

УДК 626-33

UDC 626-33

05.00.00 Технические науки

Technical Sciences

МАЛОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ НИЖНИХ БЬЕФОВ ГИДРОУЗЛОВ**SMALL-SCALE MODELING OF DYNAMIC FACILITIES FOR PROTECTION OF HYDROSYSTEM TAILRACES**

Кузнецова Юлия Анатольевна
канд. техн. наук, доцент
доцент кафедры строительных конструкций и водоснабжения
SPIN-код автора: 2978-2915
E-mail: KuznecovaYA@volgatech.net
Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

Kuznetsova Yulia Anatolyevna
Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Construction Designs and Water Supply Department
RSCI SPIN-code: 2978-2915
e-mail: KuznecovaYA@volgatech.net
Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

Для исследования формирования воронки размыва в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС использована модель водосливной плотины и всех сооружений нижнего бьефа, установленная в щелевом лотке, в малом масштабе моделирования (менее 1:100). При пропуске модельного расхода, соответствующего строительному расходу ГЭС, установлено, что за концевым креплением рисбермы плотины формируется воронка размыва. Для исследования динамических средств защиты нижних бьефов гидроузлов от размыва использовался малый стеклянный гидравлический лоток с моделью водослива практического профиля. Для проведения эксперимента построены уровни свободной поверхности воды в лотке без водослива и установлен участок равномерного движения. В программной среде MathCAD построен график расхода мерного прямоугольного водослива. В результате измерений построена кривая свободной поверхности при движении потока через водослив практического профиля. В качестве основного критерия моделирования выбран критерий Фруда. Установлены масштабы моделирования параметров потока. Для проведения испытаний изготовлены модели гидродинамического профиля и парусной конструкции со струеобразующими клинкетами. Выполнено фотографирование процесса смыва песка с дна лотка и формирования донных гряд при установке профиля. Изучен процесс воздействия профиля на поток и его связь с процессом формирования рельефа дна. Определены натурные значения геометрических параметров донных гряд и скорости их перемещения

To study the formation of plunge basin in the Cheboksary hydroplant, we used a scale model of the spillway dam and all structures in the tailrace, installed in the slot flume. When we passed the flow corresponding to the diversion flow of the hydroplant with a glance to the modeling scale, it was found that the plunge basin was formed behind the end fixing of the spillway apron. To research the dynamic facilities of hydrosystem tailrace protection against erosion, we used a small glass flume with a model of the round-crested weir. For the experiment, the water-surface elevations were built in the flume without the weir, and the uniform motion area was established. In MathCAD software environment, the curve of the flow of measuring rectangular weir of the flume was created. Because of measurements, the curve of water surface by the flow motion through the round-crested weir was made. As the main criterion for modeling, the criterion of Froude was selected. Scale of modeling of flow parameters was determined. For testing, models of hydrodynamic profile and sail structure with stream-forming sluice valves were built. The process of sand washout from the flume bottom and formation of the bottom ridges when installing the profile was photographed. Impact of the profile on the flow and its relation with the formation of the bottom topography were studied. Full-scale values of geometric parameters of the bottom ridges and their movement velocity were established as well

Ключевые слова: ГИДРОУЗЕЛ, ВОДОСЛИВНАЯ ПЛОТИНА, НИЖНИЙ БЬЕФ, РАЗМЫВ РУСЛА, МАЛОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ, ПАРУСНАЯ КОНСТРУКЦИЯ СО СТРУЕОБРАЗУЮЩИМИ КЛИНКЕТАМИ

Keywords: HYDROSYSTEM, SPILLWAY DAM, TAILRACES, BED EROSION, SMALL-SCALE MODELING, HYDRODYNAMIC PROFILE, SAIL STRUCTURE WITH STREAM-FORMING SLUICE VALVES

Введение

Большое влияние на безопасную эксплуатацию гидроузлов оказывают общие и местные размывы в нижних бьефах, связанные как с изменением естественного стока реки, так и с недостаточным инженерно-геологическим и гидрологическим обоснованием проектов, случайными отклонениями и нерасчетными ситуациями. Например, в результате съемки глубин с помощью эхолота в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС [1], установлено, что на расстоянии около 80 м ниже края рисбермы в створе второго и третьего щитов водосливной плотины располагается центр воронки размыва овальной формы с минимальной отметкой 23,4 м БС. Ширина ямы составляет около 60 м при длине по потоку до 100 м. Образование ямы размыва не было предусмотрено проектом и могло начаться при пропуске строительных расходов. Полученная расчетом по данным Чебоксарской ГЭС длина крепления совпадает с его фактической длиной [1], однако скорости схода струй с рисбермы достаточно велики.

