

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА Р. ИРТЫШ В РАЙОНЕ Г. СЕМЕЙ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д.А. Щеглов, В.М. Католиков

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

Obyvanky45@gmail.com

Поступила в редакцию 08.12.2025

После доработки 03.03.2026

Принята к публикации 11.03.2026

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования, направленного на улучшение судоходных условий на лимитирующем участке р. Иртыш в районе г. Семей (Верхний и Нижний Жанасемейские перекаты, 2900–2904 км судового хода). Исследование базируется на методологии гибридного (совмещенного) гидравлического моделирования, интегрирующего численные расчеты в программном комплексе HEC-RAS и эксперименты на пространственной физической модели.

Цель работы — сравнительный анализ эффективности и обоснование параметров двух вариантов регулирующих гидротехнических сооружений (продольной и поперечной запруд) для обеспечения гарантированных глубин в меженный период. Проведена верификация численной модели и тарировка физической модели по данным натурных наблюдений. Установлено, что оба варианта обеспечивают значительное повышение уровня воды (до 92 см для продольной и до 62 см для поперечной запруды) при межennem расходе 625 м³/с. Выявлен и количественно оценен негативный эффект в виде косоструйного течения (до 1.5 м/с) для варианта с продольной запрудой, что потребовало коррекции ее положения. На полуразмываемой физической модели исследованы морфодинамические процессы в паводковый период (расход 3500 м³/с) и выявлены зоны потенциальных размывов, угрожающих устойчивости сооружений. Для каждого варианта разработаны и апробированы на модели инженерные мероприятия по защите от размывов (укрепление гибкими железобетонными матами и валунной отсыпкой). Доказана взаимодополняемость и высокая эффективность комбинирования численных и физических методов моделирования для получения достоверных и комплексных инженерных решений.

Ключевые слова: река Иртыш, судоходные условия, перекаты, численное моделирование, HEC-RAS, физическое моделирование, гидротехнические сооружения, деформации русла, размыв

DOI: [10.71367/3034-4638-2026-1-1-45-57](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2026-1-1-45-57)

ВВЕДЕНИЕ

Объектом научного исследования является затруднительный для судоходства участок р. Иртыш на 2900–2904 км по судовому ходу в районе г. Семей на территории Республики Казахстан, в пределах которого расположены Нижний и Верхний Жанасемейские перекаты.

Основной задачей исследования была разработка научных рекомендаций по обеспечению судоходных условий на перекатах Нижний Жанасемейский и Верхний Жанасемейский на р. Иртыш путем увеличения гарантированных глубин на перекатах без осуществления дноуглубительных работ в судоходных прорезях.

Методической основой решения данной проблемы было использование методики гибридного моделирования — сочетания численного моделирования гидравлических характеристик речного потока на исследуемом участке р. Иртыш на основе программного комплекса HEC-RAS с физическим моделированием на жесткой (недеформируемой) и полуразмываемой гидравлических моделях.

Данный метод ранее использовался лишь в работе по прогнозированию русловых процессов на р. Ганг. Для исследования использовалась физическая модель в совокупности с 3D численными моделями (Исследование условий..., 2023).

Необходимость комбинированного использования математического и физического моделирования

обусловлена тем обстоятельством, что в структуры современных математических моделей заложена бесструктурная (безгрядовая) форма движения донных наносов, в то время как в натуральных условиях движение донных наносов осуществляется в грядовых формах, что и определяет режим деформаций дна на границах инженерных сооружений. Расчеты на математических моделях позволяют достаточно достоверно установить гидравлические характеристики речного потока (уклоны, уровни, скорости и структуру течений), необходимые для тарировки физической модели, и при различных вариантах компоновки инженерных сооружений. В то же время методически корректно созданные физические модели позволяют достоверно воспроизвести грядовую форму движения донных наносов и оценить возможные деформации речного дна на границах инженерных сооружений при грядовой форме их движения.

Основным результатом работы являются рекомендации по увеличению гарантированных глубин на перекатах путем возведения или продольной (меженной) запруды в районе Старого и Железнодорожного мостов между о-вами Бейбитшилик и Кругленький, или поперечной запруды с различной высотой в гребне в несудоходном рукаве.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА Р. ИРТЫШ В РАЙОНЕ Г. СЕМЕЙ

Река Иртыш — одна из крупнейших рек мира (протяженность 4248 км) и самая крупная в Республике Казахстан. Состояние природной среды и обеспеченность водными ресурсами в ее бассейне затрагивают государственные и экономические интересы трех сопредельных стран — Китайской Народной Республики, Республики Казахстан и Российской Федерации, имеющих свои собственные интересы в использовании стока Иртыша.

Согласно навигационно-гидрографическому описанию, участок р. Иртыш от Шульбинской ГЭС до с. Майтубек имеет протяженность по фарватеру 320.5 км. Протекая через степную зону Западно-Сибирской низменности, река не принимает ни одного значительного притока (Лощманская карта..., 2024). В верхней части участка ширина долины 2.5–3.0 км, местами долина сужается до 1.0 км.

В районе г. Семей долина реки расширяется и достигает 7 км. Здесь она имеет симметричный поперечный профиль, пойменную и две надпойменные террасы. Ширина долины достигает 7 км, и лишь в районе населенного пункта Долонь и Известковских перекатов сужается до 2.5 км.

Русло реки в верхней части участка до г. Семей слабоизвилистое, с коэффициентом извилистости

1.25, развивается по типу русловой многорукавности островного вида, ложе русла здесь сложено из гравийно-галечных грунтов, с выходами скальных пород. Встречается большое количество валунов.

На участке от г. Семей до с. Белокаменка пойма реки низкая, поросшая лиственными породами деревьев и кустарником. Русло сложено гравийно-песчаными грунтами. Для него характерна большая извилистость, развитая сеть протоков и отмирающих рукавов.

Грунты берегов представлены в основном супесью, легко размываемой в период стояния высоких уровней воды. Судовой ход здесь очень извилистый, узкий, с малыми габаритами и радиусами поворотов.

На рассматриваемом участке р. Иртыш наблюдаются как сезонные, так и суточные колебания уровней воды, зависящие от режима работы Шульбинской ГЭС (Лощманская карта..., 2024). Амплитуда суточных колебаний в меженьный период в г. Семей составляет 10–15 см, в с. Жетижар (Семярка) 5–7 см. Весенний подъем воды связан с ирригационным попуском через Шульбинскую ГЭС, который осуществляется для обводнения поймы. Максимальный расход составляет 3500 м³/с, при этом подъем уровня воды составляет 2.5–3.0 м.

