

УДК 626.33
DOI: 10.25686/2542-114X.2021.1.36

ОЦЕНКА РАЗМЫВА НИЖНЕГО БЬЕФА ГИДРОУЗЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФУНКЦИЙ

А. Г. Поздеев, Ю. А. Кузнецова

Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола)

Параметры местных размывов незащищенной части русла за концевыми сооружениями гидроузлов определяются распределением кинематических характеристик потока. В работе используется положение о связи между размывающим эффектом потока и степенью его завихренности, определяющей возникновение интенсивных напряжений сдвига в придонной области и восходящих потоков, приводящих к подъему и витанию частиц грунта. Упомянута гипотеза Н.И. Маккавеева [5], представлявшего структуру потока в виде серии водоворотов, которая дополняется авторской моделью формирования вихревых циркуляционных потоков [11], восходящих со дна потоков, индуцированных вихрями У. Кельвина [7]. Отмечена связь между полем скоростей в вихре и силой давления, действующей на частицу грунта на границе вихревой области.

Для анализа факторов, влияющих на размыв дна нижнего бьефа водосливной плотины, использованы данные лабораторного моделирования в гидравлическом лотке, статистическая оценка значимости факторов, влияющих на степень размыва, использован метод Байеса. С этой целью выделены уровни глубины размыва, определяющие величину статистического диагноза. В качестве двух групп диагностических признаков определены рейтинги открытия затворов и относительные уровни верхнего бьефа. В результате вычисляются условные вероятности диагнозов размыва при реализации метода Байеса и указанных признаков.

Оценка влияния диагностических признаков размыва дополняется анализом предельных дифференциальных показателей в виде производственных функций. Для улучшения качества оценки произведено предварительное логарифмирование влияющих факторов и функции отклика. Затем выполнена множественная регрессия методом наименьших квадратов в среде MathCad. В итоге определены предельные дифференциальные эффективности, характеристики их замещения, эластичности производственных функций, вооруженности ресурсов, а также вычислены показатели изокванты.

Произведено сравнение оценок значимости факторов, влияющих на формирование воронки размыва, по методу Байеса и предельным дифференциальным показателям. Результаты работы могут быть использованы для моделирования процесса растекания потока и местных размывов в нижних бьефах гидроузлов.

Ключевые слова: размыв; нижний бьеф; водосливная плотина, частицы грунта; циркуляционный поток; метод Байеса; диагноз; рейтинг открытия затворов; уровень верхнего бьефа; предельный дифференциальный показатель; производственная функция; метод наименьших квадратов; MathCad.

Введение. При работе водосливных плотин могут возникать местные размывы дна в нижнем бьефе за концевым креплением рисбермы, влияющие на устойчивость работы гидроузлов. Например, за водосливной плотиной Чебоксарской ГЭС был обнаружен размыв напротив третьего и четвертого затворов. Фокус размыва с отметкой дна 20,3 м был

удален от конца рисбермы с отметкой 31,5 м на 15 м. Воронка размыва образовалась при пропуске расходов через второй, третий и пятый пролеты плотины, открытые на 6,5 м [9].

Разумеется, разрушение гидроузлов может носить и физико-химический характер [5], что в данной работе не рассматривается.

Для оценки влияния режима работы пло-

тины на деформацию русла помимо кинематических и геометрических параметров должен быть введен рейтинг открытия затворов. В этом случае функция глубины размыва равна $\bar{t} = f\left(\frac{(n \cdot l_3)}{(N \cdot l_\phi)}, Fr\right)$, где n – число открытых затворов, l_3 – ширина затвора, l_ϕ – длина водосливного фронта, Fr – число Фруда, N – число затворов [12].

В ряде случаев при обработке экспериментальных данных возникает проблема получения функции отклика на несколько варьируемых в эксперименте переменных в форме $(n + 1)$ -мерной поверхности, где n – это число варьируемых факторов. При этом данные, полученные, например, для одномерного эксперимента, «сшиваются» с данными, определяющими влияние второго варьируемого фактора на ту же функцию отклика [12].

Проектирование гидротехнических сооружений, обеспечение их устойчивой эксплуатации и, в частности, защиты нижних бьефов от размыва, неразрывно связано с исследованием сложных гидравлических потоков. Основной задачей исследования сложных потоков является определение профиля продольных скоростей [11, 12]. Сложный комплекс проблем ограничивает применимость для решения прикладных задач расчета гидрозлов дифференциальных моделей турбулентности типа модели Колмогорова-Прандтля, двухпараметрических k - ε -моделей и т. п. [10].

Целью работы является оценка значимости факторов, влияющих на степень размыва дна нижнего бьефа водосливной плотины, на основе метода Байеса и анализа предельных дифференциальных показателей.