Внесение изменений в процессы регулирования русловых процессов нижнего бьефа на этапах эксплуатации гидроузлов требуют создания устройств, отличающихся мобильностью развертывания и установки. Выполненные автором теоретические исследования [2, 4, 5] позволяют заключить, что этим требованиям удовлетворяют погруженные в поток на некоторую глубину струенаправляющие устройства. Конструктивное оформление таких устройств, удовлетворяющее требованиям мобильности установки оперативного воздействия на неустойчивые русловые процессы, может быть произведено на основе гидродинамических профилей из гибких материалов [3].

При проектировании динамических средств защиты нижних бьефов гидроузлов от размыва на первоначальном этапе для проверки выдвинутых теоретических предположений и первичной оценки работоспособности

устройств требуется проведение экспериментальных исследований на маломасштабных моделях.

Объектом исследования являются динамические средства защиты нижних бьефов гидроузлов от размыва. Предмет исследования состоит в экспериментальном изучении маломасштабных моделей гидродинамического профиля и парусной конструкции со струеобразующими клинкетами и параметров руслового процесса при их установке в поток.

В основу методов исследования положены принципы теории подобия и методы статистической обработки результатов эксперимента.

Описание экспериментальных исследований и их результатов

Для исследования формирования воронки размыва в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС использована масштабная модель водосливной плотины и всех сооружений нижнего бьефа, установленная в щелевом лотке. При пропуске расхода, соответствующего, с учетом масштаба моделирования, строительному расходу ГЭС, установлено, что за концевым креплением рисбермы плотины формируется воронка размыва (рис.1).

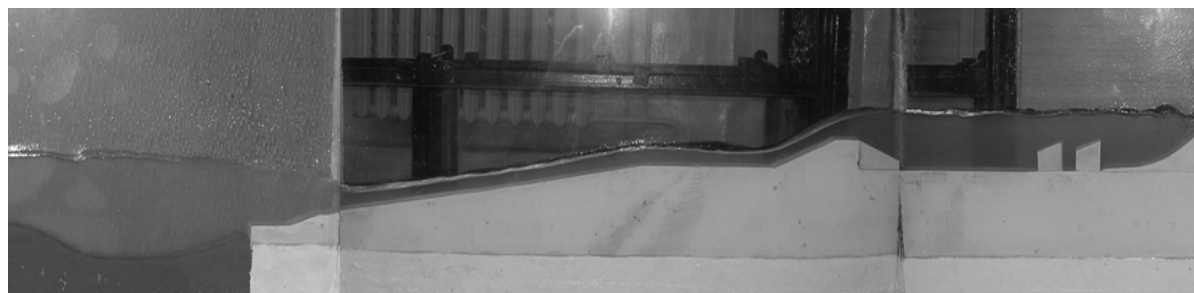


Рис. 1. Формирование ямы размыва за концевым креплением флютбета модели водосливной плотины Чебоксарской ГЭС в щелевом лотке

Для проведения экспериментальных исследований моделей гидродинамических средств защиты нижних бьефов гидроузлов от размыва использовался малый гидравлический лоток прямоугольного сечения (рис. 2), собранный из секций длиной 1000 мм, имеющих

прозрачные боковые стенки из стекла толщиной 8 мм. Дно лотка бетонное. Высота стенок составляет 470 мм. Ширина лотка – 300 мм. Рабочая часть лотка смонтирована с помощью обрамлений из уголкового профиля. Общая длина рабочей части лотка равна 14,68 м. Входная часть лотка сопряжена с головным устройством из бетона. В головное устройство вода поступает из напорного бака, питаемого центробежным насосом из бассейна.