Значения скорости течения воды на судовом ходу в границах Семейского участка, затруднительного для судоходства, изменяются:

– при низких уровнях воды 7.4–7.7 км/час (2.06–2.14 м/с);

– при высоких уровнях воды 11.2–12.7 км/час (3.11–3.53 м/с).

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РУСЛЕ Р. ИРТЫШ НА ИССЛЕДУЕМОМ УЧАСТКЕ

2.1. Численная модель, использованная в исследовании

Основным программным комплексом, использованным для численного моделирования потока на исследуемом участке р. Иртыш, был программный комплекс HEC-RAS.

Название программного комплекса HEC-RAS расшифровывается как The Hydrologic Engineering Center's (HEC) River Analysis System (RAS). Он является свободно распространяемой версией модели, разработанной Гидрологическим инженеринговым центром Института водных ресурсов Инженерного корпуса армии США: US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.

HEC-RAS представляет собой интегрированную систему программного обеспечения, предназначенную для интерактивного использования в многозадачной многопользовательской сетевой среде. Система состоит из графического интерфейса пользователя (GUI), отдельных компонентов гидравлического анализа, возможностей хранения и управления данными, графики и средств создания отчетов. Программный комплекс позволяет выполнять следующие расчеты речной гидравлики:

- одномерные устойчивые течения;
- одномерные (1D) и двумерные (2D) нестационарные течения в реках.

Система уравнений в HEC-RAS решается методом конечных разностей с использованием для аппроксимации производных неявной четырехточечной схемы Прейсмана.

2.2. Методика физического моделирования на пространственных моделях

Экспериментальные исследования на пространственных гидравлических моделях были выполнены в Руслевой гидравлической лаборатории ГГИ, имеющей большой многолетний опыт физического гидравлического моделирования речных потоков и механизма движения руслоформирующих наносов.

Моделирование исследуемого участка р. Иртыш на жесткой пространственной гидравлической модели осуществлялось на основе методики, принятой в мировой лабораторной практике и основанной на равенстве значений числа Фруда в натуральных условиях и на модели.

Моделирование на полуразмываемой модели производилось по методике, разработанной в Руслевой гидравлической лаборатории (Клавен, Копалиани, 2011), дополненной методикой, учитывающей дискретный характер движения донных наносов и особые закономерности взаимодействия речного потока и подвижного дна на каждом структурном уровне форм движения донных наносов (Католиков, 2023). Суть этого методического дополнения заключается в замене при моделировании геометрических параметров отдельных зерен подвижных донных наносов, перемещающихся в бесструктурной форме, на параметры дискретных грядовых структур (высоту и длину гряд, относительную скорость их движения), представляющих собой иной структурный уровень формы движения руслоформирующих наносов.

В работе (Католиков, 2023) было показано, что методологической основой такой замены является один из постулатов гидроморфологической теории руслового процесса, утверждающий, что транспорт наносов имеет дискретный характер и осуществля-

ется в виде дискретных целостных морфологических образований на четырех структурных уровнях: на уровне частиц и на уровнях микро-, мезо- и макроформ. При этом на каждом уровне движение морфологических элементов в русле и их взаимодействие с дискретными структурами водного потока осуществляются по законам, соответствующим только этому уровню, и эти законы не могут быть перенесены с одного структурного уровня на другой (Кондратьев, Попов, Снисченко, 1982).

Следовательно, для достижения подобия механизма движения донных наносов и их взаимодействия с водным потоком в натуральных и модельных условиях необходимо обеспечить подобие формы структурированного грядового движения донных наносов, т. е. подобие гряд. При этом следует обратить внимание на то, что ни в эмпирические формулы высоты и длины гряд, ни в разработанные в рамках гидроморфологической теории руслового процесса формулы расчета скорости их движения величина диаметра наносов не входит. Это позволяет при физическом моделировании грядового движения донных наносов и деформаций речного русла равнинных рек игнорировать требование уменьшения диаметра модельных наносов в масштабе модели и использовать модельные наносы с диаметрами, превышающими значение 0.1 мм, т. е. наносы, для которых силы молекулярного сцепления не являются доминирующими.

Таким образом, при моделировании механизма грядового движения донных наносов в равнинных реках требуется обеспечение только подобия отношения средней на вертикали скорости потока к некоторой критической неразмывающей скорости (v/v_0). Поскольку этот критерий входит во многие эмпирические формулы расчета высоты и скорости движения гряд, то равенство этого критерия в натуральных условиях и на модели обеспечивает подобие грядовой формы движения донных наносов в натуре и на модели без учета диаметра модельных наносов.

Подобие геометрических границ русла, уклона дна и грядовой формы транспорта наносов при условии $Re_{\text{мод}} > Re_{\text{кр}}$ приведет к равенству значений коэффициентов Шези и коэффициентов гидравлического сопротивления русла на модели и в натуре.

Исходя из всех указанных выше условий и учитывая, что при решении стоящих задач достаточно будет осуществлять моделирование речного потока на уровне осредненных в точке гидравлических характеристик потока, масштабы физических пространственных гидравлических моделей, как жесткой (недеформируемой), так и полуразмываемой, были назначены равными 1:250 (горизонтальный) и 1:100 (вертикальный).

На рис. 1 представлен общий вид на полуразмываемую физическую модель исследуемого участка. Красной линией выделена зона, выложенная кварцевым песком.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ФИЗИЧЕСКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕСТКОЙ (НЕДЕФОРМИРУЕМОЙ) ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И НА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ, СОЗДАННОЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА HEC-RAS

3.1. Исходные данные для моделирования

В качестве исходных данных для создания цифровой модели рельефа использовалась русловая съемка участка в масштабе 1:5000.

Для создания цифровой модели расчетной области, а также для задания начальных и граничных условий использовались следующие материалы:

- данные уровенных наблюдений на стационарных и временных гидрологических постах;
- расчетные уровни и расходы воды в створе гидрологического поста Семей.

Вначале проводилась калибровка численной модели на основании натуральных данных, полученных с гидрологического поста Семей. Для калибровки использовался искусственный расход воды в период осуществления судоходства на р. Иртыш, равный $625 \text{ м}^3/\text{с}$, и соответствующие этому расходу уровни воды на границах исследуемого участка. После была проведена валидация модели на расходах воды различной обеспеченности.

Анализ полученных результатов калибровки и валидации численной модели позволил определить коэффициенты шероховатости, а также начальные и граничные условия для последующей тарировки физической модели.

