

## Экспериментальные исследования

УДК 504.4.062.2:556

### **ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ НА ПРИМЕРЕ РЫБИНСКОГО ГИДРОУЗЛА**

И.И. ГРИЦУК<sup>1,2</sup>, к.т.н., Д.Н. ИОНОВ<sup>1</sup>, магистр,  
В.К. ДЕБОЛЬСКИЙ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, О.Я. МАСЛИКОВА<sup>1</sup>, к.т.н.,

<sup>1</sup>Институт водных проблем Российской академии наук,  
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333;

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов  
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

*В настоящее время на реках России созданы гидроузлы, обеспечивающие решение большого количества задач, которые объединяют в себе вопросы жизнеобеспечения населения и работы промышленности крупных областей нашей страны. Данные сооружения значительно меняют естественный режим рек и окружающие их прибрежные территории. Одна из основных проблем, возникающая при строительстве и эксплуатации гидроузлов – негативные русловые процессы в нижних бьефах, такие как размывы русел и разрушение берегов. На сегодняшний день данная задача является актуальной, а в некоторых районах даже острой.*

*Однако некоторые вопросы размыва берегов и переформирования русел рек в нижних бьефах гидроузлов и их влияние на окружающую среду пока недостаточно изучены. При активизации боковой эрозии развиваются процессы общего размыва с неоднородным составом донных отложений. На урбанизированных территориях возникает угроза загрязнения речных вод и береговых территорий, повреждения трубопроводов, обрушения дамб, подтопления и затопления больших площадей. Изучение и оценка масштабов динамики русловых процессов, позволяет разрабатывать рекомендации, методики их прогнозирования, и регулирования сброса, с целью предотвращения негативных последствий. Необходимо решать задачи, которые имеют большое значение, как для охраны рек и прибрежной территорий, так и для нормального функционирования промышленности и сохранения безопасности жизнедеятельности населения на таких территориях.*

*Выполнено исследование деформаций берегов в нижнем бьефе гидроузла (на примере Рыбинского), на лабораторной модели, при различных объемах попусков. Моделирование показало, что деформации напрямую зависят от расходов. Однако, если постоянно будет присутствовать транзитный расход, и к нему будут постепенно добавляться расходы других источников, то деформации будут значительно меньше, чем при резких сбросах воды без транзита.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** русловые деформации, нижний бьеф, деформации берегов, экспериментальные исследования, лабораторная модель.

Разнообразие берегоформирующих и русловых процессов в нижних бьефах гидроузлов определяет сложность их оценки, расчета и прогнозирования. В большинстве случаев при расчете береговых переформирований учитываются только основные факторы, которые оказывают наибольшее влияние на данный процесс. К ним, как правило, относятся ветро-волновое воздействие, гидродинамические характеристики потока, в некоторых случаях воздействие судовых волн, а также геолого-геоморфологические характеристики русла, транспорт и аккумуляция наносов.

Компоненты скорости течения и их пульсации – это основные учитываемые гидродинамические характеристики потока. Каждый конкретный гидроузел в нижнем бьефе имеет свои геолого-геоморфологические и гидрологические условия особенности, а это затрудняет создание и применение единых методик расчета и прогноза переформирований берегов даже в

региональном масштабе. В процессе размыва берегов, ведущими факторами, в конкретном случае, могут оказаться те, которые не учитываются в полной мере или вообще не принимаются в расчет.

Во многих случаях применение имеющихся рекомендаций для оценки влияния различных факторов и прогнозирования береговых переформирований в нижних бьефах гидроузлов не дают значимых положительных результатов.

Возьмем, например нижний бьеф Рыбинского гидроузла, где процессы берегоразрушения приобрели катастрофический характер. Под угрозой разрушения оказались жилые и промышленные объекты, городские коммуникации, газопроводы, линии электропередач, это приводит к усугублению и без того неудовлетворительной общей экологической обстановки в регионе, а всё это из-за оползневых явлений на берегах.