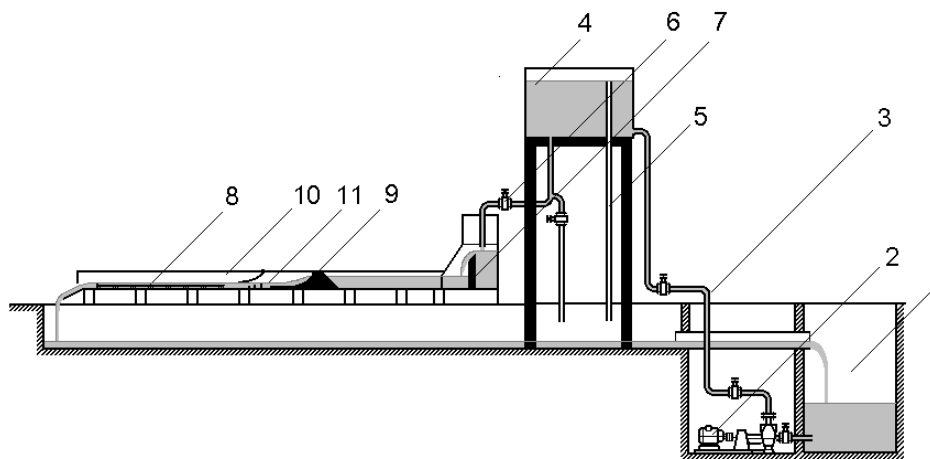


Рис. 2. Схема гидравлического лотка: 1 – резервная емкость; 2 – насосная станция; 3 – напорный трубопровод; 4 – напорный бак; 5 – трубопровод перелива; 6 – вентиль; 7 – мерный водослив; 8 – экспериментальная установка; 9 – плотина; 10 – лоток; 11 – гаситель скорости потока

Для измерения глубин в контрольных створах использовался лабораторный шпигельмасштаб с ценой деления до 0,1 мм. Измерение расходов воды производилось по мерному прямоугольному водосливу, установленному на входе в лоток. Построение графика расхода мерного прямоугольного водослива лотка произведено в программной среде MathCAD (рис. 3). При уровне воды на водосливе равном 2,7 см расход воды в лотке составил 6,5 л/с.

На подготовительном этапе проведения эксперимента выбирался участок лотка с равномерным движением.

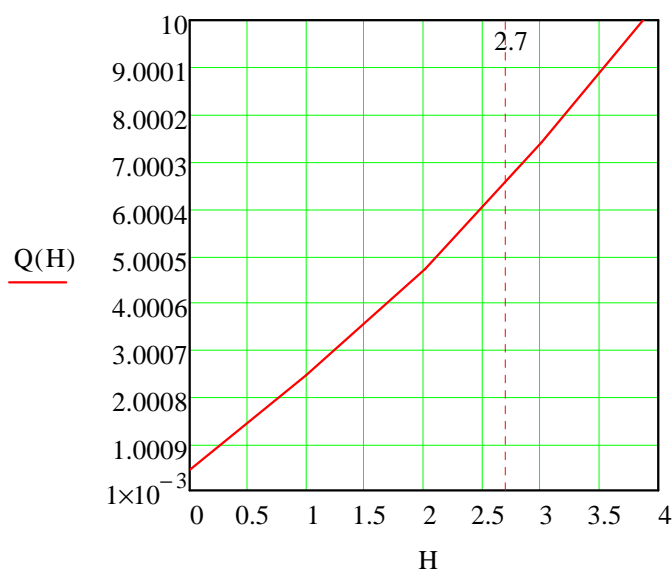


Рис. 3. График расхода мерного прямоугольного водослива лотка

Для целей маломасштабного моделирования динамических средств защиты от размыва гидравлические условия в нижнем бьефе воспроизводились посредством установки в лоток на участке равномерного движения водослива практического профиля водосливной плотины Чебоксарской ГЭС (рис. 4).

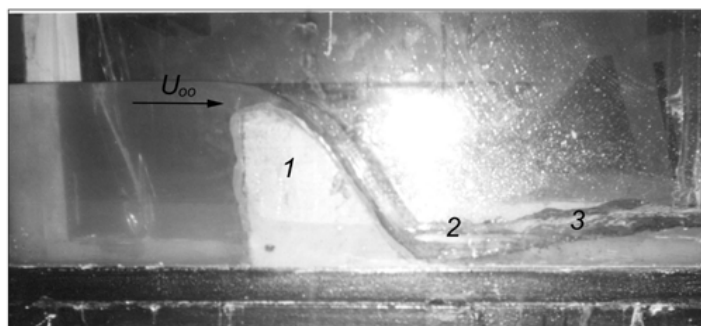


Рис. 4. Модель водосливной плотины в гидравлическом лотке:

1 – водослив; 2 – сжатое сечение потока; 3 – гидравлический прыжок

В результате измерений была построена кривая свободной поверхности потока при переливе через водослив практического профиля (рис. 5). При расходе воды в лотке $Q = 6,5$ л/с и бытовой глубине в нижнем бьефе $h_0 = 7$ см средняя скорость составила $v_{cp} = 0,93$ м/с.