Решаемые задачи: анализ значимости факторов, влияющих на формирование воронки размыва за концевыми сооружениями водосливной плотины, на основе метода Байеса и производственных функций, а также установление связи между интенсивностью размыва, наблюдаемой в эксперименте, и

интенсивностью вихревых образований в потоке.

Основные теоретические положения.

Для решения задач гидравлики водотоков в качестве основных влияющих факторов выделяются продольный профиль распределения локальной осредненной скорости \bar{u} в функции глубины h или ординаты y , отсчитываемой от дна потока с учетом высоты Δ выступов шероховатости дна водотока.

Структура потока, по В.М. Маккаеву [6], состоит из серии водоворотов с вертикальными осями вращения, занимающими всю глубину потока.

Скорость вихревого кольца, имитирующего водоворот, может быть определена по формуле Кельвина [7, 12]

$$\bar{u} = \frac{\Gamma}{4\pi R} \left(\ln \frac{8R}{a} - \frac{1}{4} \right), \quad (1)$$

где Γ – циркуляция вихревого кольца; R – радиус кольца; a – радиус вихря.

Средний диаметр донных частиц $d := 0.007$ м. Глубина потока $h := 10$ м.

$$\text{Высота выступов шероховатости } \Delta := \frac{2}{3} \cdot d$$

$$\Delta = 4.667 \times 10^{-3} \text{ м.}$$

Диапазон изменения ординаты точки потока $y := \Delta, \Delta + 0.001 \dots h$ м. Постоянная Кармана $k := 0.46$. Максимальная скорость на поверхности

$$\text{поверхности потока } u_{\max} := \frac{1}{k} \left(\ln \left(\frac{h}{\Delta} \right) - 1 \right)$$

$$u_{\max} = 14.5 \text{ м/с.}$$

Глубина, при которой локальная скорость равна средней, $y_m := 0.37 \cdot h$ $y_m = 3.7$ м.

Средняя скорость на вертикали

$$u_{\text{cp}} := \frac{1}{k} \left(\ln \left(\frac{y_m}{\Delta} \right) - 1 \right) u_{\text{cp}} = 12.34 \text{ м/с.}$$

Диапазон изменения скоростей по глубине потока $u := 0 \dots u_{\max}$ м/с.

Циркуляция скорости вихря Кельвина $\Gamma := 1.5 \cdot u_{\max} \cdot h$ $\Gamma = 217.5 \text{ м}^2/\text{с.}$

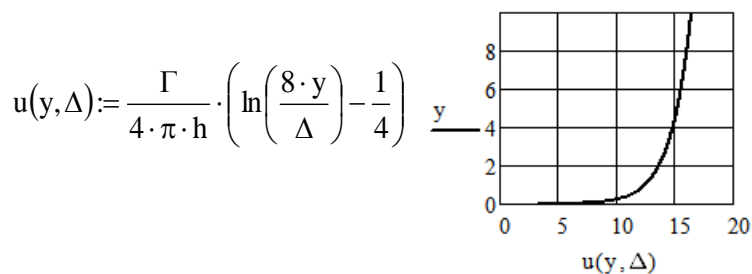


Рисунок 1. Скорость, индуцированная вихрем Кельвина, при заданной циркуляции

Моделирование процессов. Для изучения размывных явлений была построена модель водосливной плотины со всеми сооружениями нижнего бьефа в масштабе 1:100 в гидравлическом лотке [4]. Лоток имел ширину 1,95 м и длину 14 м. Ниже рисбермы был отсеян песок крупностью 0,63-1,25 мм, эквивалентной натурной, – размываемая часть модели. Толщина слоя песка составила 14 см, что в два раза превышает глубину имеющейся воронки размыва в пересчете на модель.

Расход регулировался и принимал значения 20, 25, 30, 35, 45, 60 дм³/с. С помощью термоанемометров измерялась скорость у дна в семи створах вниз по течению и на восьми промерных вертикалях в каждом створе. Для

определения наиболее опасного в отношении размыва режима работы плотины при различных комбинациях открытых затворов модели плотины измерялась глубина воронки размыва после пропуска расхода.

Результаты определения донных скоростей в створах приведены в таблице 1. С целью сокращения объема изложения здесь приводится только шестая часть таблицы для наиболее неблагоприятного случая с точки зрения влияния на размыв в нижнем бьефе водосливной плотины гидроузла при расходе, $Q = 65$ дм³/с и глубине в верхнем бьефе $H_{вб} = 63$ см. Полностью сведения о формировании воронки размыва при различных режимах приведены в работе [4].