При использовании в данном случае традиционных методик и рекомендаций по расчету берегопереформирований показало, что размыв дна и берегов здесь возможны только при попусках в нижний бьеф Рыбинского гидроузла более 3000 м<sup>3</sup>/с. В нижнем бьефе Рыбинского гидроузла протяженность зоны размыва по левому берегу составляет 5 км, по правому - 7 км, при длине береговой линии равной 20 км в пределах города. При расходах воды менее 1000 м<sup>3</sup>/с, здесь образуются интенсивные береговые и русловые переформирования. В этом случае можно предположить, что в размыве берегов в районе Рыбинска из-за особенностей компоновки гидроузла и режима его работы, происходят недостаточно исследованные процессы, такие как, уровенные колебания, которые возникают в нижнем бьефе во время прохождения волн попусков при суточном и недельном регулировании работы ГЭС.

Наша задача определить наличие таких волновых колебаний в нижнем бьефе Рыбинского гидроузла, исследовать их гидродинамические характеристики, оценить их роль в процессе размыва берегов и дать рекомендации по защите берегов в районе Рыбинска, на реке Шексне.

Работы, которые посвящены проблеме переформирования берегов рек, в последнее время основываются на математических моделях прогнозирования деформаций берегов. Только в некоторых частных случаях, как показывает практика, применение полученных результатов математического прогноза, дает положительный результат. В связи с этим увеличивается необходимость проведения лабораторного эксперимента, который позволит определить физические явления, происходящие при деформации склонов берегов и динамики русловых потоков.

**Цель работы** заключается в исследовании процессов береговых деформаций в нижнем бьефе гидроузлов.

**Основные задачи** исследования:

- определение динамики переформирования русла в нижнем бьефе Рыбинского гидроузла;
- выявление влияния объемов попусков в нижних бьефах ГЭС на размыв берегов.

**Описание экспериментальной установки**

К.И. Россинский отмечал [4], что для решения новых задач исследований русловых процессов и береговых деформаций, огромное значение имеют лабораторные исследования на размываемых моделях. На таких моделях методы и приемы исследований зависят от характера поставленной задачи.

Достоверность результатов экспериментов береговых деформаций зависит, в первую очередь, от правильности выбора методов экспериментирования, от соответствия явлений, воспроизводимых на натурной модели. Методы экспе-

риментирования оказывают большое влияние на результаты исследования взаимодействия потока с подвижным дном на размываемых моделях.

Для того, чтобы провести исследования, было необходимо создать условия, близкие к существующим на реке Шексне, в относительно коротком лотке.

Для исследования береговых деформаций используются экспериментальные установки, которые подразделяются на замкнутые (циркуляционные) и незамкнутые. Стационарность потока проще и надежнее обеспечивают экспериментальные установки замкнутого типа.

Во время моделирования в лабораторных условиях любого геофизического явления, необходимо воспроизводить его основные детали учитывая как можно более точно заданные параметры, которые определяют изучаемый процесс. В возможности фиксации тех параметров, которые экспериментатор считает основными и заключается преимущество лабораторного эксперимента.

В лаборатории «Гидрологической и технической безопасности гидротехнических сооружений» кафедры «Гидравлики и гидротехнических сооружений» инженерного факультета Российского Университета Дружбы Народов проводились экспериментальные исследования, по изучению деформаций берегов установке циркуляционного действия марки Armfield модели S2 (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальная установка Armfield S2

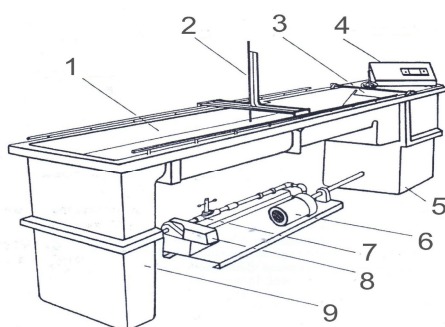


Рис. 2. Схема установки:

- 1 – рабочий лоток; 2 – шпитценмасштаб;
- 3 – водослив; 4 – блок управления; 5 – накопительный бак;
- 6 – циркуляционный насос;
- 7 – расходомер; 8 – задвижка;
- 9 – бак успокоитель.