Для экспериментов на физической полуразмываемой модели потребовалось выполнить гранулометрический анализ речного аллювия. Состав речного

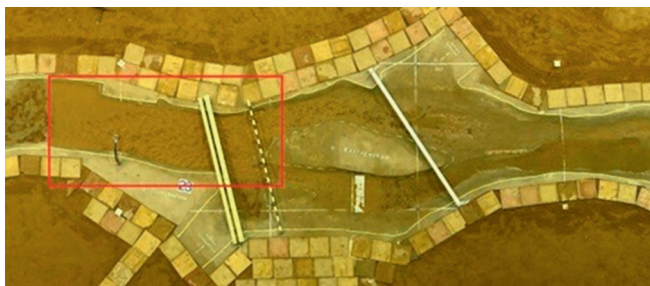


Рис. 1. Общий вид полуразмываемой физической модели исследуемого участка

Fig. 1. General view of the semi-eroded physical model of the area under study

аллювия характеризовался следующими величинами: средневзвешенный диаметр донных отложений $d_{\text{ср взв}} = 23.9 \text{ мм}$, $d_{50} = 17.8 \text{ мм}$, $d_{90} = 57.5 \text{ мм}$, для создания полуразмываемой модели использовался кварцевый песок диаметром $0.15\text{--}0.25 \text{ мм}$. При этом в ходе эксперимента контролировалось соответствие полученных на модели гряд по известным формулам расчета их высоты и длины.

Параметры численной и физической неразмываемой моделей исследуемого участка представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Параметры ЦМР и численной модели р. Иртыш

Table 1. Parameters of the DEM and numerical model of the Irtysh River

№ п/п	Наименование параметра ЦМР	Параметры расчетной области
1	Размер расчетной области, км	6×1
2	Отметки рельефа, м БС	$187.34 \div 195.8$
3	Размер ячейки расчетной сетки в русле, м	15×15
4	Размер ячейки расчетной сетки на ГТС, м	5×5
5	Общее количество расчетных ячеек (контрольных объемов) в плане	$11\ 588 \div 11\ 694$ элемента
6	Коэффициент шероховатости при $Q = 625 \div 800 \text{ м}^3/\text{с}$	$n = 0.03$
7	Коэффициент шероховатости при $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$	$n = 0.026$

Таблица 2. Параметры физической жесткой модели

Table 2. Parameters of the physical rigid model

№ п/п	Наименование	Масштабные множители натура/модель
1	Линейная величина в горизонтальной плоскости	250
2	Линейная величина в вертикальной плоскости	100
3	Площадь в горизонтальной плоскости	62 500
4	Скорость течения	10
5	Расход воды	250 000
6	Уклон потока	0.4
7	Время гидравлических процессов	25



Рис. 2. Схема расположения гидротехнических сооружений

Fig. 2. The layout of hydraulic structures

Для решения поставленной задачи по обеспечению гарантированных глубин на перекатах Верхний и Нижний Жанасемейские были предложены три варианта гидротехнических сооружений (рис. 2).

Цифрой «1» отмечена поперечная запруда, цифрой «2» – продольная запруда, цифрой «2.1» обозначена продольная запруда с отличным от «2» положением, цифрой «3» – струнаправляющая дамба в конце о-ва Кругленький.

Изначально моделировать варианты гидротехнических сооружений было решено с помощью численной модели, с целью нахождения параметров запруд. В качестве основных вариантов были рассмотрены следующие решения:

1. Строительство продольной запруды, полностью перекрывающей в межень (при расходе воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$) правый рукав р. Иртыш в районе о-ва Кругленький (далее – продольная запруда).

2. Возведение в правом рукаве р. Иртыш в районе о-ва Кругленький поперечной запруды, перекрывающей в межень правый рукав р. Иртыш (далее – поперечная запруда).

Эффективность каждого из вариантов решения оценивалась путем сравнения отвечающих этим вариантам значений расчетных характеристик отметок водной поверхности с их значениями при бытовом состоянии русла (далее – БСР) и при расходе воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$.

3.2. Оценка эффективности повышения гарантированных глубин путем строительства продольной запруды

В качестве первого варианта был рассмотрен вариант строительства в районе Старого и Железнодорожного мостов между о-вами Бейбитшилик и Кругленький продольной (меженной) запруды, полностью перекрывающей в межень при $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ правый рукав р. Иртыш возле о-ва Кругленький.

Задаваемые для расчета на численной модели параметры гидротехнического сооружения представлены в табл. 3.

С помощью модели HEC-RAS для расхода воды $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ в русле с продольной запрудой были рассчитаны распределение расходов воды по рукавам, огибающим о-в Кругленький, осредненные по глубине скорости течения, отметки свободной поверхности потока и глубины потока. Результаты расчетов сравнивались с расчетами аналогичных характеристик для бытового состояния русла.

Анализ полученных результатов показывает, что при наличии продольной запруды при расходе воды $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ скорость течения в начале судоходного рукава значительно увеличивается по сравнению с бытовым состоянием русла (до $\approx 0.75 \text{ м/с}$), а в конце судоходного рукава она увеличивается еще больше и достигает 1.5 м/с . Такие изменения скорости течения связаны с тем, что при $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ возведение продольной запруды приводит к перемещению всего потока из правого рукава возле о-ва Кругленький в левый (судоходный) рукав. При этом по правому рукаву возле о-ва Кругленький продолжится поступление небольшого количества воды из вышележащего правого рукава возле о-ва Бейбитшилик.

Распределение расхода воды по рукавам в бытовом состоянии русла (без ГТС) и в случае строительства продольной запруды при расходе воды на исследуемом участке $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ представлено в табл. 4.

Сравнение продольных профилей свободной поверхности потока при бытовом состоянии русла и в русле с продольной запрудой при расходе воды

Таблица 3. Характеристики продольной запруды / Table 3. Characteristics of the longitudinal dam

№ п/п	Наименование параметра ГТС	Параметры ГТС
1	Длина по гребню, м	340
2	Отметка гребня, м БС	185.50
3	Максимальная высота ГТС, м	4.00
4	Ширина по гребню, м	20

Таблица 4. Распределение расхода воды по рукавам при бытовом состоянии русла и с возведенной продольной запрудой

Table 4. Distribution of water consumption along the arms in the case of a domestic channel condition and with a built longitudinal dam

Состояние русла	Математическая модель		Физическая модель	
	судоходный (левый) рукав	несудоходный (правый) рукав	судоходный (левый) рукав	несудоходный (правый) рукав
	Q = 625 м ³ /с		Q = 625 м ³ /с	
Бытовое	291 м ³ /с	334 м ³ /с	282 м ³ /с	343 м ³ /с
Продольная запруда	625 м ³ /с	0	623 м ³ /с	0

625 м³/с представлено на рис. 3. Как видно из рисунка, результаты численного моделирования и моделирования на жесткой гидравлической модели дают близкие результаты, что свидетельствует о достоверности расчетов на программном комплексе HEC-RAS, а также о качественной настройке гидравлической модели.