Таблица 1

Донные скорости на промерных вертикалях

Q = 65 л/с								
№ створа	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,1593	0,1943	0,1885	0,1871	0,1758	0,2387	0,2306	0,0786
2	0,1678	0,2045	0,1802	0,1859	0,1744	0,2521	0,2309	0,0731
3	0,1725	0,1887	0,1846	0,167	0,1652	0,2503	0,258	0,0761
4	0,1762	0,1855	0,1758	0,1941	0,1715	0,2508	0,1992	0,085
5	0,1697	0,1911	0,1779	0,1845	0,1647	0,245	0,2152	0,0829
6	0,1788	0,1912	0,1814	0,182	0,1626	0,2451	0,2364	0,0868
7	0,1823	0,1718	0,1861	0,1812	0,1633	0,251	0,2485	0,1005

Характер размыва $H_{вб} = 63$ см, $h_{в} = 21$ см, открыты 1-й и 6-й затворы

Параметры, определяющие условия размыва нижнего бьефа, занесены в таблицу 2.

На основе приведенных данных о зависимости относительной глубины воронки размыва

от степени открытия затворов и относительного уровня верхнего бьефа произведены статистические оценки выборок функции отклика и независимых факторов в среде MathCad.

Таблица 2

Зависимость относительной глубины воронки размыва от степени открытия затворов и относительного уровня верхнего бьефа

Расход, Q, дм ³ /с	Глубина в верхнем бьефе Н _{вб} , см	Глубина воронки размыва h _в , см	Состояние затворов	Относительная глубина размыва	Степень открытия затворов	Относительный уровень верхнего бьефа
65	53	9,7	Открыты 1,2, 3, 4, 5, 6 затворы	0,214	0,253	0,841
65	56,5	14,7	Открыты 3, 4 затворы; 2, 5 затворы открыты на 1/3; 1, 6 затворы закрыты	0,324	0,292	0,897
65	63	21	Открыты 1, 6 затворы	0,463	0,362	1,000

Произведение расхода и напора на водосливе определяет величину удельной мощности потока, поэтому установлена зависимость глубины воронки размыва от этого произведения, которая показала, что фактор удельной мощности потока не является определяющим при оценке вероятности локального размыва дна нижнего бьефа.

Из анализа графиков распределений скоростей, градиентов и вторых производных скоростей потока по линии тока с началом в точке размещения седьмого датчика установ-

лено, что неблагоприятный размывающий режим (с глубиной размыва $h_p = 21$ м) соответствует расходу $Q = 65$ м³/с и уровню верхнего бьефа $H_{вб} = 63$ м. В этом случае наблюдаются наибольшие градиенты и вторые пространственные производные продольных скоростей, что указывает на возрастание интенсивности вихревых образований в потоке. Положение вихрей соответствует областям размыва дна нижнего бьефа, наблюдаемым в эксперименте и в натуре (рис. 2).

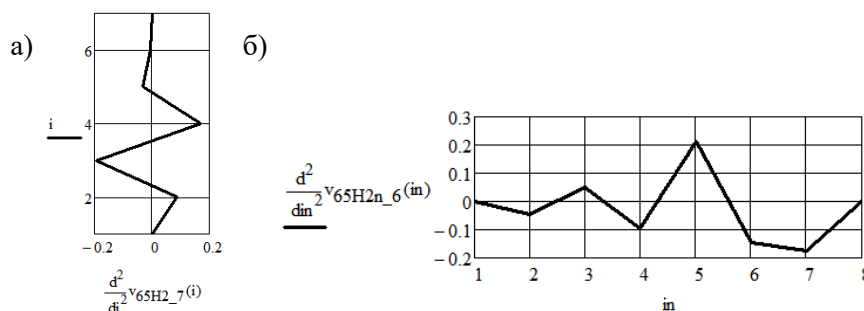


Рисунок 2. Распределение второй продольной (а) и поперечной (б) пространственных производных продольных скоростей

Последующий анализ произведен на основе метода Байеса, который базируется на элементарной формуле Байеса [1].

Вероятность размыва уровня i (рис. 3) является диагнозом D_i , который совместно с диагностическим признаком – открытием затвора k_i – позволяет определить вероятность произведения

$$P(D_i \cdot k_j) = P(D_i) \cdot P(k_j / D_i) = P(k_j) \cdot P(D_i / k_j). \quad (2)$$

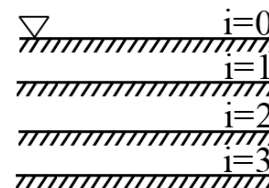


Рисунок 3. Распределение уровней размыва D_i , определяющее величину диагностического признака

Следует отметить, что вероятность локального размыва в нижнем бьефе уровня i при открытии затвора равна

$$P(D_i/k_j) = P(D_i) \cdot \frac{P(k_j/D_i)}{P(k_j)}. \quad (3)$$

Первая из величин $P(D_i)$, определяющих условную вероятность $P(D_i/k_j)$ наступления события (появления диагноза D_i) при появлении признака k_j , является априорной вероятностью диагноза – априорное значение уровня размыва для i уровней размыва

$$P(D_i) = \frac{N_i}{N}. \quad (4)$$

Численные значения спектра уровней размыва: $N_1 = 9,7$; $N_2 = 14,7$; $N_3 = 21$.