На изометрической схеме установки (рис. 2) можно увидеть, что она автоматизирована и нуждается только в электропитании. Данная установка состоит из стекловолоконистых емкостей, клапанов, трубопроводов, насоса и блока управления. Элементы данной установки, являющиеся основными, устойчивы к коррозии. Под рабочей секцией лотка на фундаментной плите установлены: насос, расходомер и клапан с электрическим приводом. Из бака под контрольной консолью вода подается в успокоительный бак, который расположен в начале лотка. После чего жидкость проходит через перегородки перфорированного типа, и поток равномерно распределяется до

того, как он попадает в рабочий лоток. В рабочей части лотка глубина потока контролируется регулировкой шандоры в конце рабочего участка. С помощью расходомера измеряется объемный расход воды рабочей части, а также он выводится на дисплей пульта управления. С помощью регулирующей задвижки (8) можно менять производительность насоса. Он имеет устойчивую падающую характеристику, которая обеспечивает постоянство расхода при необходимой степени открытия регулировочной задвижки.

**Моделирование**

Был выбран линейный масштаб  $M = 1:200$ , который соответствует размерам лотка, на котором проводился эксперимент.

Масштаб расходов:  $M_r = \left( \frac{400 \text{ м}^3}{0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м} / \text{сек}} \right) = 1 \cdot 10^{-6}$ ,

$U_{\text{придон}} = 10 \text{ см/сек}$ ,  $W_{\text{з.кр.}} = 5 \text{ см/сек}$ ,  $V_{\text{отн}} = \left( \frac{U_{\text{придон}}}{W_{\text{з.кр.}}} \right) = \frac{10 \text{ см/сек}}{5 \text{ см/сек}} = 2$ ,

$\left( \frac{Q}{S} \right) = \left( \frac{400 \text{ см}^3}{25 \cdot 3 \text{ сек}} \right) = 5 \text{ см}^3 / \text{сек}$  при максимальном расходе  $Q = 400 \text{ см}^3$ .

Относительные деформации на модели у нас изменялись от 1 до 5.

Моделирование проводилось по Фруду:

$Fr = \frac{u^2}{gh}$ ;  $\left( \frac{u_*^2}{gd} \right)$ ;  $Re = \frac{uh}{\nu}$ ;  $\left( \frac{u_* d}{\nu} \right)$ ;  $\left( \frac{wd}{\nu} \right)$ ;  $\frac{d_m}{d_n} = \sqrt[3]{\frac{\rho_n}{\rho_m}}$ ;

$M_l = \frac{l_m}{l_n}$ ;  $M_u = \frac{u_m}{u_n}$ ;  $M_d = \frac{d_m}{d_n}$ ;  $M_l : M_h$ ;  $M_L$ ;

$M_{Fr} = 1 \Rightarrow M_u = M_h^{1/2}$ ;  $W \Rightarrow M_d = \frac{M_w^2}{M_\rho}$ ;

$M_{u/w} = 1 \Rightarrow M_w = M_u \Rightarrow M_d = M_u^2 \Rightarrow M_h = M_d$ ;

$M_h = 1/100$ ;  $M_u = 1/10$ ;  $M_d = 1/100$ ;  $M_d = 1/10$ ;  $M_u = 1/3$ .

Фактические объемы определенных расходов соответствуют определенным размерам средней скорости на реке Шексне в точке рассматриваемого размыва, они указаны в таблице 1, которые определили реальное число Фруда по формуле:  $Fr = u^2 / (gh)$ .

Таблица 1. Фактические данные

Расходы м <sup>3</sup> /сек	Средняя скорость м/сек	Число Фруда
500	0,138888889	0,000322
1000	0,277777778	0,001286
1500	0,416666667	0,002894
2000	0,555555556	0,005144
2500	0,694444444	0,008038
3000	0,833333333	0,011574
3500	0,972222222	0,015754

По результатам экспериментов было выявлено, что при расходах, пропускаемых через отверстие модели, средняя скорость отличается и представлена в таблице 2, а так же было рассчитано число Фруда.