Анализ результатов расчетов и измерений показывает, что при возведении продольной запруды при межennem расходе воды Q = 625 м³/с повышение отметок свободной поверхности потока по сравнению с бытовым состоянием русла достигает 92 см на судовом ходе. Соответственно возрастают и глубины на лимитирующем перекате, что удовлетворяет потребности судоходства.

Таким образом, можно сделать вывод, что строительство продольной запруды позволит достичь гарантированных глубин на обоих объектах ис-

следования – Верхнем Жанасемейском и Нижнем Жанасемейском перекатах.

Однако при этом у приверха о-ва Кругленький в створе железнодорожного моста при прохождении расхода воды (625 м³/с) возникают косоструйные течения со скоростью до 1.5 м/с, осложняющие условия прохождения судов под мостом.

В связи с этим для снижения негативного влияния продольной дамбы на судоходные условия в створе железнодорожного моста была предпринята попытка изменить положение продольной запруды. Новое положение запруды показано на рис. 2 меткой «2.1».

После изменения положения продольной запруды были проведены дополнительные эксперименты на физической и численной моделях. На основании полученных результатов сделан вывод: полностью избавиться от эффекта косоструйного

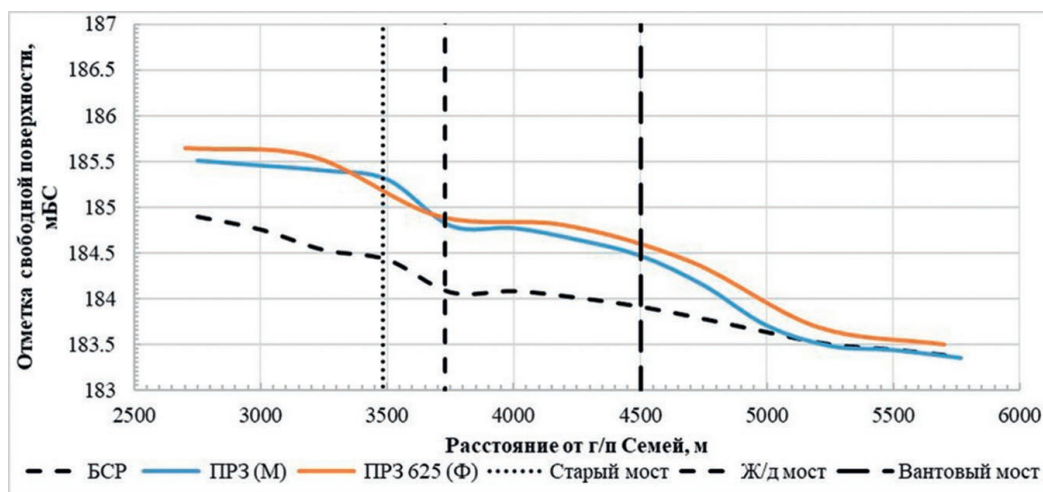


Рис. 3. Сравнение продольных профилей свободной поверхности воды на судовом ходе, полученных с помощью физической и численной моделей при бытовом состоянии русла (без ГТС) и при наличии продольной запруды (Q = 625 м³/с)

Fig. 3. Comparison of the longitudinal profiles of the free water surface on the ship's course, obtained using physical and numerical models in the case of the channel's living condition (without GTS) and in the presence of a longitudinal dam (Q = 625 м³/s)

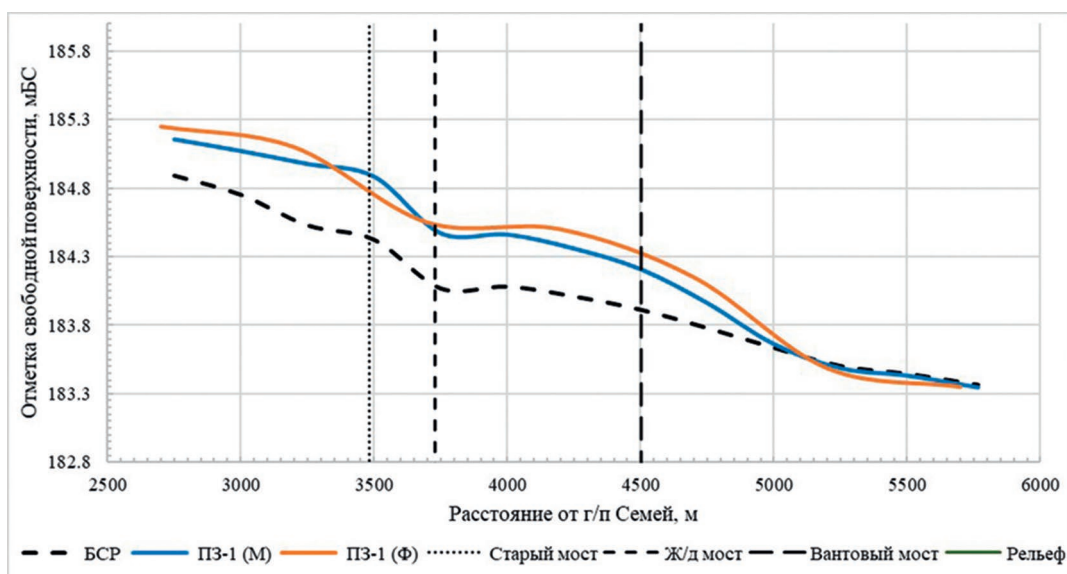


Рис. 4. Продольные профили свободной поверхности воды на судовом ходе при бытовом состоянии русла (без ГТС) и в случае строительства поперечной запруды ($Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$)

Fig. 4. Longitudinal profiles of the free water surface on the ship's passage in the case of the channel's domestic condition (without GTS) and in the case of the construction of a transverse dam ($Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$)

течения при возведении продольной запруды № 2 не представляется возможным в связи с перераспределением всего расхода воды в один рукав. Однако новое положение ГТС снижает скорость косоструйных течений до 1 м/с, что улучшает условия судоходства в створе железнодорожного моста.

3.3. Оценка эффективности увеличения гарантированных глубин путем строительства поперечной запруды в правом рукаве

В качестве альтернативного варианта решения поставленной задачи был рассмотрен вариант строительства в правом (несудоходном) рукаве р. Иртыш возле о-ва Кругленький поперечной запруды.