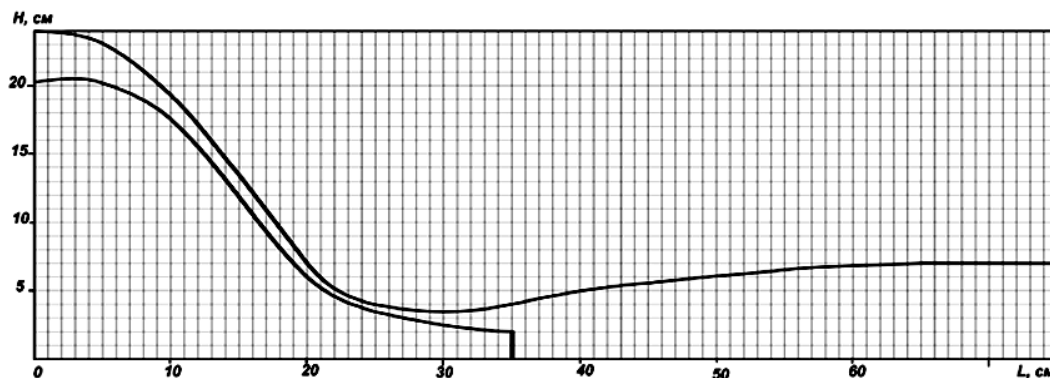


Рис. 5. График уровней свободной поверхности в гидравлическом лотке

Основным критерием подобия открытых русловых потоков является критерий Фруда, для которого масштаб скоростей определяется по формуле $\alpha_v = \sqrt{\alpha_l}$, где α_l – масштаб глубин. При высоте водосливной плотины Чебоксарской ГЭС 14 м и высоте модельного водослива 0,21 м высотный масштаб составил $\alpha_l = 66,7$, а масштаб скоростей – $\alpha_v = \sqrt{\alpha_l} = \sqrt{66,7} = 8,2$. Величина натурной скорости $v = 5,86$ м/с, что практически совпадает со скоростью равномерного движения в отводящем русле $\bar{v} = 5,6$ м/с по расчетам сопряжения бьефов. При этом глубина в нижнем бьефе составит $h_{\bar{o}} = 4,7$ м при расчетной минимальной глубине $h_{\bar{o}_{min}} = 7,2$ м.

Для проведения испытаний были изготовлены несколько маломасштабных моделей средств защиты нижнего бьефа в виде гидродинамических профилей длиной $L_m = 0,15$ м и парусной конструкции со струеобразующими клинкетами.

Модели динамических средств защиты нижних бьефов гидроузлов устанавливались в гидравлическом лотке за моделью водосливной плотины на расстоянии, обеспечивающем геометрическое соответствие натурному расположению концевых креплений нижнего бьефа. При длине сооружений нижнего бьефа 205 м на модели это расстояние составило около 3 м.

Для качественного анализа процессов размыва русла в области установки профиля дно лотка покрывалось слоем речного песка для наблюдения за его поверхностной деформацией (рис. 6).