Из приведенных выше таблиц 1, 2, можно сделать следующий вывод, что экспериментальные данные числа Фруда приблизительно равны натурным показателям и отличаются в сотых долях.

Таблица 2. Экспериментальные данные

Расходы см <sup>3</sup> /сек	Скорость см/сек	Число Фруда
107,5	0,86	0,0000148
215	1,72	0,0000592
430	3,44	0,000237
537,5	4,3	0,000370
860	6,88	0,000947
1075	8,6	0,001479
2150	17,2	0,005917

### Описание экспериментов

Чтобы провести необходимые измерения, необходимо перед началом экспериментов выбрать рабочий участок в лотке. Для того чтобы выбрать рабочий участок лотка и оценить его степень приближения к потоку бесконечной протяженности, необходимо было произвести серию измерений вертикальных эпюр скорости при жестком дне чистого водного потока по длине лотка.



Рис. 3. Фото нижнего бьефа Рыбинского гидроузла со спутника и модель в масштабе 1:200

Как показали измерения, после успокоительно-струевыпрямляющей каскады следует участок, в котором движение неравномерное, именно здесь, как правило, происходит перераспределение скорости, и оно заканчивается на расстоя-

нии 2,0 м от входа в лоток. Равномерное движение устанавливается на расстоянии 2,0 – 3,5 м. Такой вывод был сделан путем сравнения скоростных эпюр. На режим движения так же влияет всасывающий трубопровод.

В рабочую часть лотка была установлена модель русла реки нижнего бьефа Рыбинского гидроузла с линейным масштабом 1:200 (рис. 3). Данная установка была подготовлена к эксперименту следующим образом. Изначально был создан макет русла реки Шексны в масштабе 1:200 в программе Auto CAD, в данной программе он был оцифрован, очерчен, распечатан и вырезан шаблон. По данному шаблону нижнего бьефа Шекснинского гидроузла было создано русло на предварительно выровненном основании из смоченного песка, на данное основание был установлен шаблон нижнего бьефа реки Шексны, далее данный шаблон был обсыпан песком для создания формы русла реки. Бетонные элементы моделируемого комплекса сооружений закреплялись на модели цементом. Если посмотреть на рисунок 4, можно увидеть, что правый берег, на котором расположено ОРУ не размываемый, укрепленный, а берег противоположный не укреплен и постоянно находится в процессе размыва.



Рис. 4. Фото ГЭС

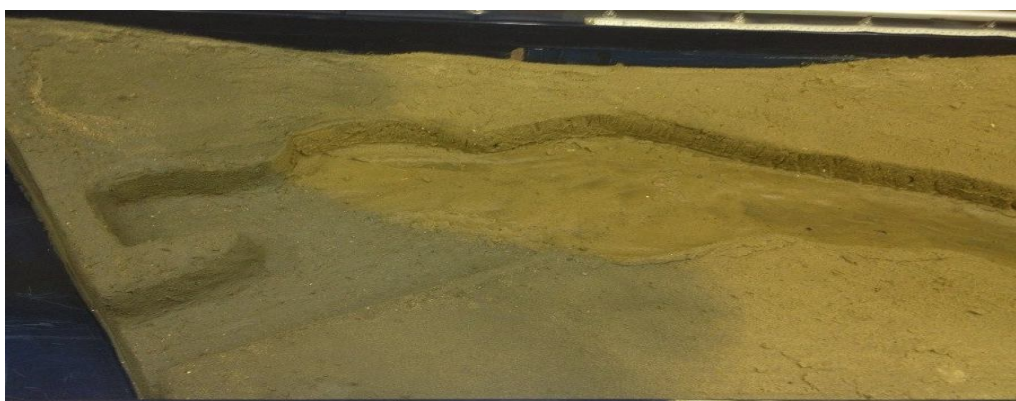




Рис. 5. Фото модели до и спустя 20 минут после начала эксперимента

Далее, непосредственно после формирования русла реки в лотке, установка заполнялась водой, подавался определенный расход и велись наблюдения. После проведения первого эксперимента, который длился 20 минут, лоток оставался, и делались измерения, фото- и видеосъемка (рис. 5).

