

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ЗАТВОРОВ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ НА РАЗМЫВ НИЖНЕГО БЬЕФА

Поздеев А. Г., Кузнецова Ю. А.

ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола, Россия (424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3), e-mail: PozdeevAG@volgatech.net

Предметом исследований являлось определение режимов работы затворов водосливной плотины Чебоксарской ГЭС, при которых обеспечиваются оптимальные скорости потока в нижнем бьефе с точки зрения минимизации размыва за концевым креплением рисбермы. Рассмотрены параметры существующего локального размыва за рисбермой плотины и причины его образования. Экспериментальные исследования возможных деформаций русла при различных открытиях пролетов проводились в гидравлическом лотке на модели водосливной плотины с размываемым участком в масштабе 1:100. Получены масштабы подобия исследуемых процессов размыва дна русла в нижнем бьефе гидроузлов на основе метода анализа размерностей. При моделировании натуральный грунт заменен модельным эквивалентным по механической прочности. Выполнен предварительный анализ объекта исследования и составлен план экспериментов. Выявлен наиболее опасный режим работы затворов. Предложены средства борьбы с размывом в нижнем бьефе.

Ключевые слова: водосливная плотина, нижний бьеф, рисберма, режим работы затворов, локальный размыв, планирование эксперимента, подобие, масштаб моделирования.

INFLUENCE OF OPERATION MODE OF SPILLWAY DAM GATES ON TAILRACE EROSION

Pozdeev A. G., Kuznetsova Y. A.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia (424000, Yoshkar-Ola, Lenin Square, 3), e-mail: PozdeevAG@volgatech.net

Subject of the research is to determine the operation modes of the spillway dam gates of the Cheboksary hydroplant, which provide the optimal flow velocity in the tailrace in the context of minimization of erosion behind the end fixing of the apron. Parameters of the existing local erosion behind the apron and the causes of its formation are considered. Experimental study of possible riverbed deformations at various openings of the gates is conducted in the hydraulic flume on the model of the spillway dam with the erodible area on a scale of 1:100. Scale of similarity of the bed erosion in the hydrosystem tailrace is obtained, based on the method of dimensional analysis. When modeling, the full-scale soil is replaced by model one, which has equivalent mechanical strength. Preliminary analysis of the object of study is performed and the plan of experiments is drawn up. The most dangerous operation mode of the gates is established. Means of protection against erosion in the tailrace are suggested.

Keywords: spillway dam, tailrace, apron, operation mode of gates, local erosion, plan of experiments, similarity, scale of modeling.

При работе водосливных плотин могут возникать местные размывы дна в нижнем бьефе за концевым креплением рисбермы. Так, в марте 1982 года был обнаружен глубокий локальный размыв напротив третьей и четвертой секций водосливной плотины Чебоксарской ГЭС. Фокус размыва с отметкой дна 20,3 м был удален от конца рисбермы, заканчивающейся ростверком на буронабивных сваях с отметкой 31,5 м, на 15 м. Установлено, что воронка размыва образовалась при длительном пропуске расходов воды через второй, третий и пятый пролеты плотины, открытые на 6,5 м.

Объект исследования – экспериментальное маломасштабное моделирование размыва дна в нижнем бьефе водосливной плотины Чебоксарской ГЭС. Предмет исследования –

изучение режимов работы затворов плотины и их влияния на параметры воронки размыва. Цель работы – установление наиболее опасного режима работы затворов и режимов, при которых обеспечиваются оптимальные, с точки зрения минимизации размыва, условия движения потока в нижнем бьефе.

Подобие исследуемых процессов

Для открытых потоков, имеющих деформируемое русло и относящихся к автомоделной области, помимо критерия Фруда необходимо учитывать деформацию дна русла нижнего бьефа, которую в работе определяет глубина воронки размыва, отнесенная к глубине воды в нижнем бьефе [2, 3]. Помимо указанных динамического и геометрического параметров для оценки влияния режима работы плотины должен быть введен параметр степени открытия затворов плотины. Последний определяется отношением ширины водосливного отверстия к длине водосливного фронта. Функция глубины размыва равна $\bar{t} = f((n \cdot l_s) / (N \cdot l_\phi), Fr)$, где n – число открытых затворов, l_s – ширина затвора, l_ϕ – длина водосливного фронта, Fr – число Фруда, N – число затворов.