Параметры этого гидротехнического сооружения представлены в табл. 5.

На жесткой (недеформируемой) физической и математической моделях для расхода воды $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ в русле с поперечной запрудой были

Таблица 5. Параметры поперечной запруды

Table 5. Parameters of the transverse dam

№ п/п	Наименование параметра ГТС	Параметры ГТС
1	Длина по гребню, м	185
2	Отметка гребня, м БС	184.36
3	Максимальная высота ГТС, м	3.36
4	Ширина по гребню, м	10

измерены и рассчитаны распределение расходов воды по рукавам, огибающим о-в Кругленький, осредненные по глубине скорости течения и отметки свободной поверхности. Результаты расчетов и экспериментов сравнивались с расчетами аналогичных характеристик для бытового состояния русла.

Распределение расходов воды по рукавам, установленное на физической и математической моделях, при значении общего расхода воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$ приведено в табл. 6.

Результаты расчета и измерения отметок водной поверхности при расходе воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$ при бытовом состоянии русла и при наличии поперечной запруды представлены на рис. 4.

Анализ результатов расчетов и измерений показывает, что при возведении поперечной запруды с параметрами, указанными в табл. 5, при расходе воды $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ происходит повышение отметок свободной поверхности по судовому ходу до 62 см по сравнению с бытовым состоянием русла. Соответственно, возрастают и глубины на лимитирующих перекатах, чего достаточно для удовлетворения требований судоходства.

Расхождение в отметках между математической и физической моделями достигает в среднем всего лишь 10 см, что объясняется, по всей видимости, разной технологией установления шероховатости на моделях (локализованной на физической модели и одинаковой по всему межвенному руслу в математической).

Таблица 6. Распределение расходов воды по рукавам при наличии поперечной запруды при общем расходе воды 625 м³/с**Table 6.** Distribution of water flow through the sleeves in the presence of a transverse dam with a total water flow of 625 м³/с

Состояние русла	Математическая модель		Физическая модель	
	судоходный (левый) рукав	несудоходный (правый) рукав	судоходный (левый) рукав	несудоходный (правый) рукав
	Q = 625 м ³ /с		Q = 625 м ³ /с	
Бытовое	291 м ³ /с	334 м ³ /с	282 м ³ /с	343 м ³ /с
При поперечной запруде	467 м ³ /с	157 м ³ /с	452 м ³ /с	171 м ³ /с

Таким образом, можно сделать вывод, что данное решение — строительство поперечной запруды с указанными параметрами — позволит достичь гарантированных глубин на обоих лимитирующих перекатах: Верхнем Жанасемейском и Нижнем Жанасемейском.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В РУСЛЕ Р. ИРТЫШ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ЗАПРУД И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЗАЩИТНЫМ МЕРОПРИЯТИЯМ НА УЧАСТКАХ ИХ РАСПОЛОЖЕНИЯ

Анализ деформаций в русле реки, связанных со строительством запруд, был осуществлен в ходе экспериментов на пространственной полуразмываемой гидравлической модели.

Для воспроизведения на модели р. Иртыш состава руслоформирующих наносов в природных условиях из русловых отвалов были отобраны четыре пробы руслоформирующих наносов, гранулометрический состав которых был определен фотометодом. Средний диаметр руслоформирующих наносов в природных условиях составил 2.3 см.

При создании пространственной полуразмываемой гидравлической модели на размываемой части жесткой модели из песка диаметром 0.15–0.25 мм по съемке 2023 г. было воспроизведено морфологическое строение русла Иртыша, а затем последовательно сооружены продольная и поперечная запруды в соответствии с рис. 2.

Эксперименты на участках расположения запруд проводились при пропуске расхода воды $Q = 3500$ м³/с (расход воды в половодье) при наличии отдельно поперечной и продольной запруд.

4.1. Оценка деформаций дна, вызванных строительством продольной запруды

В ходе проведения экспериментов были получены данные о размывах и намывах в районе строительства запруды, представленные поперечными профилями дна в четырех створах, расположенных

на расстоянии 270 м (створ 1) и 160 м (створ 2) выше по течению от железнодорожного моста и на 25 м (створ 3) и 160 м (створ 4) ниже по течению железнодорожного моста, в бытовых условиях, при наличии продольной запруды без защитных гибких железобетонных матов и при их наличии, представленными на рис. 5.

Как следует из анализа результатов измерений, продольная запруда влияет незначительно на развитие деформаций в основном русле при максимальном расходе воды $Q = 3500$ м³/с. Однако при этом вдоль самой запруды наблюдаются значительные локальные размывы дна (рис. 6).

Эти локальные размывы дна заключаются в формировании вдоль нижней по течению границы запруды продольной ямы размыва глубиной до 5 м и в формировании ямы размыва вдоль верхней по течению границы запруды в районе опоры нового автомобильного моста глубиной до 2–3 м. Причиной формирования ямы размыва в нижнем бьефе продольной запруды при ее переливе при прохождении расхода воды $Q = 3500$ м³/с является продольный вихрь, формирующийся за запрудой.

Поскольку оба размыва дна вдоль тела продольной запруды угрожают ее устойчивости, было предложено осуществить отсыпку крупным валунным материалом вокруг основания опоры нового автомобильного моста, а вдоль нижней по течению границы запруды уложить полосу стандартных гибких железобетонных матов (рис. 7).

Выполненная на модели экспериментальная оценка этих мероприятий подтвердила их эффективность.

4.2. Оценка деформаций, возникающих в районе возведения поперечной запруды

Экспериментальные исследования деформаций дна при возведении поперечной запруды проводились также при пропуске расхода воды $Q = 3500$ м³/с.