Всего было сделано три серии экспериментов по три опыта.

Таблица 3. Первая серия экспериментов

№	$\Delta B$ , см	$B_0$ , см	$\Delta B/B_0$	$Q_d$ , мл/с	$Q_0$ , мл/с	$Q_d/Q_0$
1	35	25	1,40	268,75	268,75	1
2	39	25	1,56	537,50	268,75	2
3	42	25	1,68	806,25	268,75	3
4	45	25	1,80	1075,00	268,75	4
5	46	25	1,84	1612,50	268,75	6
6	49	25	1,96	2150,00	268,75	8

Таблица 4. Вторая серия экспериментов

№	$\Delta B$ , см	$B_0$ , см	$\Delta B/B_0$	$Q_d$ , мл/с	$Q_0$ , мл/с	$Q_d/Q_0$
1	29	25	1,16	107,50	107,5	1
2	32	25	1,28	215,00	107,5	2
3	34	25	1,36	322,50	107,5	3
4	36	25	1,44	430,00	107,5	4
5	37	25	1,48	645,00	107,5	6
6	39	25	1,56	860,00	107,5	8

Таблица 5. Третья серия экспериментов

№	$\Delta B$ , см	$B_0$ , см	$\Delta B/B_0$	$Q_d$ , мл/с	$Q_0$ , мл/с	$Q_d/Q_0$
1	25	25	1,00	53,75	53,75	1
2	27	25	1,08	107,50	53,75	2
3	29	25	1,16	161,25	53,75	3
4	31	25	1,24	215,00	53,75	4
5	33	25	1,32	322,50	53,75	6
6	35	25	1,40	430,00	53,75	8

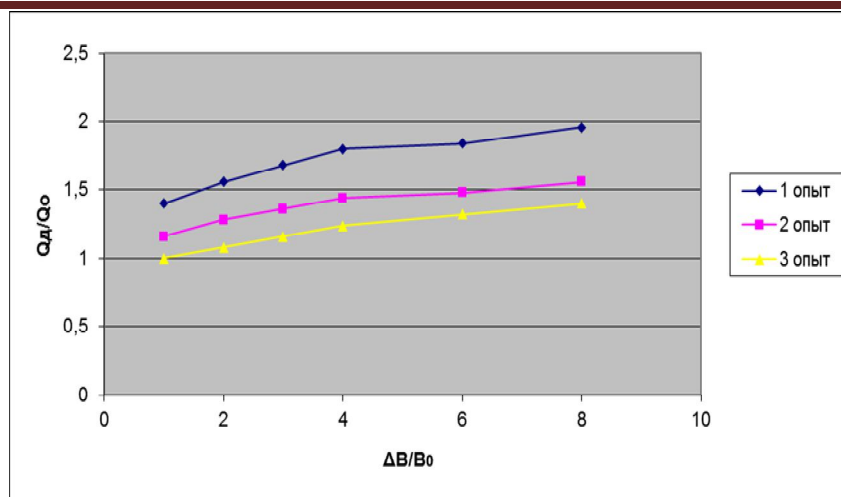


Рис. 6. График зависимости расходов и деформаций

Из представленного графика видно, что деформации пропорциональны увеличению расходов.

#### Заключение

1. Проблема береговых деформаций в нижних бьефах гидроузлов актуальна и распространена по всей территории России. Существует множество мероприятий по укреплению берегов, однако, ни один из них не дает должной обеспеченности без корректировки результатов расчета по средствам гидравлического моделирования.

2. Серии экспериментов показали, что моделирование береговых деформаций возникающих в результате попусков ГЭС, достаточно с большой долей достоверности описывают естественные процессы переформирования в нижних бьефах гидроузлов.

3. Полученные зависимости показывают, что объемы деформаций можно снижать (контролировать) путем корректировки графика суточного регулирования ГЭС.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №15-05-00342 и №16-08-00595*

#### Л и т е р а т у р а

[1] Знаменская Н.С. Гидравлическое моделирование русловых процессов СПб., 1992, 240 с.