В ходе экспериментального маломасштабного моделирования размыва в нижнем бьефе в качестве модельного грунта выбран однородный несвязный материал эквивалентный по механической прочности натурному. Предложена реологическая модель, в которой в качестве аналога размывающей грунт нижнего бьефа струи принят цепной рабочий орган, и использованная проф. Баловневым В.И. для анализа работы землеройных машин [1]. Составлена схема размыва дна русла в нижних бьефах гидроузлов, которая позволила определить условия однозначности геометрических, кинематических и физико-механических характеристик грунта при его взаимодействии с размывающей струей. Из условий однозначности установлена связь между масштабами параметров, характеризующих процесс размыва, что привело к определению требований к кинематическим и динамическим условиям моделирования процесса на лабораторной модели. Из полученных соотношений следует оценка взаимодействия струи с агрегатом грунта и условия перехода от связного натурного к несвязному модельному грунту [4]. Получены значения диаметра фракций модельного грунта для условий водосливной плотины Чебоксарской ГЭС. В частности, для натуральных фракций связного грунта диаметром 0,1 – 0,07 мм рекомендуется модельный несвязный грунт 0,36–0,52 мм [4].

Планирование эксперимента

С целью проведения планирования эксперимента для определения глубины размыва нижнего бьефа на лабораторной установке были выделены два варьируемых фактора – степень открытия затворов плотины, определенная как отношение ширины открытых затворов к общей длине водосливного фронта, а также величина скорости в области размыва.

Для автоматизации планирования экспериментов разработана MathCAD-программа, которая на основе вводимых по результатам экспериментов данных позволила вычислить среднеарифметические значения варьируемых факторов и функции отклика, произвести линейную интерполяцию функции отклика от первого фактора и сплайн-интерполяцию функции отклика от второго варьируемого фактора. С учетом найденных минимального и максимального натуральных значений факторов определены их значения в безразмерных координатах. В результате была составлена матрица ортогонального планирования и вычислены коэффициенты регрессии. На основе уравнения регрессии построены поверхность отклика и линии равного уровня данных эксперимента.

Листинг MathCAD-программы планирования эксперимента

ORIGIN:=1

Ввод данных:

- вектор первого варьируемого фактора (опыт 1) $X_{11} := (0.2 \ 0.6 \ 0.8 \ 1.0)^T$;
- вектор второго варьируемого фактора (опыт 1) $X_{12} := (0.119 \ 0.122 \ 0.125 \ 0.127)^T$;
- вектор функции отклика (опыт 1) $Y_1 := (13.1 \ 13.7 \ 14.2 \ 14.4)^T$;
- вектор первого варьируемого фактора (опыт 2) $X_{21} := (0.2 \ 0.6 \ 0.8 \ 1.0)^T$;
- вектор второго варьируемого фактора (опыт 2) $X_{12} := (0.088 \ 0.09 \ 0.091 \ 0.092)^T$;
- вектор функции отклика (опыт 2) $Y_2 := (5.0 \ 5.4 \ 6.1 \ 6.4)^T$;
- вектор первого варьируемого фактора (опыт 3) $X_{31} := (0.2 \ 0.6 \ 0.8 \ 1.0)^T$;
- вектор второго варьируемого фактора (опыт 3) $X_{32} := (0.051 \ 0.051 \ 0.062 \ 0.053)^T$;
- вектор функции отклика (опыт 3) $Y_3 := (5.0 \ 5.4 \ 6.1 \ 6.4)^T$.

Среднее арифметическое значение варьируемых факторов и функции отклика первого опыта $x_{11cp} := \text{mean}(X_{11})$, $x_{12cp} := \text{mean}(X_{12})$, $y_{1cp} := \text{mean}(Y_1)$, $x_{11cp} = 0.65$, $x_{12cp} = 0.123$, $y_{1cp} = 13.85$.