Суммарное значение уровней размыва

$$N_i = \sum_{i=3} N_i = 9,7 + 14,7 + 21 = 45,4.$$

На основе приведенных численных значений уровней для априорных вероятностей диагноза можно записать: $P(D_1) = \frac{9,7}{45,4} = 0,214$;

$$P(D_2) = \frac{14,7}{45,4} = 0,324; \quad P(D_3) = \frac{21}{45,4} = 0,463.$$

В составе вероятности $P(k_j/D_i)$ признак k_j открытия затвора j , приводящего к диагно-

зу D_i уровня размыва i .

В рассматриваемой задаче фигурируют две группы признаков.

К первой группе признаков отнесены рейтинги открытия затворов, вычисленные при различных диагнозах (глубинах размыва в нижнем бьефе) при расходах через водосливную плотину $Q = 65 \text{ м}^3/\text{с}$. Эта величина определяется по значениям производных от поперечных градиентов продольных донных скоростей вдоль линии, начинающейся в точке установки седьмого датчика скорости и направленной вниз по течению.

Производя выборку из указанных вторых пространственных производных скоростей, получим качественные и количественные оценки первой группы признаков размыва нижнего бьефа.

Из распределения пространственных производных продольных скоростей при равных расходах наибольшие колебания градиентов продольных скоростей наблюдаются при наибольшем уровне верхнего бьефа с отметкой $H_{вб} = 63 \text{ м}$.

Численные значения распределений производных от поперечных градиентов продольных донных скоростей при расходе $Q = 65 \text{ м}^3/\text{с}$ и уровнях верхнего бьефа $H_{вб} = 53, 63$ и $56,5 \text{ м}$ приведены на рисунке 4.

$$\text{а) } \frac{d^2}{di^2} v_{65H1_7}(i) = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.167 \\ 0.074 \\ -0.06 \\ 0.086 \\ 0.047 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \text{б) } \frac{d^2}{di^2} v_{65H2_7}(i) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.088 \\ -0.193 \\ 0.169 \\ -0.033 \\ -0.005 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \text{в) } \frac{d^2}{di^2} v_{65H1_7}(i) = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.048 \\ 0.137 \\ -0.155 \\ 0.062 \\ 0.045 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Рисунок 4. Численное значение распределения производных от поперечных градиентов продольных донных скоростей при расходе $Q = 65 \text{ м}^3/\text{с}$ и уровнях верхнего бьефа:

$$H_{вб} = 53 \text{ м (а)}; \quad H_{вб} = 63 \text{ м (б)}; \quad H_{вб} = 56,5 \text{ м (в)}$$

При $H_{вб} = 53$ максимальное и минимальное значения вторых производных позволяют вычислить их сумму

$$\max DDV_{65H1} + |\min DDV_{65H1}| := 0,253. \quad \text{При } H_{вб} = 63 \text{ данная сумма составит } \max DDV_{65H2} + |\min DDV_{65H2}| := 0,362, \text{ а при}$$

$$H_{\text{вб}} = 56,5 - \max DDV_{65\text{НЗ}} + |\min DDV_{65\text{НЗ}}| := 0,292.$$

Располагая первую группу – рейтинги открытия затворов – в порядке возрастания уровней верхнего бьефа $H_i = 53$ м, 56,5 м и 63 м, запишем значения признаков:

- при $h_p = 9,7$ м $k_{11} = 0,253$;
- при $h_p = 14,7$ м $k_{12} = 0,292$;
- при $h_p = 21$ м $k_{13} = 0,362$.

Численные значения второй группы признаков – относительных уровней верхнего

бьефа (за базовое значение принят расчетный уровень верхнего бьефа $H_{\text{вб}} = 63$ м):

- при $h_p = 9,7$ м $k_{21} = \frac{H_{\text{вб1}}}{H_{\text{вб}}} = \frac{53}{63} = 0,841$;
- при $h_p = 14,7$ м $k_{12} = \frac{H_{\text{вб2}}}{H_{\text{вб}}} = \frac{57,5}{63} = 0,897$;
- при $h_p = 21$ м $k_{13} = \frac{H_{\text{вб3}}}{H_{\text{вб}}} = \frac{63}{63} = 1$.

В результате объединения полученных групп признаков и диагнозов уровня размывов составляется диагностическая матрица метода Байеса, представленная в таблице 3.