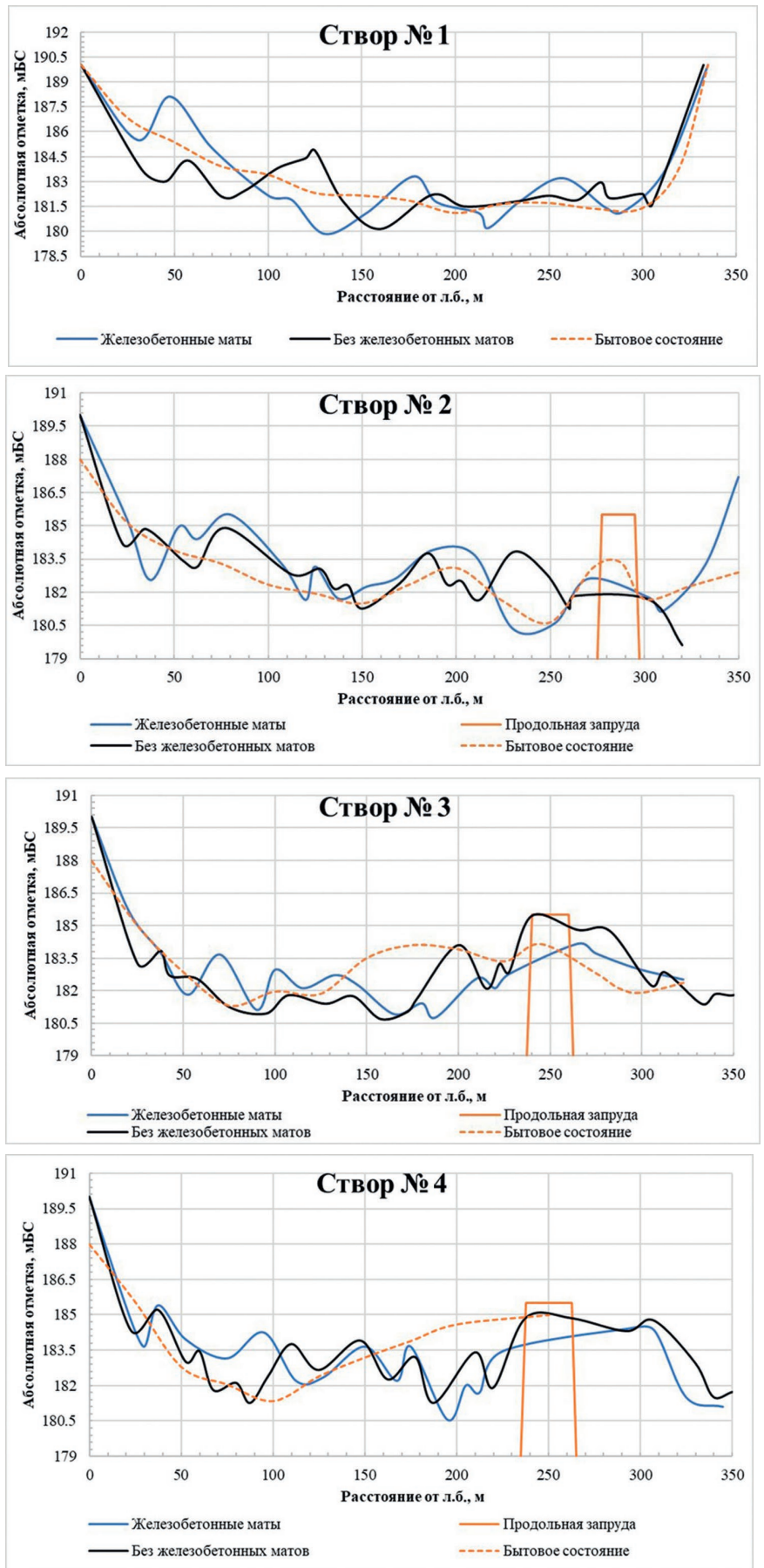


Рис. 5. Поперечные профили русла после прохождения расхода воды $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ в бытовом состоянии русла и при наличии продольной запруды с укреплением железобетонными матами и без них

Fig. 5. Comparison of the transverse profiles of the bottom with a built longitudinal dam in the presence of reinforced concrete mats and without, gate, after passing the water flow rate $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$



Рис. 6. Яма размыва в нижнем и верхнем бьефах продольной запруды после прохождения максимального расхода воды $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 6. Washout pit in the lower and upper reaches of the longitudinal dam after passing the maximum water flow rate of $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$

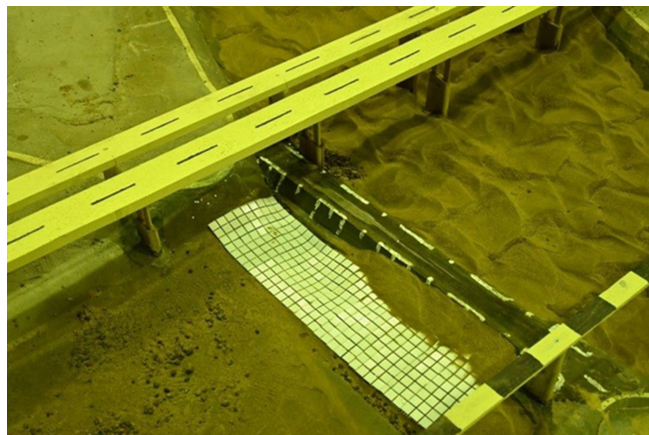


Рис. 7. Последствия прохождения максимального расхода воды $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ при реализации предложенных защитных мероприятий у продольной запруды

Fig. 7. Consequences of passing the maximum water flow $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ during the implementation of the proposed protective measures at the longitudinal dam

В ходе исследований были получены данные о размывах и намывах дна в нижнем бьефе поперечной запруды, представленные на рис. 9. Для ликвидации этих размывов была предложена укладка гибких железобетонных матов в нижнем бьефе запруды (см. рис. 8).

Сравнение результатов измерения размывов дна при отсутствии и при наличии гибких матов показало, что яма размыва при отсутствии матов достигает отметки 178.6 мБС, что на 2.4 м глубже, чем при наличии укрепления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из основных выводов, сделанных на основании данной работы, является хорошее

схождение результатов расчетов, выполненных на основе математической модели, и результатов экспериментов на физической модели. Это в свою очередь позволяет с уверенностью говорить об эффективности предлагаемых решений для улучшения судоходных условий на Нижнем и Верхнем Жанасемейских перекатах.

Для увеличения гарантированных глубин на лимитирующих перекатах рассматривались два оптимальных гидротехнических сооружения:

- продольная запруда, высотой в гребне 4.00 м (185.5), полностью перекрывающая в межень (при расходе воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$) правый рукав р. Иртыш в районе о-ва Кругленький;
- поперечная запруда в правом рукаве р. Иртыш в районе о-ва Кругленький со следующими харак-