Среднее арифметическое значение варьируемых факторов и функции отклика второго опыта $x_{21cp} := \text{mean}(X_{21})$, $x_{22cp} := \text{mean}(X_{22})$, $y_{2cp} := \text{mean}(Y_2)$, $x_{21cp} = 0.65$, $x_{22cp} = 0.09$, $y_{2cp} = 10.875$.

Средние арифметические значения варьируемых факторов и функции отклика третьего опыта равны $x_{31cp} := \text{mean}(X_{31})$, $x_{32cp} := \text{mean}(X_{32})$, $y_{3cp} := \text{mean}(Y_3)$, $x_{31cp} = 0.65$, $x_{32cp} = 0.054$, $y_{3cp} = 5.725$.

Для определения натуральных значений функции отклика проведена сплайн-аппроксимация исходных данных эксперимента на основе составления векторов функции

отклика Y от первого варьируемого фактора x_1 при втором варьируемом факторе x_2 , используемом в качестве параметра.

Линейная интерполяция функции отклика от первого варьируемого фактора равна

$$y_1(x_1) := \text{linterp}(X_{11}, Y_1, x_1), \quad y_2(x_1) := \text{linterp}(X_{21}, Y_2, x_1), \quad y_3(x_1) := \text{linterp}(X_{31}, Y_3, x_1).$$

Сплайн-интерполяция функции отклика от второго варьируемого фактора

$$x_{cp} := (x_{32cp} \quad x_{22cp} \quad x_{12cp})^T, \quad \text{Tab}x_2 := x_{cp}, \quad \text{Tab}y(x_1) := (y_3(x_1) \quad y_2(x_1) \quad y_1(x_1))^T,$$

$$Y(x_1) := \text{pspline}(\text{Tab}x_2, \text{Tab}y(x_1)), \quad Y(x_2, x_1) := \text{interp}(Y(x_1), \text{Tab}x_2, \text{Tab}y(x_1), x_2).$$

Объединение натуральных значений варьируемых факторов и функции отклика дает

$$\Sigma X_1 := \text{stack}(X_{11}, X_{21}, X_{31}), \quad \Sigma X_2 := \text{stack}(X_{12}, X_{22}, X_{32}), \quad \Sigma Y := \text{stack}(Y_1, Y_2, Y_3).$$

Ввод исходных данных ортогонального планирования двухфакторного эксперимента:

- число варьируемых факторов $k := 2$;

- число опытов в полнофакторном эксперименте $N_0 := 2^k$, $N_0 = 4$;

- число опытов в центре плана $n_0 := 1$.

Суммарное число опытов $N := N_0 + 2 \cdot k + n_0$, $N := 9$.

$$\text{Длина «плеча» измерения фактора } \alpha := \sqrt{\frac{\sqrt{N_0 \cdot N} - N_0}{2}}, \quad \alpha = 1.$$

Минимальные и максимальные натуральные значения варьируемых факторов

$$x_{1\min} := \min(\Sigma X_1), \quad x_{1\min} = 0.2, \quad x_{1\max} := \max(\Sigma X_1), \quad x_{1\max} = 1, \quad x_{2\min} := \min(\Sigma X_2), \quad x_{2\min} = 0.051,$$

$$x_{2\max} := \max(\Sigma X_2), \quad x_{2\max} = 0.127.$$

Натуральные значения факторов в центре плана (на основном уровне)

$$x_{10} := \frac{x_{1\min} + x_{1\max}}{2}, \quad x_{10} = 0.6, \quad x_{20} := \frac{x_{2\min} + x_{2\max}}{2}, \quad x_{20} = 0.089.$$

Шаг варьирования натуральных значений факторов $\Delta x_{10} := \frac{x_{1\max} - x_{1\min}}{2}$, $\Delta x_{10} = 0.4$,

$$\Delta x_{20} := \frac{x_{2\max} - x_{2\min}}{2}, \quad \Delta x_{20} = 0.038.$$