Таблица 3

Вероятности признаков и априорные вероятности состояний (диагностическая матрица)

D_i	$P(k_1 / D_i)$	$P(k_2 / D_i)$	$P(D_i)$
D_1	$P(k_1 / D_1) = 0,253$	$P(k_2 / D_1) = 0,841$	$P(D_1) = 0,214$
D_2	$P(k_1 / D_2) = 0,292$	$P(k_2 / D_2) = 0,897$	$P(D_2) = 0,324$
D_3	$P(k_1 / D_3) = 0,362$	$P(k_2 / D_3) = 1,000$	$P(D_3) = 0,463$

Численное значение диагноза вероятности уровня при появлении первого и второго прилокального размыва D_1 в нижнем бьефе признаков k_1 и k_2 равно

$$P(D_1 / k_1 k_2) = \frac{P(D_1) \cdot P(k_1 / D_1) \cdot P(k_2 / D_1)}{P(D_1) \cdot P(k_1 / D_1) \cdot P(k_2 / D_1) + P(D_2) \cdot P(k_1 / D_2) \cdot P(k_2 / D_2) + P(D_3) \cdot P(k_1 / D_3) \cdot P(k_2 / D_3)} =$$

$$= \frac{0,214 \cdot 0,253 \cdot 0,841}{0,214 \cdot 0,253 \cdot 0,841 + 0,324 \cdot 0,292 \cdot 0,897 + 0,463 \cdot 0,362 \cdot 1} = 0,147. \quad (5)$$

Численное значение диагноза D_2 при появлении признаков k_1 и k_2 составляет

$$P(D_2 / k_1 k_2) = \frac{P(D_2) \cdot P(k_1 / D_2) \cdot P(k_2 / D_2)}{P(D_1) \cdot P(k_1 / D_1) \cdot P(k_2 / D_1) + P(D_2) \cdot P(k_1 / D_2) \cdot P(k_2 / D_2) + P(D_3) \cdot P(k_1 / D_3) \cdot P(k_2 / D_3)} =$$

$$= \frac{0,324 \cdot 0,292 \cdot 0,897}{0,214 \cdot 0,253 \cdot 0,841 + 0,324 \cdot 0,292 \cdot 0,897 + 0,463 \cdot 0,362 \cdot 1} = 0,275. \quad (6)$$

Численное значение диагноза D_3 при появлении признаков k_1 и k_2 равно

$$P(D_3 / k_1 k_2) = \frac{P(D_3) \cdot P(k_1 / D_3) \cdot P(k_2 / D_3)}{P(D_1) \cdot P(k_1 / D_1) \cdot P(k_2 / D_1) + P(D_2) \cdot P(k_1 / D_2) \cdot P(k_2 / D_2) + P(D_3) \cdot P(k_1 / D_3) \cdot P(k_2 / D_3)} =$$

$$= \frac{0,463 \cdot 0,362 \cdot 1}{0,214 \cdot 0,253 \cdot 0,841 + 0,324 \cdot 0,292 \cdot 0,897 + 0,463 \cdot 0,362 \cdot 1} = 0,578. \quad (7)$$

На основании полученных численных достижений глубины размыва $h_p = 21$ м при значений можно заключить, что диагноз D_3 появления первого (рейтинга открытия затво-

ров) k_1 и второго признака k_2 (относительно уровня верхнего бьефа) наиболее вероятен ($P(D_3/k_1k_2)=0,573$) при расходе $Q=65$ $\text{дм}^3/\text{с}$ и уровне верхнего бьефа $H_i=6,3$ дм .

Оценка влияния на уровень размыва дна нижнего бьефа водосливной плотины гидроузла может быть выполнена на основе анализа предельных дифференциальных показателей. При этом главной задачей оценки эффективности защиты гидроузлов от сочетания неблагоприятных факторов является предельный анализ производственных функций [3, 8].

Производственные функции представляют собой модели, устанавливающие зависимость между результатами воздействия совокупности факторов от степени их воздействия [3, 8]. Обобщенную производственную функцию можно определить как связь между уровнем результата воздействия Y и темпом изменения влияющих факторов X [8].

При этом возникают проблемы выбора:

- системы включаемых в модель переменных – спецификация переменных;
- общей структуры модели, включая число уравнений связей между переменными;
- наилучшей аппроксимации производственной функции [3].

Оценка эффективности средств защиты гидроузлов связана с необходимостью учета взаимозаменяемости влияющих факторов. Наиболее эффективным подходом к решению задачи оценки эффективности защиты гидроузлов при замене факторов следует считать предельный анализ производственных функций, связанный с вычислением их дифференциальных характеристик [3, 8].

Предельный анализ представляет собой метод исследования переменных факторов, влияющих на конечный результат.

Для зависимости между переменными $Y_j=f(X_i)$ средняя величина равна отношению $\frac{Y_j}{X_i}$, а предельная – производной $\frac{dY_j}{dX_i}$ [3, 8]. Если используемая функция имеет вид $y=a \cdot x^b$, где a и b – постоянные, то ее пре-

дельное значение равно $\frac{dy}{dx}=a \cdot b \cdot x^{b-1}$ и от-

ношение $\frac{y}{x}$ пропорционально предельному

значению $\frac{dy}{dx}$, где величина b – коэффициент

пропорциональности. Из равенства

$$\frac{dy}{dx}=b \frac{ax^b}{x}=b \frac{y}{x} \text{ следует } b=\frac{dy}{dx} \frac{y}{x}.$$

В теории мультипликативных, в частности, в теории функций Кобба-Дугласа величина b принимается равной E , т.е. равной коэффициенту эластичности [3].

