$
	Y1j	Y2j	Y3j	Y4j	Y5j	Y6j					
1	3,74	4,00	3,74	3,84	3,61	4,00	3,560	3,822	0,020	0,155	1,688
2	2,30	2,34	2,45	2,45	2,33	2,27	2,500	2,357	0,005	0,075	1,915
3	2,45	2,34	2,30	2,27	2,50	2,70	2,902	2,426	0,021	0,159	2,983
4	1,75	1,89	1,72	1,56	1,71	1,77	1,447	1,735	0,009	0,106	2,715

5	1,92	1,88	1,84	2,00	1,80	1,84	2,113	1,878	0,004	0,073	3,237
6	1,05	1,15	1,01	1,06	1,10	1,14	1,251	1,082	0,002	0,055	3,090
7	1,51	1,50	1,62	1,59	1,65	1,67	1,731	1,590	0,004	0,070	2,004
8	1,80	1,79	1,69	1,81	1,84	1,75	1,547	1,781	0,002	0,053	4,435
9	1,33	1,29	1,38	1,45	1,19	1,13	1,078	1,295	0,012	0,119	1,829

### Проверка однородности дисперсий

Проверку однородности дисперсий при полученном виде дублирования проводят с помощью G-критерия Кохрена:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}, \quad (8)$$

где  $\sum_{j=1}^N S_j^2$  – сумма всех дисперсий;

$S_{\text{max}}^2$  – наибольшая из всех найденных дисперсий.

$$G_{\text{расч}} = 0,021/0,08=0,26.$$

При уровне значимости  $q=0,05$  для числа степеней свободы каждой выборки  $f = n-1 = 6$  и для числа выборок  $m=9$  найдено  $G_{\text{табл}} = 0,31$

Проверяем однородность дисперсий по критерию Кохрена:

$$G_{\text{расч}} = 0,26 < G_{\text{табл}}(6;9) = 0,31$$

Так как условие  $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$  выполняется, то гипотеза об однородности выборочных оценок дисперсии выходного параметра не отвергается с доверительной вероятностью 95 %.

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле:

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N}. \quad (9)$$

Число степеней свободы для данной процедуры:

$$f_y = N(n-1), \quad (5.10)$$

$$f_y = 9*(7-1) = 54.$$

Дисперсия воспроизводимости равна:

$$S^2\{y\} = 0,0089.$$

Расчет коэффициентов регрессии рассчитывается по матрице базисных функций (таблица 4).

Таблица 4. Матрица для расчетов коэффициентов регрессии

№ опыта	$x_1$	$x_2$	$x_{11}$	$x_{22}$	$x_{12}$	$Y_i$	$Y$
1	1	1	1	1	1	3,82	3,50
2	-1	1	1	1	-1	2,36	2,12
3	1	-1	1	1	-1	2,43	2,29
4	-1	-1	1	1	1	1,74	1,90
5	1	0	1	0	0	1,88	2,13
6	-1	0	1	0	0	1,08	1,15
7	0	1	0	1	0	1,59	2,15
8	0	-1	0	1	0	1,78	1,54
9	0	0	0	0	0	1,30	0,98

Коэффициенты регрессии определяются по следующим формулам:

- свободного члена

$$b_0 = -\frac{1}{9} \sum_{j=1}^4 \bar{Y}_j + \frac{2}{9} \sum_{j=5}^8 \bar{Y}_j + \frac{5}{9} \bar{Y}_9; \quad (12)$$

- линейных коэффициентов регрессии

$$b_i = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^8 x_{ij} \bar{Y}_j; \quad (13)$$

- коэффициентов при парных взаимодействиях

$$b_{ii} = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^4 Y_j - \frac{1}{3} \sum_{j=5}^9 Y_j + \frac{1}{2} \sum_{j=5}^8 x^2_{ij} Y_j; \quad (14)$$

-квadraticных коэффициентов

$$b_{iu} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 x_{ij} x_{uj} Y_j. \quad (15)$$

Формулы для определения дисперсий:

- дисперсия оценки свободного члена

$$S^2\{b_0\} = \frac{5}{9} S^2\{\bar{Y}_j\}; \quad (16)$$

- дисперсия оценки линейных коэффициентов регрессии

$$S^2\{b_i\} = \frac{1}{6} S^2\{\bar{Y}_{ij}\}; \quad (17)$$

- дисперсия оценки коэффициентов при парных взаимодействиях

$$S^2\{b_{ii}\} = \frac{1}{2} S^2\{\bar{Y}_{ij}\}; \quad (18)$$

- дисперсия оценки квадратичных коэффициентов регрессии

$$S^2\{b_{iu}\} = \frac{1}{4} S^2\{\bar{Y}_{ij}\}. \quad (19)$$

Для оценки значимости регрессии используется t-критерий Стьюдента. По следующим формулам определяются расчетные значения t-критерия Стьюдента:

$$t_{расчi} = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}}, \quad (20)$$

$$t_{расчii} = \frac{|b_{ii}|}{S\{b_{ii}\}}, \quad (21)$$

$$t_{расчiu} = \frac{|b_{iu}|}{S\{b_{iu}\}}, \quad (22)$$

где  $S\{b_i\}$  – среднеквадратическое отклонение соответствующих дисперсий коэффициентов регрессии.