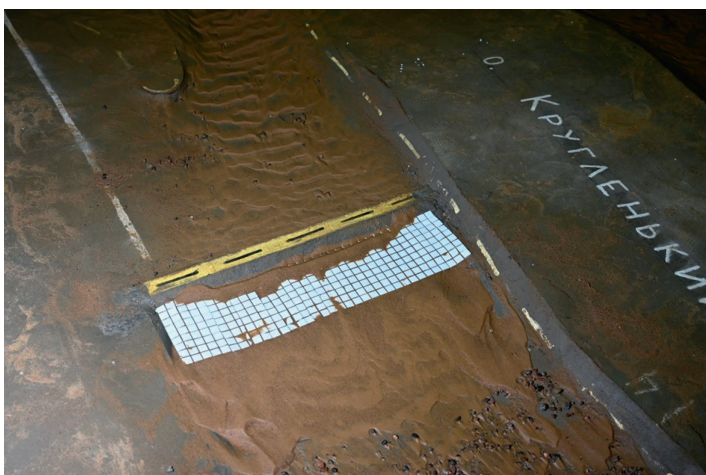


Рис. 8. Вид на поперечную запруду с укреплением нижнего бьефа имитацией железобетонных матов

Fig. 8. View of a transverse dam with reinforcement of the downstream bank by imitation of reinforced concrete mats

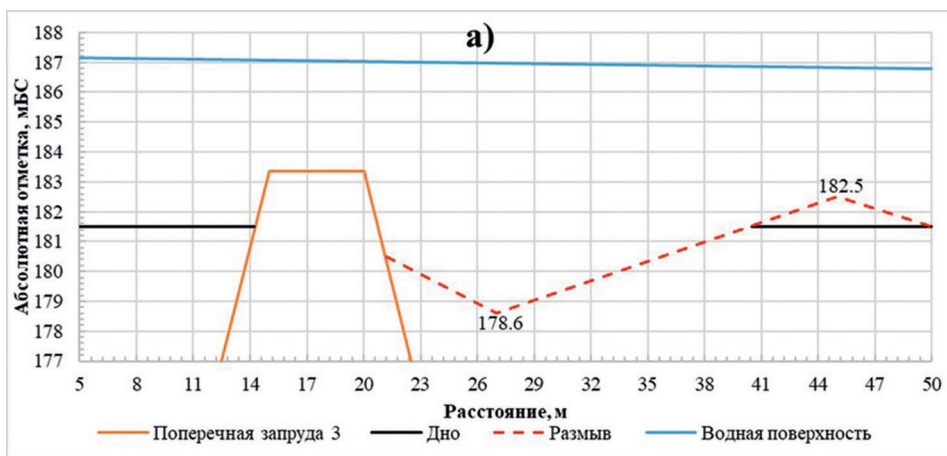


Рис. 9. Последствия прохождения максимального расхода воды $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ при наличии поперечной запруды: а) без укрепления нижнего бьефа; б) с укреплением нижнего бьефа железобетонными матами

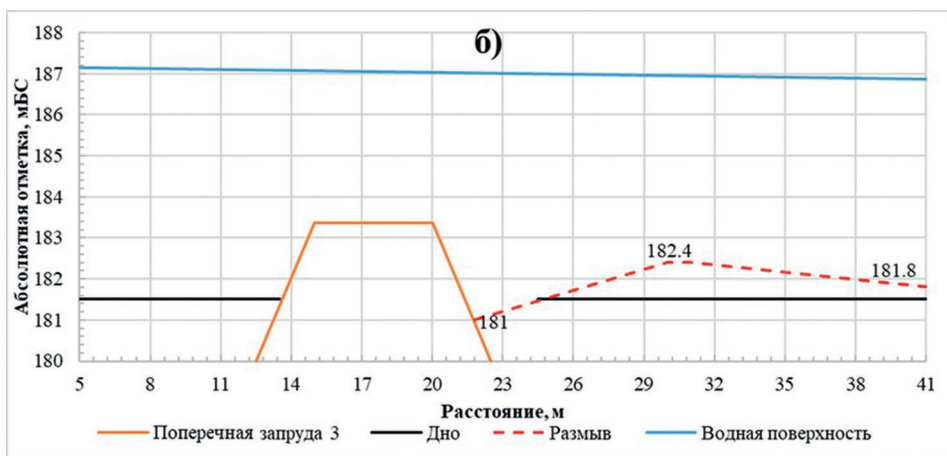


Fig. 9. The consequences of passing the maximum water flow rate $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ in the presence of a transverse dam: а) without strengthening the lower reaches; б) with reinforcement of the lower reaches with reinforced concrete mats

теристиками: длина 185 м и высота 3.36 м (отметка по гребню 184.36 м БС).

Строительство продольной запруды позволяет достичь максимальной эффективности поднятия гарантированных глубин на Нижнем и Верхнем Жанасемейских перекатах по сравнению с бытовым состоянием русла. При реализации данного мероприятия при расходе воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$ разница в глубинах на лимитирующих участках переката достигает 92 см, этого достаточно для осуществления судоходства на данном участке.

К недостатку данного варианта регулирования судоходных условий на перекатах следует отнести наличие на судовом ходу в створе железнодорожного моста зоны косоструйных течений со скоростями до 1 м/с.

При возведении любого из вариантов запруды (продольной или поперечной) нижний бьеф этих запруд должен быть в обязательном порядке укреплен полосой стандартных железобетонных гибких матов, а при возведении продольной запруды основание прибрежной опоры проектируемого автомобильного моста и смежная с ней верхняя часть верхнего бьефа продольной запруды должны быть отсыпаны крупным валунным материалом.

На основе проведенного анализа статьи можно сформулировать следующий вывод о преимуществах и полезности совместного применения методов математического (численного) и физического моделирования:

Необходимость комбинированного использования математического и физического моделирования обусловлена тем обстоятельством, что в структуры современных математических моделей заложена бесструктурная (безгрядовая) форма движения донных наносов, в то время как в натуральных условиях движение донных наносов осуществляется в грядовых формах, что и определяет режим деформаций дна на границах инженерных сооружений. Расчеты на математических моделях позволяют достоверно установить гидравлические характеристики речного потока (уклоны, уровни, скорости и структуру течений), необходимые для тарировки физической модели, и при различных вариантах компоновки инженерных сооружений. В то же время методически корректно созданные физические модели позволяют достоверно воспроизвести грядовую форму движения донных наносов и оценить возможные деформации речного дна на границах инженерных сооружений при грядовой форме их движения.

Совместное применение численного моделирования (с использованием программного комплекса HEC-RAS) и физического моделирования на жесткой (недеформируемой) и полуразрываемой моделях продемонстрировало высокую эффективность и взаимодополняемость этих методов при решении сложных инженерно-гидрологических задач, таких как улучшение судоходных условий на реках.

Ключевые преимущества гибридного подхода:

– Результаты, полученные на математической и физической моделях, показали хорошее сходжение. Это позволяет с высокой степенью уверенности утверждать, что и численная модель, построенная с помощью программного комплекса HEC-RAS, была адекватно настроена, и физическая модель корректно воспроизводила натурные условия. Взаимная проверка позволяет повысить общую надежность рекомендаций.

– Численное моделирование позволило быстро и с меньшими затратами проанализировать множество вариантов расположения запруд и их параметры на начальном этапе исследований. Физическое моделирование, в свою очередь, предоставило возможность убедиться в достоверности результатов математического моделирования гидравлических характеристик потока и детально изучить режим транспорта донных наносов в грядовой форме в бытовых условиях и при наличии запруд, а также их визуализировать.

Гибридное моделирование позволило не только оценить эффективность предлагаемых решений по повышению глубин на лимитирующих перекатах в меженьный период (при расходе воды 625 м³/с), но и исследовать потенциально негативные последствия их реализации, такие как:

1) возникновение косоструйных течений, установленное на математической модели, что привело к корректировке положения продольной запруды для снижения их скорости;

2) размывы дна в паводок (при расходе воды 3500 м³/с), которые были детально изучены на полуразрываемой физической модели. Это позволило разработать и экспериментально подтвердить эффективность защитных мероприятий (укрепление железобетонными матами и валунной отсыпкой), что было бы крайне затруднительно сделать только с помощью численной модели.

Таким образом, комбинированное использование численного и физического моделирования является надежным инструментом при гидравлическом моделировании. Оно сочетает в себе скорость и гибкость компьютерного анализа с наглядностью и высокой достоверностью натурального физического эксперимента. Этот «симбиоз» позволяет не только найти оптимальное техническое решение, но и все-

сторонне оценить его долгосрочные последствия, минимизировать риски и обосновать инвестиции в строительство гидротехнических сооружений. В рамках данного исследования гибридное моделирование успешно доказало свою полезность для разработки научно обоснованных рекомендаций по улучшению судоходных условий на р. Иртыш.

ЛИТЕРАТУРА

Исследование условий заносимости водозаборных сооружений для различных компоновочных решений с использованием 3D численных моделей. АО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2023.

Католиков В.М. Проблемы моделирования деформаций речных русел в свете дискретного характера транспорта руслоформирующих наносов в реках // VI международная научно-практическая конференция «Гришанинские чтения». «Водные пути и русловые процессы, гидротехнические сооружения водных путей» – Сборник научных трудов. Вып. 6, т. 1. СПб: Изд. ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2023. С. 44–57.

Клаев А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб.: Нестор-История, 2011. 504 с.

Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисченко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.

Лоцманская карта реки Иртыш от Шульбинской ГЭС до села Майтубек. Семейский филиал РГКП «Казакстан су жолдары», 2024.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику Отдела русловых процессов ГГИ Католиковой Н.И. за существенную помощь при редактировании статьи.

ОБ АВТОРАХ

Щеглов Денис Александрович, младший научный сотрудник отдела русловых процессов Государственного гидрологического института. Рабочий адрес: 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23.

E-mail: obyvanky45@gmail.com

Католиков Виктор Михайлович, заведующий отделом русловых процессов Государственного гидрологического института, ведущий научный сотрудник, к.т.н., доцент по специальности «Гидравлика и инженерная гидрология». Рабочий адрес: 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23.

E-mail: v.katolikov@mail.ru

IMPROVEMENT OF NAVIGATION CONDITIONS ON THE IRTYSH RIVER IN THE SEMEY AREA BASED ON HYBRID MODELING

Denis Alexandrovich Shcheglov, Victor Mikhailovich Katolikov

FSBI «State Hydrological Institute», Saint Petersburg, Russia

Obyvanky45@gmail.com

Annotation. The article presents the results of a comprehensive study aimed at improving navigable conditions in the limiting section of the Irtysh River in the Semey area (Upper and Lower Zhanasemeisky ridges, 2900-2904 km of navigation). The research is based on the methodology of hybrid (combined) hydraulic modeling, which integrates numerical calculations in the HEC-RAS software package and experiments on a spatial physical model.

The purpose of the work is a comparative analysis of the effectiveness and justification of the parameters of two variants of regulating hydraulic structures (longitudinal and transverse dams) to ensure guaranteed depths during the inter-ice period. Verification of the numerical model and calibration of the physical model based on field observations were carried out. It was found that both options provide a significant increase in water levels (up to 92 cm for the longitudinal and up to 62 cm for the transverse dam) at an intermediate flow rate of 625 m³/s. A negative effect in the form of a cross-jet flow (up to 1.5 m/s) was identified and quantified for the option with a longitudinal dam, which required correction of its position. Using a semi-collapsible physical model, morphodynamic processes during the flood period (flow rate of 3500 m³/s) were studied and areas of potential erosion threatening the stability of structures were identified. Engineering measures to protect against erosion (reinforcement with flexible reinforced concrete mats and boulder filling) have been developed and tested on the model for each variant. The complementarity and high efficiency of combining numerical and physical modeling methods to obtain reliable and integrated engineering solutions are proved.

Keywords: Irtysh River, navigable conditions, ripples, numerical modeling, HEC-RAS, physical modeling, hydraulic structures, channel deformations, erosion

REFERENCES

Investigation of the conditions of water intake structures for various layout solutions using 3D numerical models. JSC VNII-IG named after B.E. Vedeneev, 2023.

Katolikov V.M. Problems of modeling riverbed deformations in the light of the discrete nature of riverbed-forming sediment transport in rivers // VI International scientific and practical conference «Grishaninsky readings» «Waterways and riverbed processes, hydraulic structures of waterways» - Collection of scientific papers, Issue 6, vol. 1. St. Petersburg: GUMRF Publishing House named after S.O. Makarov, 2023, p. 44–57

Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and riverbed process. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. 504 p.

Kondratiev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. Fundamentals of the hydromorphological theory of the riverbed process L.: Gidrometeoizdat, 1982. 272 p.

Pilot map of Irtysh from Shulbinskaya HPP to Sela Maitubek. Semey branch of RGCP «Kazakhstan waterways», 2024.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank N.I. Katolikova, Senior Researcher at the Department of Riverbed Processes at the GGI, for her substantial assistance in editing the article.

ABOUT THE AUTHORS

Shcheglov Denis Alexandrovich, Junior Researcher at the Department of Riverbed Processes of the State Hydrological Institute. Working address: 199004, Saint Petersburg, 2nd line V.O., 23. E-mail: obyvanky45@gmail.com

Katolikov Victor Mikhailovich Head of the Department of Riverbed Processes, Senior Researcher, KTN, Associate Professor specializing in “Hydraulics and Engineering Hydrology”. Working address: 199004, Saint Petersburg, 2nd line V.O., 23. E-mail: v.katolikov@mail.ru