Далее приведена оценка эффективности средств защиты гидроузлов на основе производственных функций.

Для статистической обработки данных используем метод наименьших квадратов множественной регрессии и определим коэффициенты уравнения в среде MathCad.

В качестве функции отклика в данном случае выступает глубина воронки размыва

$$Y=a \cdot X_1^b \cdot X_2^c, \quad (8)$$

где X_1 – степень открытия затвора; X_2 – относительный уровень верхнего бьефа.

Вектор оценок коэффициентов регрессии с помощью метода наименьших квадратов определяется матричным произведением $s=(\ln X^T \ln X)^{-1} \ln X^T \ln Y$.

Далее производится формирование матрицы логарифмов независимых переменных $\ln X_j$.

После потенцирования следует $Y:=s_1 \cdot X_{1j}^{s_2} \cdot X_{2j}^{s_3}$.

Мультипликативный полином после подстановки численных значений приобретает вид

$$Y_{float,4} \rightarrow 12.19 \cdot X_{1j}^{12.75} \cdot \ln X_{2j}^{21.93}.$$

Предельной или дифференциальной эффективностью ресурса является мера влияния приращения X_i данного ресурса i на интенсивность результата Y_j вида j . Аналитически

она выражается в виде $\Theta_{ij} = \left(\frac{\partial Y_j}{\partial X_i} \right)_{l=\text{const}}$.

Многофакторная зависимость искомой функции отклика и ее дифференциальной эффективности (первой частной производной) от первого аргумента X_{1j}

$$Y(X_{1j})_{\text{float},4} \rightarrow 12.19 \cdot X_{1j}^{12.75} \cdot \ln X_{2j}^{21.93}$$

$$\Theta_{1j}(X_{1j}) := \frac{d}{dX_{1j}} (Y(X_{1j}))_{\text{float},3} \rightarrow 155.0 \cdot X_{1j}^{11.8} \cdot \ln X_{2j}^{21.9}$$

Многофакторная зависимость функции отклика и ее дифференциальной эффективности от второй независимой переменной X_{2j}

$$Y := s_1 \cdot X_{1j}^{s_2} \cdot X_{2j}^{s_3}$$

$$Y(X_{2j})_{\text{float},4} \rightarrow 12.19 \cdot X_{1j}^{12.75} \cdot X_{2j}^{21.93}$$

$$\Theta_{2j}(X_{2j}) := \frac{d}{dX_{2j}} (Y(X_{2j}))_{\text{float},4} \rightarrow 267.2 \cdot X_{1j}^{12.75} \cdot \ln X_{2j}^{20.93}$$

Обобщенным предельным показателем является показатель изокванты, характеризующий относительное приращение ресурса r при изменении ресурса k

$$I_{kr} \leftarrow \frac{\Gamma_{kr}}{\Phi_{kr}}$$

Показатель изокванты приращения ресурса X_{1j} при изменении ресурса X_{2j}

$$I_{12} := \begin{cases} I \leftarrow \text{rows}(X_1) \\ J \leftarrow \text{cols}(X_1) \\ \text{for } i \in 1..J \\ \quad \text{for } j \in 1..J \\ \quad \quad I_{12i,j} \leftarrow \frac{\Gamma_{12i,j}}{\Phi_{12i,j}} \\ \text{return } I_{12} \end{cases}$$

$$I_{12\text{float},4} = \begin{pmatrix} 0.000004522 \\ 0.00002638 \\ 0.0003666 \end{pmatrix}$$

Поскольку показатель изокванты $I_{12} < 1$, то рассматриваемый более интенсивен по независимому фактору X_2 по сравнению с фактором X_1 .

Выводы

При оценке влияния внешних факторов на формирование воронки размыва на основе производственных функций, как и при анализе по методу Байеса, следует признать, что наиболее существенное влияние на глубину размыва оказывает сочетание высокого рейтинга открытия затворов и относительного уровня верхнего бьефа, что в данном случае реализуется при расходе $Q = 65 \text{ дм}^3/\text{с}$ и уровне верхнего бьефа $H_1 = 6,3 \text{ дм}$.

Следует отметить, что в соответствии с теоретическими положениями [2, 7] интенсивное развитие воронки размыва наблюдается при наибольших градиентах продольных скоростей и при их неоднородном распределении в потоке, что указывает на возрастание интенсивности вихревых образований. Положение вихрей соответствует областям размыва dna нижнего бьефа, наблюдаемым в эксперименте и в натурных условиях.