[2] Камалова Е.В. Географические закономерности процессов разрушения берегов на малых и средних реках бассейнов Волги и Верхнего Дона. Автореф. канд. дисс. геогр. наук. М., МГУ, 1988.

[3] Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф., Мельниченко И.Г. Ландшафтно-индикационный анализ гидроморфных природно-антропогенных комплексов зоны воздействия Рыбинского водохранилища. Дисс. канд. геогр. наук, Л., 1990.

[4] Россинский К.И. Речные наносы. Динамика и термика речных потоков М.: Наука. – 1972.

[5] Россинский К.И., Кузьмин И.А. Закономерности формирования речных русел. Русловые процессы: сб. статей М., Изд-во АН СССР, 1958, с. 5-14.

[6] Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В. и др. Морфодинамика русел равнинных рек М., «ГЕОС», 1998, 288 с.

#### References

[1] Znamenskaya, N.S. (1992). Hydraulic modeling of channel processes, SPb., 240 p.



- [2] *Kamalova, E.V.* (1988). Geographical regularities of destruction on the coast of small and medium rivers basins of the Volga and Upper Don, *Avtoref. cand. diss.*, Moscow: MGU.
- [3] *Kondratiev, N.E., Popov, I.V., Snischenko, B.F., Melnichenko, I.G.* (1990). Landscape-indicator analysis hydromorphous natural and anthropogenic complexes of footprint of Rybinsk Reservoir, *Diss. cand. geogr. nauk*, L.
- [4] *Rossinsky, K.I.* (1972). *River Sediments. Thermal Dynamics and River Flows*, M.: Nauka,
- [5] *Rossinsky, K.I., Kuzmin, I.A.* (1958). Laws of Formation of River Channels. Channel Processes: Proc., Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, p. 5-14.
- [6] *Chalov, R.S., Alabyan, A.M., Ivanov, V.V. et al.* (1998). *Morphodynamics of Channels of Lowland Rivers*, Moscow, "GEOS", 288 p.

#### LABORATORY RESEARCH OF DEFORMATIONS IN THE LOWER BYEF ON THE EXAMPLE OF THE RYBINSK WATER-ENGINEERING SYSTEM

I.I. Gritsuk<sup>1,2</sup>, D.N. Ionov<sup>1</sup>, V.K. Debolsky<sup>1</sup>, O.Ya. Maslikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Water Problems Institute, Russian Academy of Science*

*Gubkina str., 3, Moscow, Russia, 119333;*

<sup>2</sup>*Peoples` Friendship University of Russia, Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419*

Currently, the Russian rivers created by hydro, ensuring the solution of a large number of tasks that combine issues of livelihood and work of major industrial regions of the country. These facilities have significantly changed the natural regime of rivers and surrounding coastal areas. One of the main problems encountered during the construction and operation of hydro - negative channel processes downstream such as washouts and riverbeds destruction shores. Today this task is urgent, and even acute in some areas.

However, some issues of erosion of banks and the reorganization of riverbeds downstream waterworks and their impact on the environment is not well understood. When activated, the lateral erosion develops general erosion processes with heterogeneous composition of sediments. In urban areas there is a risk of contamination of river water and coastal areas, damage to pipelines, dams collapse, flooding and inundation of large areas. The study and assessment of the extent of the dynamics of channel processes, allows us to develop recommendations, methods of forecasting and regulatory relief in order to prevent the negative consequences. It is necessary to solve problems that are important for the protection of rivers and coastal areas, and for the proper functioning of the industry and maintain the security of life of the population in such areas.

The research of deformation shores downstream waterworks (for example, Rybinsk), a laboratory model at different levels of releases. The simulation showed that the strain is directly dependent on expenditures. However, if there is a permanent presence of transit charges, and it will be gradually added to the cost of other sources, the strain will be considerably less than the sudden release of water without transit.

**Key words:** river bed deformation, downstream, the coast of deformation, experimental study, laboratory model.