Натуральные значения факторов в крайних точках «плеча» измерения фактора

$$x_{1\text{minus}\alpha} := x_{1\min} \cdot \alpha, \quad x_{1\text{minus}\alpha} = 0.2, \quad x_{1\text{plus}\alpha} := x_{1\max} \cdot \alpha, \quad x_{1\text{plus}\alpha} = 1, \quad x_{2\text{min}\alpha} := x_{2\min} \cdot \alpha, \quad x_{2\text{min}\alpha} = 0.051,$$

$$x_{2\text{plus}\alpha} := x_{2\max} \cdot \alpha, \quad x_{2\text{plus}\alpha} = 0.127.$$

Натуральные значения функций отклика в заданных точках плана

$$Y_1 := Y(x_{2\min}, x_{1\min}), \quad Y_2 := Y(x_{2\min}, x_{1\max}), \quad Y_3 := Y(x_{2\max}, x_{1\min}), \quad Y_4 := Y(x_{2\max}, x_{1\max}), \quad Y_5 := Y(x_{20}, x_{10}),$$

$$Y_6 := Y(x_{20}, x_{1\text{plus}\alpha}), \quad Y_7 := Y(x_{20}, x_{1\text{minus}\alpha}), \quad Y_8 := Y(x_{2\text{plus}\alpha}, x_{10}), \quad Y_9 := Y(x_{2\text{min}\alpha}, x_{10}).$$

Переход от натуральных значений факторов к их безразмерным координатам

$$z_{1\min} := \frac{x_{1\min} - x_{10}}{\Delta x_{10}} \alpha, \quad z_{1\min} = -1, \quad z_{1\max} := \frac{x_{1\max} - x_{10}}{\Delta x_{10}} \alpha, \quad z_{1\max} = 1, \quad z_{2\min} := \frac{x_{2\min} - x_{20}}{\Delta x_{20}} \alpha, \quad z_{2\min} = -1,$$

$$z_{2\max} := \frac{x_{2\max} - x_{20}}{\Delta x_{20}} \alpha, \quad z_{2\max} = 1, \quad z_{10} := \frac{x_{10} - x_{10}}{\Delta x_{10}} \alpha, \quad z_{10} = 0, \quad z_{20} := \frac{x_{20} - x_{20}}{\Delta x_{20}} \alpha, \quad z_{20} = 0,$$

$$z_{1\text{mirr}\alpha} := \frac{x_{1\text{minus}\alpha} - x_{10}}{\Delta x_{10}} \alpha, \quad z_{1\text{mirr}\alpha} = -1, \quad z_{2\text{mirr}\alpha} := \frac{x_{2\text{minus}\alpha} - x_{20}}{\Delta x_{20}} \alpha, \quad z_{2\text{mirr}\alpha} = -1,$$

$$z_{1\text{plus}\alpha} := \frac{x_{1\text{plus}\alpha} - x_{10}}{\Delta x_{10}} \alpha, \quad z_{1\text{plus}\alpha} = 1, \quad z_{2\text{plus}\alpha} := \frac{x_{2\text{plus}\alpha} - x_{20}}{\Delta x_{20}} \alpha, \quad z_{2\text{plus}\alpha} = 1.$$

Матрица ортогонального планирования

$$M := \begin{pmatrix} x_{1\min} & x_{2\min} & z_{1\min} & z_{2\min} \\ x_{1\max} & x_{2\min} & z_{1\max} & z_{2\min} \\ x_{1\min} & x_{2\max} & z_{1\min} & z_{2\max} \\ x_{1\max} & x_{2\max} & z_{1\max} & z_{2\max} \\ x_{10} & x_{20} & z_{10} & z_{20} \\ x_{1\text{plus}\alpha} & x_{20} & z_{1\text{plus}\alpha} & z_{20} \\ x_{1\text{minus}\alpha} & x_{20} & z_{1\text{minus}\alpha} & z_{20} \\ x_{10} & x_{2\text{plus}\alpha} & z_{10} & z_{2\text{plus}\alpha} \\ x_{10} & x_{2\text{minus}\alpha} & z_{10} & z_{2\text{minus}\alpha} \end{pmatrix}, \quad Y := \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \\ Y_9 \end{pmatrix},$$