На основе автоматизированного алгоритма вычисления предельных дифференциальных показателей предложены оценки дифференциальных характеристик производственных функций для гидротехнических объектов, которые могут быть использованы для изучения тенденций процессов развития и оценки устойчивости гидротехнических сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И.А. Техническая диагностика. Москва: Машиностроение, 1978. 240 с.
2. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Ленинград: Гидрометеиздат, 1962. 368 с.
3. Кобринский Н.Е., Майминас Е.З., Смирнов А.Д. Введение в экономическую кибернетику: учебное пособие. Москва: Экономика, 1975. 343 с.
4. Кузнецова Ю.А. Средства инженерно-экологической защиты нижних бьефов гидроузлов: монография. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. 260 с.
5. Оценка хлоридного разрушения морских гидротехнических сооружений города Холмска (о. Сахалин) / С.Н. Леонович, Е.Е. Шальей, Л.В. Ким, Т.Е. Шалая, А.Г. Джоголюк // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2018. № 2 (6). С. 7-16.
6. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. Москва: Географический факультет МГУ, 2003. 355 с.

7. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч. 1. Москва: Наука, 1965. 640 с.
8. Арзамасцев А.Д., Кузнецова Ю.А., Поздеев А.Г. Моделирование эффективности освоения водных ресурсов на основе производственных функций // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Экономика и управление. 2013. № 1. С. 66-79.
9. Поздеев А.Г., Кузнецова Ю.А. Влияние режима работы затворов водосливной плотины на размыв нижнего бьефа // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. URL: <http://www.science-education.ru/129-22895> (дата обращения 18.01.2016).
10. Смирнов Е.М., Гарбарук А.В. Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений: конспект лекций. Санкт-Петербург: СПб. гос. техн. ун-т, 2010. 127 с.
11. Kuznetsova Y.A., Pozdeev A.G. Study of jet scour in hydraulic facility tailraces // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2016. No. 1 (3). Pp. 683-690. DOI: 10.5593/SGEM2016/B31/S12.089
12. Pozdeev A.G., Kuznetsova Y.A. Modeling of kinematic characteristics of flow in hydrosystem drainage channel // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2017. Vienna GREEN Conference Proceedings, 2017. 27-29 November, Vol. 17, Issue 33. Pp. 267-274.

Информация об авторах

ПОЗДЕЕВ Анатолий Геннадиевич – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций и водоснабжения, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – исследование и моделирование русловых процессов в нижних бьефах гидроузлов, математическое моделирование в гидродинамике и экологии, автоматизация расчета инженерных систем водо-, газо- и теплоснабжения в строительстве. Автор около 100 научных трудов, в том числе 10 монографий, 13 учебных пособий, 11 патентов и авторских свидетельств на изобретения. E-mail: PozdeevAG@volgatech.net

КУЗНЕЦОВА Юлия Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций и водоснабжения, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – исследование и моделирование русловых процессов в нижних бьефах гидроузлов, математическое моделирование в гидродинамике и экологии. Автор 86 научно-методических работ, в том числе 5 монографий, 12 учебных пособий и 1 патента РФ. E-mail: KuznetsovaYA@volgatech.net

UDC 626.33

DOI: 10.25686/2542-114X.2021.1.36

ASSESSMENT OF SCOUR IN HYDRO SYSTEM TAILRACE USING METHODS OF TECHNICAL DIAGNOSIS AND PRODUCTION FUNCTIONS

A. G. Pozdeev, Yu. A. Kuznetsova

Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola)

Parameters of local scours in an unprotected part of the riverbed behind the hydro system end structures are determined by distribution of kinematic characteristics of the flow. The paper is based on the proposition of the relationship between the scouring effect of the flow and its vorticity degree, due to which the intense shear stresses and upflows that raise soil particles occur in the bottom area. The authors based their research on the hypothesis of N.I. Makkaveev who represented the flow structure as a series of whirlpools. The hypothesis was supplemented with the authors' model of the formation of circulating flows ascending from the bottom and induced by U. Kelvin's vortices. The authors focus on the relationship between the velocity field in the vortex and the pressure force exerted on a soil particle at the boundary of the vortex field.

In order to analyze the factors that affect scours in the tailrace of the spillway dam, the authors used the data from laboratory modeling in a hydraulic flume. For the statistical estimate

of the significance of the factors affecting the scours, the Bayes method was applied. For this purpose, we distinguished the scour depth levels that determine a value of the statistical diagnosis. Gate opening ratings and relative headrace levels were determined as two groups of diagnostic features. As a result, conditional probabilities of scour diagnoses were calculated using the Bayes method and the specified diagnostic features.

The estimate of the impact of the diagnostic features of scour was supplemented with the analysis of limiting differential indicators in the form of production functions. In order to improve the estimate, a preliminary logarithmation of influencing factors and a response function was carried out. Then a multiple least squares regression was performed in MathCad. The authors determined limiting differential efficiencies, characteristics of their substitution, elasticity of production functions, intensity of resource development, and isoquant figures.