Таблица 5. Проверка значимости коэффициентов регрессии

Коэффициенты регрессии		Дисперсия коэффициентов	Среднеквадратическое отклонение	Значения критерия Стьюдента	
обозначения	значения			$t_{расч}$	$t_{табл}$
в0	0,978	0,005	0,070	13,87	2,26
в1	0,492	0,001	0,039	12,74	2,26
в2	0,304	0,001	0,039	7,88	2,26
в11	0,661	0,004	0,067	9,89	2,26
в22	0,867	0,004	0,067	12,97	2,26
в12	0,194	0,002	0,047	4,10	2,26

По критерию t-Стьюдента, по заданному уровню значимости  $q=0,05$  и  $f_y$  – числу степеней свободы, связанному с дисперсией воспроизводимости, находим табличное значение t-критерия Стьюдента:

$$t_{табл} = 2,26.$$

При условии  $t_{расч} < t_{табл}$  коэффициент регрессии значим. В результате статистической обработки данных экспериментов программой Statgraphics была получена математическая модель в виде уравнения регрессии. Была определена значимость коэффициентов регрессии и незначимые коэффициенты были исключены [5].

Получена следующая математическая модель в нормализованных обозначениях факторов:

$$Y = 1,02047 + 0,424563*x_1 + 0,368637*x_2 + 0,596951*x_1^2 + 0,294944*x_1*x_2 + 0,802733*x_2^2. \quad (23)$$

По полученной математической модели была построена поверхность отклика (рисунок 1).

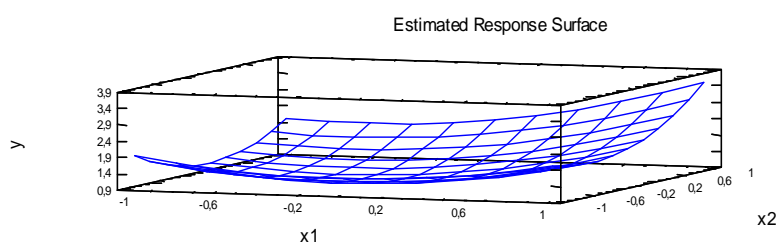


Рисунок 1. Поверхности отклика для коэффициента гашения волны ( $y$ )

Поверхности отклика по полученной математической модели была адекватна.

Уравнение регрессии в натуральных обозначениях факторов:

$$X_1 = (h - 6,25)/3,75; \quad (5.26)$$

$$X_2 = (L/\lambda - 0,5)/0,25. \quad (5.27)$$

Уравнение регрессии для натуральных значений факторов:

$$K = 5,451 - 0,5658h - 13,609L/\lambda + 0,0457h^2 + 0,2614hL/\lambda + 13,328(L/\lambda)^2 \quad (5.28)$$

Поверхность отклика по полученной математической модели была адекватна. Проверка его адекватности была подтверждена.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

Из построенной поверхности отклика видно, что основной параметр, влияющий на коэффициент гашения волны  $K$ , это длина волногасителя  $L$ , при увеличении соотношения  $L/\lambda$  коэффициент гашения увеличивается, т.е. волна, прошедшая за волногаситель, становится меньше.

## Список литературы



1. Адлер, Ю. П. Предпланирование эксперимента / Ю. П. Адлер. – М.: Знание, 1978. – 72 с.
2. Бродский, В.З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В. З. Бродский, Л. И. Бродский, Т. И. Голикова. – М.: Metallurgy, 1982. – 752 с.
3. Лапин, Г. Г. О состоянии и перспективах развития гидроэнергетики России / Г. Г. Лапин, Е. И. Ваксова // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 6. – С. 9–15.
4. Овчинников, Г. И. Прибрежные наносы и донные отложения Братского водохранилища / Г. И. Овчинников, Г. А. Карнаухова. – Новосибирск: Наука, 1985. – 67 с.
5. Пен, Р. З. Планирование эксперимента в statgraphics. – Красноярск: СибГТУ, 2003. – 248 с.
6. Пен, Р. З. Статистические методы в целлюлозно-бумажном производстве / Р. З. Пен, Э. М. Менчер. – М.: Лесн. пром-сть, 1973. – 119 с.
7. Пижурин, А. А. Исследование процессов деревообработки / А. А. Пижурин, М. С. Розенблит. – М.: Лесн. пром-сть, 1984. – 232 с.

**Рецензенты:**

Козинев Георгий Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного транспорта и строительства ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», г. Красноярск.

Лозовой Владимир Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования лесозаготовок ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», г. Красноярск.