$$M_1^{<1>} := \begin{pmatrix} 0.2 \\ 1 \\ 0.2 \\ 1 \\ 0.6 \\ 1 \\ 0.2 \\ 0.6 \\ 0.6 \end{pmatrix}, \quad M_1^{<2>} := \begin{pmatrix} 0.051 \\ 0.051 \\ 0.127 \\ 0.127 \\ 0.089 \\ 0.089 \\ 0.089 \\ 0.127 \\ 0.051 \end{pmatrix}, \quad M_1^{<3>} := \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad M_1^{<4>} := \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad Y := \begin{pmatrix} 4.466 \\ 5.702 \\ 13.362 \\ 14.461 \\ 9.95 \\ 12.058 \\ 9.855 \\ 14.066 \\ 4.936 \end{pmatrix}.$$

Скорректированные значения уровней факторов для ортогонализации матрицы планирования $X_1 := M_1^{<3>}$, $X_2 := M_1^{<4>}$.

Корректирующие координаты

$$X_{1i} := X_1^2 - \frac{\sum X_1^2}{N}, X_{2i} := X_2^2 - \frac{\sum X_2^2}{N}, X_{1i} := \begin{pmatrix} 0.333 \\ 0.333 \\ 0.333 \\ 0.333 \\ -0.667 \\ 0.333 \\ 0.333 \\ -0.667 \\ -0.667 \end{pmatrix}, X_{2i} := \begin{pmatrix} 0.333 \\ 0.333 \\ 0.333 \\ 0.333 \\ -0.667 \\ -0.667 \\ 0.333 \\ 0.333 \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты регрессии

$$b_1 := \frac{\sum_{i=1}^N (X_{1i} \cdot Y_i)}{\sum X_1^2}, b_2 := \frac{\sum_{i=1}^N (X_{2i} \cdot Y_i)}{\sum X_2^2}, b_{11} := \frac{\sum_{i=1}^N (X_{1i} \cdot Y_i)}{\sum X_1^2}, b_{22} := \frac{\sum_{i=1}^N (X_{2i} \cdot Y_i)}{\sum X_2^2}, b_{12} := \frac{\sum_{i=1}^N (X_{1i} \cdot X_{2i} \cdot Y_i)}{X_1^2 \cdot X_2^2},$$

$$b_0 := \frac{\sum Y}{N} - X_{1is} \cdot b_{11} - X_{2is} \cdot b_{22}.$$

Результирующие значения коэффициентов регрессии $b_1 := 0.786$, $b_2 := 4.494$, $b_{12} := -0.078$, $b_0 := 0.304$, $b_{11} := 0.304$, $b_{22} := -1.151$.

Вид уравнения регрессии $Y(x_1, x_2) := b_0 + b_1 x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2$.

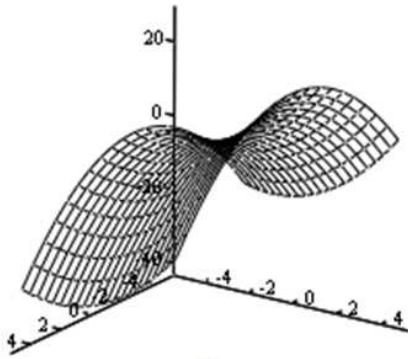


Рис. 1. Поверхность отклика на основе уравнения регрессии

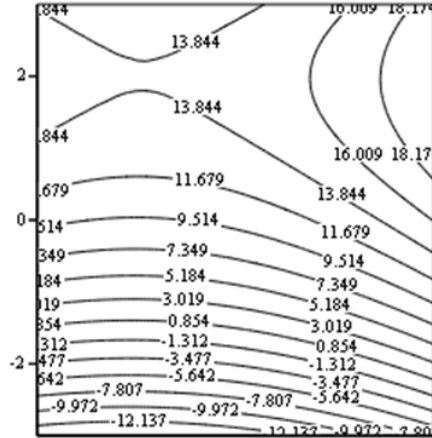


Рис. 2. Линии равного уровня на основе уравнения регрессии

Численные значения, приведенные на линиях равного уровня (рис. 2), показывают значения глубин размыва нижнего бьефа в зависимости от степени открытия затвора и донной скорости, совпадающие с данными детальных исследований процесса размыва. Таким образом, составленная методика автоматизированных расчетов является адекватной, поскольку не противоречит результатам систематических экспериментов.