The authors have comparatively analyzed the factors affecting scours using the Bayes method and the limiting differential indicators. The obtained research outcomes can be used to model the water dispersion and scouring processes in hydro system tailraces.

Keywords: scour; tailrace; spillway dam; soil particles; circulating flow; Bayes method; diagnosis; gate opening rating; headrace level; limiting differential indicator; production function; least squares method; MathCad.

REFERENCES

1. Birger I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics], Moscow: Mashinostroenie [Machinebuilding], 1978, 240 p.
2. Goncharov V.N. *Dinamika ruslovyh potokov* [Dynamics of channel flows], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1962, 368 p.
3. Kobrinskiy N.E., Mayminas E.Z., Smirnov A.D. *Vvedenie v ekonomicheskuyu kibernetiku* [Introduction to economic cybernetics] textbook, Moscow: Economics, 1975, 343 p.
4. Kuznetsova Iu.A. *Sredstva inzhenerno-ekologicheskoy zashchity nizhnih befov gidrouzlov* [Means of engineering and environmental protection of the lower reaches of waterworks] monograph, Yoshkar-Ola: Povolzhskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet [Volga State University of Technology], 2014, 260 p.
5. Leonovich S.N., Shalyy E.E., Kim L.V., Shalaya T.E., Dzhogolyuk A.G. *Otsenka hlорidnogo razrusheniya morskikh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy goroda Holmska (o. Sahalin)* [Assessment of chloride destruction of marine hydraulic structures of the city of Kholmok (Sakhalin Island)], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii* [Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Materials. Structures. Technologies, 2018, No 2 (6), pp. 7–16.
6. Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee bassejne* [Riverbed and erosion in its basin], Moscow: Geograficheskii fakultet MGU [Geographical Faculty of Moscow State University], 2003, 355 p.
7. Monin A.S., Iaglom A.M. *Statisticheskaya gidromekhanika. Mekhanika turbulentsnosti* [Statistical hydromechanics. Mechanics of turbulence]. Vol. 1, Moscow: Nauka [Science], 1965, 640 p.
8. Arzamastsev A.D., Kuznetsova Iu.A., Pozdeev A.G. *Modelirovanie effektivnosti osvoeniya vodnyh resursov na osnove proizvodstvennykh funktsiy* [Modeling the efficiency of water resources development on the basis of production functions], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie* [Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Economics and Management], 2013, No 1, pp. 66–79.
9. Pozdeev A.G., Kuznetsova Iu.A. *Vliyanie rezhima raboty zatvorov vodoslivnoy plotiny na razmyv nizhnego befa* [Influence of the mode of operation of the gates of the spillway dam on the erosion of the lower stream], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, No 2, URL: <http://www.science-education.ru/129-22895> (access date 18.01.2016).
10. Smirnov E.M., Garbaruk A.V. *Techeniya vyazkoy zhidkosti i modeli turbulentsnosti: metody rascheta turbulentsnykh techeniy: konspekt lektsiy* [Viscous fluid flows and turbulence models: methods for calculating turbulent flows: lectures], Sankt-Peterburg: SPb. gos. tekhn. un-t [St.Petersburg Polytechnic University], 2010, 127 p.
11. Kuznetsova Y.A., Pozdeev A.G. *Study of jet scour in hydraulic facility tailraces* [Investigation of jet erosion in the tail parts of hydraulic structures], *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management* [International Interdisciplinary Scientific Geoconference Geodesic Geology and Management of Mountain Ecology], 2016, No. 1 (3), Pp. 683-690. DOI: 10.5593/SGEM2016/B31/S12.089.

12. Pozdeev A.G., Kuznetsova Y.A. Modeling of kinematic characteristics of flow in hydrosystem drainage channel, *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2017*. Vienna GREEN Conference Proceedings, 2017. 27-29 November, Vol. 17, Issue 33, Pp. 267-274.

Information about the authors

POZDEEV Anatolii Gennadevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of Civil Engineering and Water Supply Department, Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Volga State University of Technology. Research interests – research and modeling of channel processes in hydro system tailraces, mathematical modeling in hydrodynamics and ecology, automation of calculation of water, gas and heat supply systems in construction. Author of more than 90 publications, including 10 monographs, 13 textbooks, 11 patents and inventor's certificates. E-mail: PozdeevAG@volgatech.net

KUZNETSOVA Iuliia Anatolevna – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Civil Engineering and Water Supply Department, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – research and modeling of channel processes in hydro system tailraces, mathematical modeling in hydrodynamics and ecology. Author of 86 publications, including 5 monographs, 12 textbooks and 1 patent of the Russian Federation. E-mail: KuznecovaYA@volgatech.net.

Библиографическая ссылка

Поздеев А. Г., Кузнецова Ю. А. Оценка размыва нижнего бьефа гидроузла на основе методов технической диагностики и производственных функций // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2021. – № 1(17). – С. 36-46. – DOI: 10.25686/2542-114X.2021.1.36