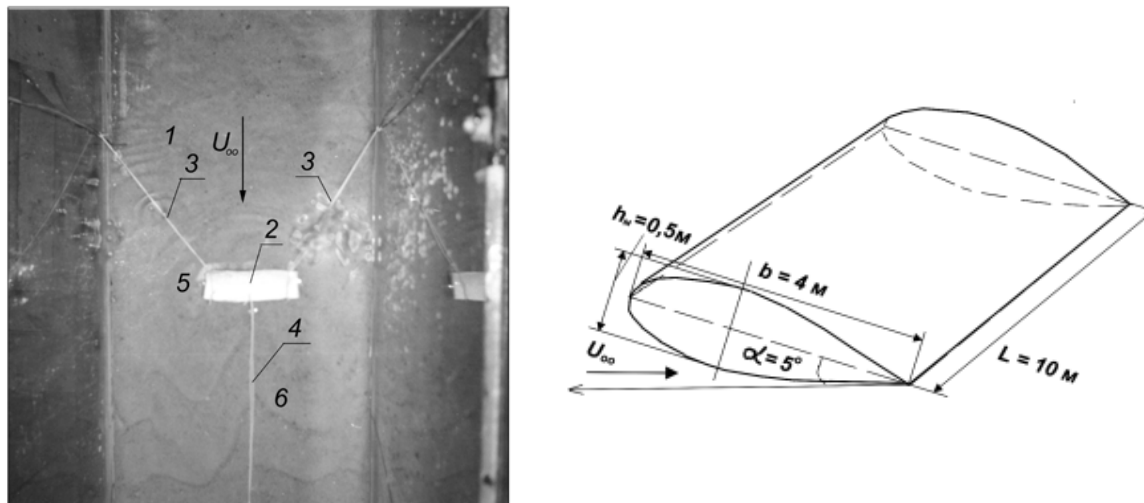


Рис. 6. Регулирование руслового процесса с помощью профиля: 1 – поверхность дна лотка, покрытая слоем песка; 2 – руслоформирующий профиль; 3 – несущий канат; 4 – регулирующий канат; 5 – область размыва; 6 – область формирования донных гряд

На рис. 6 виден процесс смыва песка со дна лотка при установке профиля в области, примыкающей к модели водослива, где скорости существенно выше бытовых. Кроме того, наблюдались остановка процесса переноса песка в области установки профиля и последующий процесс формирования донных гряд ниже по течению. Деформация русла и формирование донных гряд в следе за руслоформирующим профилем наблюдались на значительных расстояниях (до нескольких десятков характерных размеров – длин профиля).

Процесс изменения структуры рельефа дна наблюдался и при установке в поток парусной конструкции со струеобразующими клинкетами (рис. 7).

Процесс воздействия динамических средств защиты на поток отличался вихреобразованием и турбулизацией, что приводило к интенсивному волнообразованию на поверхности (рис. 7), что и предполагалось при теоретическом анализе процесса обтекания профиля.

Картина формирования волн отражала процессы образования восходящих турбулентных вихрей и имела корреляционную связь с процессом формирования рельефа дна.

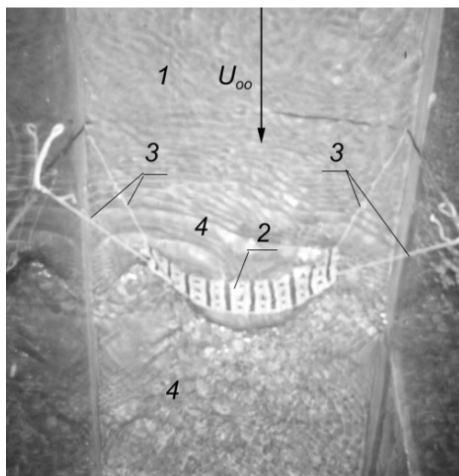


Рис. 7. Регулирование руслового процесса с помощью парусной конструкции:

1 – поверхность дна лотка, покрытая слоем песка; 2 – парус с клинкетами; 3 – несущие канаты; 4 – область намыва песка и формирования донных гряд

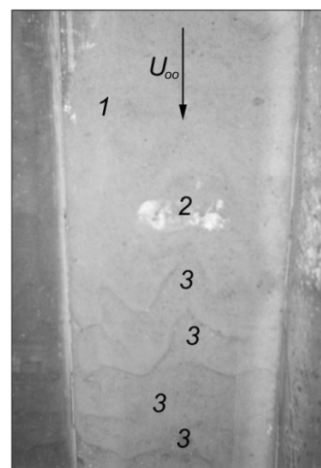


Рис. 8. Рельеф дна, образующийся в результате воздействия профиля:

1 – поверхность дна лотка, покрытая слоем песка; 2 – область установки профиля; 3 – область формирования донных гряд

После осушения лотка и удаления руслоформирующего профиля образовывалась характерная картина сформированных донных гряд (рис. 8), отличавшаяся явно выраженной выпуклостью, направленной вверх по потоку к месту установки профиля. Донные гряды имели характерный волнообразный изгиб, являвшийся следствием уменьшения придонной скорости в следе за профилем.

Периодическая структура русловых деформаций имеющая как поперечные так и продольные гребни хорошо заметна на фотографиях рельефа дна (6, 7, 8). В результате измерений были установлены модельные значения параметров донных гряд формируемых в лотке.

Натурные значения параметров донных гряд, определенные для натурной скорости потока $v = 5,9$ м/с и глубины потока $h_0 = 4,7$ м, имели

следующие значения: высота $h_z = 1,3$ м, длина $l_z = 20$ м и скорость перемещения $c_z = 0,08$ м/с. Для моделей руслоформирующих профилей при пересчете параметров гряд по критерию Фруда при скорости потока $v_m = 0,93$ м/с и глубине потока $h_{\text{бм}} = 0,07$ м, высота донных гряд составила $h_{\text{зм}} = 0,0195$ м, длина $l_{\text{зм}} = 0,30$ м, а скорость перемещения $c_{\text{зм}} = 0,001$ м/с. Длина гряды в поперечном к потоку направлении занимала почти всю ширину лотка, то есть 0,30 м. Высота гряд, сформированных за профилем, в наиболее высоких местах варьировалась от 0,015 до 0,020 м в полном соответствии с теорией.

Заключение

Выполнена проверка адекватности теоретических положений о работе средств защиты нижних бьефов гидроузлов на основе проведения комплекса лабораторных исследований маломасштабных моделей в малом гидравлическом лотке.

На подготовительном этапе эксперимента в лотке был установлен участок равномерного движения потока по кривой свободной поверхности воды, в программной среде MathCAD построен график расхода мерного прямоугольного водослива лотка, выбран критерий гидродинамического подобия, установлены масштабы моделирования, изготовлены несколько моделей руслоформирующего профиля и модель парусной конструкции со струеобразующими клинкетами.

Качественное изучение процесса воздействия моделей гидродинамических средств защиты нижних бьефов гидроузлов на поток подтвердило работоспособность устройств и показало, что картина формирования волн в следе за устройствами отражает процессы образования восходящих турбулентных вихрей и имеет корреляционную связь с процессом формирования рельефа дна.

Определены натурные значения геометрических параметров донных гряд и скорость их перемещения, которые полностью соответствуют результатам теоретических исследований.

Дальнейшие исследования процесса размыва русла при установке профилей в потоке позволит разработать конструктивно-технологические решения гидродинамических устройств для защиты от размыва нижних бьефов гидроузлов.

Литература

1. Кузнецова, Ю. А. Средства инженерно-экологической защиты нижних бьефов гидроузлов: монография/ Ю. А. Кузнецова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – 260 с.
2. Kuznetsova J.A., Pozdeev A.G. Model of vortex boundary of plane laminar hydraulic jet// J.A. Kuznetsova, A.G. Pozdeev // Life Science Journal. – 2014. – № 11(12). – P. 513-531.
3. Поздеев, А.Г. Гидродинамические средства обустройства акваторий: монография/ А.Г. Поздеев, Ю.А. Кузнецова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – 164 с.
4. Поздеев, А.Г. Вихревая модель плоской гидравлической струи, формируемой при сопряжении бьефов / А.Г. Поздеев, Ю.А. Кузнецова// Труды Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Технологическая. Вып. 3/ отв. и науч. Ред. Д. В. Иванов. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. – С. 216-221.
5. Поздеева, Ю.А. Математическая модель формирования следа за колеблющимся телом /А.Г. Поздеев, Ю.А Поздеева //Сборник статей студентов, аспирантов и докторантов по итогам научно-технических конференций МарГТУ в 2003 г. –Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. -С. 224 – 229.

References

1. Kuznetsova Yu. A. Sredstva inzhenerno-jekologicheskoj zashhity nizhnih b'efov gidrouzlov. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2014. 260 p.
2. Kuznetsova J.A., Pozdeev A.G. Model of vortex boundary of plane laminar hydraulic jet. *Life Science Journal*. № 11(12). P. 513-531.
3. Pozdeev A.G., Kuznetsova Yu. A. Gidrodinamicheskie sredstva obustrojstva akvatorij. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2014. 164 p.
4. Pozdeev A.G., Kuznetsova Yu. A. Vihrevaja model' ploskoj gidravlicheskoj strui, formiruemoj pri soprjazhenii b'efov. *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta*. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2015. P. 216-221.
5. Pozdeev A.G., Pozdeeva Yu. A. Matematicheskaja model' formirovanija sleda za kolebljushhimsja telom. *Sbornik statej studentov, aspirantov i doktorantov po itogam nauchno-tehnicheskij konferencij MarGTU v 2003 g.* Yoshkar-Ola: Marijskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2004. P. 224-229.