Описание модели и измерительных приборов

Для проведения экспериментального моделирования размыва в нижнем бьефе водосливной плотины Чебоксарской ГЭС была построена модель в масштабе 1:100 [3]. Лоток, отведенный под модель, обеспечивал размещение гасительной, рабочей и подпорной ее части. Ниже рисбермы модели плотины был отсеян песок крупностью 0,36...0,52 мм, образовавший согласно произведенным расчетам, размываемую часть модели [3]. Для измерения температурных эквивалентов скоростей использовались датчики-термоанемометры с аналого-цифровым преобразователем, а для измерения отметок размыва – шпигельмасштаб. Расход в лотке контролировался по мерному прямоугольному водосливу [3].

Результаты эксперимента и их обсуждение

При исследовании различных режимов работы затворов модели водосливной плотины Чебоксарской ГЭС [3] установлено, что при полном открытии одного или двух пролетов плотины образуется водоворотная зона напротив закрытых пролетов плотины, что приводит к значительным размывам дна в зоне существующей ямы. Поэтому недопустимо длительное открытие одного или двух затворов плотины полностью, если остальные пролеты закрыты. Такой режим приводит к значительным размывам за рисбермой плотины. Исследовались различные комбинации открытия пролетов плотины в режиме, когда три пролета открыты полностью, а остальные – на 6,5 м. Наиболее благоприятный гидравлический режим потока за водосливной плотиной наблюдался при полном открытии второго, четвертого и шестого затворов, а остальных на 6,5 м. Такая схема открытия является рекомендуемой. Неблагоприятный режим в нижнем бьефе и интенсификация процесса размыва наблюдались при переходе от открытия в 6,5 м к полному открытию пролетов плотины. Открытие двух пролетов плотины полностью, при условии открытия остальных четырех пролетов на 4,5 м, обеспечивает более удовлетворительный режим, но размывы грунта также имеют место. Деформации русла разной интенсивности наблюдались при всех открытиях затворов плотины, включая и полное открытие.

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. Указанный метод был реализован для построения функциональной зависимости средней ширины водосбросного фронта водосливной плотины гидроузла от глубины в нижнем бьефе при различных числах Фруда [3].

Детальные исследования глубины воронки размыва дна отводящего русла, выполненные на русловой модели [3], показали высокую сходимость с результатами предварительного эксперимента и последующей их обработки на модели с применением предлагаемой методики «сшивки» данных.

Выводы и рекомендации

Исследование влияния режимов работы затворов водосливной плотины гидроузла, связанное с определением конечной функции отклика – глубины воронки размыва при оптимальных значениях скорости потока в нижнем бьефе водоотводящего русла, позволило установить наиболее опасные и оптимальные, минимизирующие глубину размыва, комбинации открытий пролетов.

В результате обработки данных, полученных в лабораторных экспериментах, установлено, что выбор наиболее оптимальных режимов работы затворов не приводит к остановке процесса размыва русла в нижнем бьефе. Для решения проблемы локальных размывов необходимо применение средств стабилизации руслового процесса, которые реализованы авторами в виде руслоформирующих профилей на основе гибких материалов.

Список литературы

1. Баловнев, В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин/ В. И. Баловнев. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
2. Леви, И.И. Моделирование гидравлических явлений / И.И. Леви; под ред. В.С. Кнороза. – Л.: Энергия, 1967. – 235 с.
3. Кузнецова Ю. А. Средства инженерно-экологической защиты нижних бьефов гидроузлов: монография. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – 260 с.
4. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1972. – 375 с.
5. Kuznecova, Y.A. Modeling of bed movement processes in hydrosystem tail-water/ Y.A. Kuznecova// European Science and Technology: materials of the VII international research and practice conference, Vol. II, Munich, April 23th–24th, 2014 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2014. – P. 497-502.

Рецензенты:

Полянин И.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола;

Царев Е.М., д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии и оборудования лесопромышленных производств ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола.