

На правах рукописи

О. Мас

МАСЛИКОВА Оксана Яковлевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДЕФОРМАЦИЙ ДНА В ПОКРЫТЫХ ЛЬДОМ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКАХ**

Специальность

05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

МОСКВА 2008

Работа выполнена в Институте водных проблем РАН

Научный руководитель – доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
Дебольская Елена Ивановна

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Боровков Валерий Степанович

– кандидат технических наук
Верхоглядов Андрей Александрович

Ведущая организация – ОАО "ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева"

Защита состоится «01» декабря 2008г. в 15.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 220.045.02 в Московском государственном
университете природообустройства по адресу: 127550, Москва, ул.
Прянишникова, д.19, аудитория *201*

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Московском
государственном университете природообустройства по адресу: 127550, Москва,
ул. Прянишникова, д.19.

Автореферат разослан

«28» Октября 2008г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, доцент
кандидат технических наук

И.М. Евдокимова

И.М. Евдокимова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования определяется тем, что зимний режим рек и водохранилищ на территории России продолжается в ряде случаев большой период года. Возникающие при этом ледовые образования существенно изменяют условия течения воды и формирования рельефа аллювиальных русел. При образовании ледовых заторов и зажоров возникают зимние наводнения, которые в большинстве своем приводят к гораздо более тяжелым последствиям, чем весеннее половодье и осенние паводки, существенно изменяя процесс руслоформирования. Рельеф русла в нижних бьефах ГТС зависит от условий их эксплуатации, зимний режим которой значительно отличается от летнего. При этом отличия в сезонных деформациях русла могут быть вызваны не только изменением нагрузки на ГТС, но и изменением динамики потока в нижнем бьефе за счет наличия приплотинной полыньи и резким скачком гидравлического сопротивления на кромке ледяного покрова.

Значительные деформации русла, причем, как размывы, так и заиление в нижних бьефах могут привести к ухудшению работы ГТС, условий обитания биоты и стать дополнительным фактором формирования ледовых затруднений. Проведение натурных исследований гидродинамики потоков и процессов деформаций дна в условиях резкой нестационарности течений, свойственной нижним бьефам, и особенно в период формирования ледовых затруднений, практически невозможно. Лабораторное моделирование также связано со значительными трудностями из-за невозможности выполнения всех критериев подобия одновременно, что главным образом обусловлено разномасштабностью действующих сил и процессов. В связи с этим одним из эффективных способов изучения воздействия ледяного покрова на руслоформирование в нижних бьефах является математическое моделирование.

Целью диссертационной работы является разработка математических моделей, позволяющих оценить влияние ледяного покрова на транспортирующую способность речных потоков и донные деформации в нижних бьефах ГТС и при формировании ледовых заторов.

Реализация поставленной цели предполагает решение следующих основных задач:

1. Разработка численной модели, позволяющей объединить модели для расчёта распространения волны попусков в нижнем бьефе гидроузлов при наличии ледяного покрова и деформаций дна с учетом возможности возникновения ледовых заторов.
2. Получение экспериментальных и натуральных данных для тестирования модели.
3. Оценка методов расчета расхода наносов, приемлемых для моделирования существенно нестационарных потоков в условиях, формирующихся во время образования заторов, при которых возникают разнонаправленные потоки, переносящие наносы.
4. Выявление зависимостей деформаций дна в нижних бьефах гидроузлов в условиях ледовых затруднений от гидродинамических параметров потока, характеристик волны возмущения, ледяного покрова и грунта, слагающего ложе русла.
5. Выявление роли донных форм в процессе формирования ледовых заторов.
6. Разработка практических рекомендаций по предотвращению и уменьшению негативного влияния ледовых образований.

Материалы и методы исследования.

Для реализации поставленных задач использованы теоретические основы гидродинамики открытых и подледных потоков, гидрологии и теории русловых

процессов. Исследование основано на применении математического моделирования открытых и подледных русловых потоков, формирования ледовых заторов и транспорта наносов.

Работа базируется на собственных программах, написанных на языке программирования Фортран с использованием современного графического интерфейса, а также на пакете MATLAB.

В качестве фактического материала были использованы данные лабораторных и натурных экспериментов, проведенных в гидравлической лаборатории Российского Университета Дружбы Народов и в экспедиционных исследованиях Института водных проблем Российской Академии Наук на р. Истре (Московская обл.)

Научная новизна. Впервые разработан комплекс математических моделей, позволяющих оценить влияние ледяного покрова на транспортирующую способность нестационарных потоков и особенности процесса деформации дна в нижних бьефах гидроузлов при наличии ледяного покрова и в условиях ледовых заторов.

Впервые предложены зависимости для параметризации максимальных размывов в нижних бьефах гидроузлов от величины попуска, его продолжительности, длины полыньи, коэффициента шероховатости дна и льда, размера частиц грунта, его пористости и плотности.

Практическая значимость. Разработанный комплекс моделей может быть использован для прогнозов возможных переформирований дна от воздействия работы гидроузлов и в условиях формирования ледовых заторов.

Зависимости, предложенные в работе, могут быть использованы для оценки возможных размывов в створе гидроузлов и у кромки ледяного покрова.

На основе полученных в работе результатов даются практические рекомендации по предотвращению и смягчению последствий ледовых затруднений.

Достоверность научных положений и выводов, полученных в работе, является следствием использования классических математических методов построения моделей, их численного и аналитического анализа; использования реальных данных по динамике внешних факторов; согласования численных экспериментов с натурными и лабораторными данными.

На защиту выносятся следующие положения:

Разработана численная модель деформаций дна в условиях нестационарности в открытых, подледных и частично покрытых льдом потоках, а также в условиях возникновения ледовых заторов, возникающих под воздействием волны попуска.

Модель позволяет одновременно рассчитывать динамику волны попуска, место и время возникновения возможных ледовых заторов, деформации дна.

С помощью модельных экспериментов показано, что наряду с возникновением размывов в створе гидроузла значительные размывы возникают и под кромкой ледяного покрова, величина которых в зависимости от входных параметров может превышать приплотинные.

На основе результатов численных экспериментов определены параметрические зависимости размывов в створе гидроузла и под кромкой ледяного покрова от характеристик руслового потока, гидрографа попуска, льда и грунта.

Личный вклад автора. Результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Все необходимые расчеты и оценки сделаны автором лично. Анализ и интерпретация полученных результатов проведены при непосредственном участии автора.

Апробация работы. Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международная научная конференция "Экстремальные гидрологические события: теория, моделирование, прогноз", Москва, 2003;
- VI Гидрологический съезд, С.-Петербург, 2004
- IV Научно-практическая конференция МЧС России «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций», Москва, 2004.
- VI Конференция «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей», Москва, 2004
- Всероссийская научная конференция «Новые и традиционные идеи в геоморфологии», МГУ им. Ломоносова, 2005.
- 18th IANR Ice Symposium, Japan, Sapporo 2006.
- X Int. Symposium on River Sedimentation. «Effects of River Sediments and Channel Processes on Social, Economic and Environmental Safety». Russia, Moscow, 2007
- Всероссийская конференция «Ледовые и термические процессы на водных объектах России», Архангельск, 2007
- Научная конференция «Россия в МПГ – первые результаты». Сочи, 2007
- научная сессия «Географические и экологические аспекты гидрологии», Спб. Г.У., факультет географии и геоэкологии, март 2008
- 19th IAHR International Symposium on Ice "Using New Technology to Understand Water-Ice Interaction" Vancouver, British Columbia, Canada, July 6 to 11, 2008
- XIV Гляциологический симпозиум «Гляциология от международного геофизического года до международного полярного года», Иркутск, сентябрь 2008
- Научная конференция «Вклад России в МПГ», Сочи, октябрь 2008

Публикации. Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в печатных работах, в том числе в тезисах, статьях в реферируемых журналах. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы, содержит 5 таблиц и 53 рисунка. Общий объём диссертации 142 страницы. Список литературы включает 91 наименование, из которых 41 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дается краткое содержание глав работы.

В главе 1 дается аналитический обзор современных научных представлений о транспортирующей способности потока, транспорте наносов при неустановившемся движении жидкости, а также современное состояние изученности деформаций дна открытых и покрытых льдом русловых потоков. Приводятся сведения об изученности влияния ледяного покрова на формирование рельефа аллювиальных русел, даются описания возникновения заторов.

Глава 2 посвящена исследованию размыва дна при наличии покрытия на поверхности потока, проведенному в гидравлической лаборатории кафедры гидравлики РУДН.

Рабочий участок лотка (рис. 1) был выбран по результатам измерения распределения скоростей течения воды вдоль потока, как участок с равномерным режимом течения.

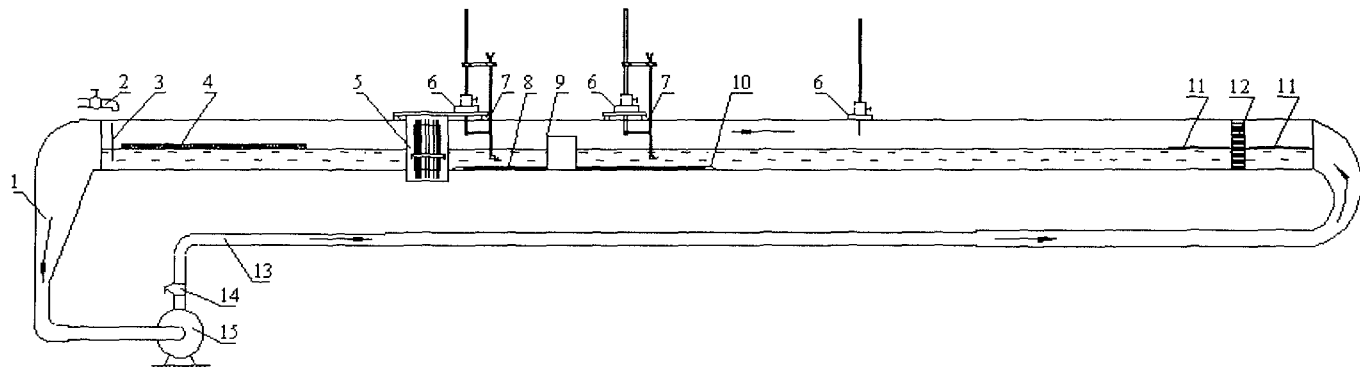


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

1 – всасывающий трубопровод; 2 – водопроводный кран; 3 – термометр; 4 – пенопластовый успокоитель; 5 – микроманометр; 6 – штицмасштаб; 7 – трубка Пито; 8 – песок; 9 – модель опоры моста; 10 – бортики для фиксации песка; 11 – деревянный успокоитель; 12 – успокоительно-струевыпрямляющая кассета; 13 – нагнетательный трубопровод; 14 – задвижка; 15 – центробежный насос

Для измерения скоростей использовалась трубка Пито.

Имитацией льда являлся плотный пенопласт длиной равной длине рабочего участка - 2м, шириной равной ширине гидравлического лотка 0,24м и толщиной 0,05м.

Во всех экспериментах использовался песок крупностью от 0,315 мм до 1,0 мм.

Расход воды в гидравлическом лотке выбирался таким образом, чтобы донные скорости были неразмывающими. После этого в лоток погружалась модель льда.

Измерения скоростей течения в различных вертикалях исследуемого участка, а также визуальные наблюдения за процессом переноса наносов при наличии имитации ледяного покрова позволили выявить основные закономерности размыва дна, а также верифицировать данные наблюдения с результатами, полученными при использовании программы FEMLAB (математического расширения пакета MATLAB).

Программа FEMLAB после введения входных данных – скоростей течений (измеренных в экспериментах) рассчитывает поле скоростей в каждой точке заданного геометрического объема. В результате оценивается геометрия дна и сравнивается с визуально наблюдаемыми данными в процессе эксперимента.

В 3 главе описаны натурные исследования динамики уровней водной поверхности, скоростей течения и транспорта взвешенных и донных наносов в различные периоды попусков, в нижний бьеф Истринского гидроузла, включая зимний период, т.е. при наличии ледяного покрова, необходимых для верификации моделей неустановившегося потока в размываемом русле.

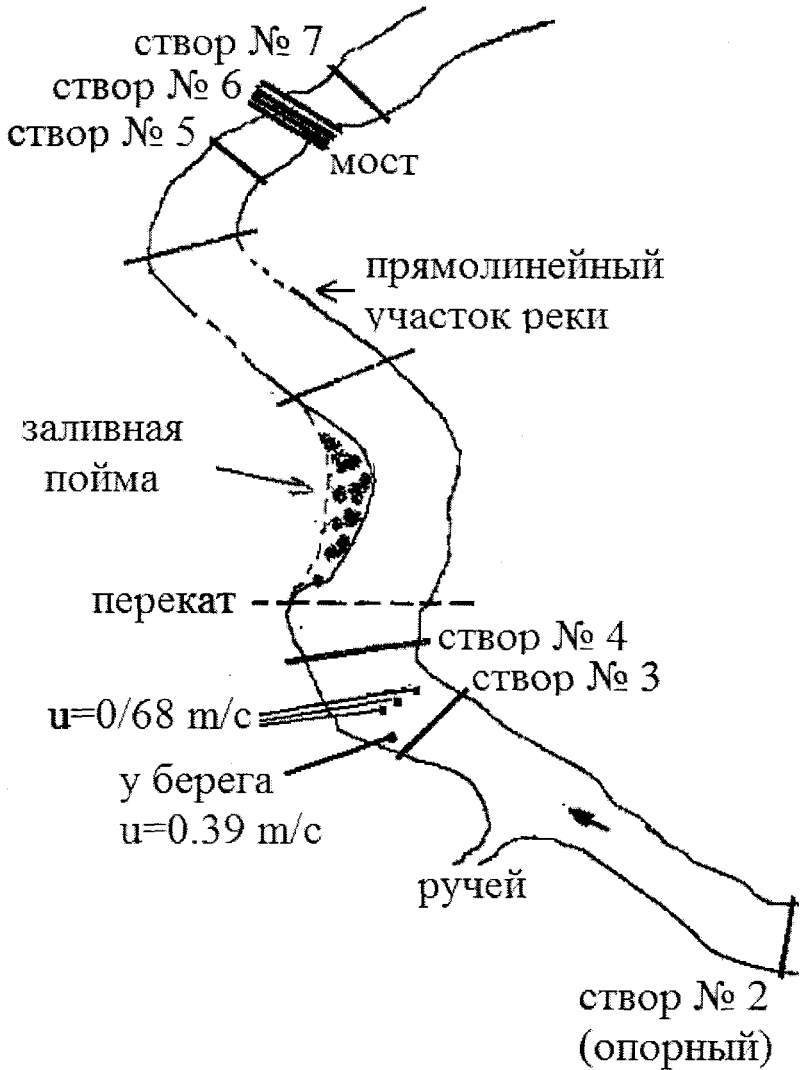


Рис. 2 Схема расположения створов

Методика исследований заключается в предварительном определении характеристик течений при равномерном и установившемся режиме и последующем сравнении этих характеристик при неустановившемся и

неравномерном режиме течений. Были проведены синхронизированные измерения уровней водной поверхности, скоростей течения, концентрации взвешенных наносов и отметок поверхности дна в трех створах по длине русла. При этом в зависимости от объема попуска расстояния между створами изменялись для оценки изменения скорости добегания волны попуска.

В нижнем бьефе Истринского гидроузла на расстоянии от 5 до 15 км ниже плотины были разбиты 7 створов и один створ (№ 8) был оборудован в пункте Павловская Слобода ниже по течению, где расположен створ Федерального государственного управления «Мосводоканал» (рис. 2).

На каждом из указанных створов проводились измерения скоростей потока на вертикалях, расположенных на расстоянии 2 м друг от друга (7-15 вертикалей в зависимости от ширины русла). На створах №2, 4 и 6 измерялись колебания уровня воды. На всех створах проводился отбор проб грунта для гранулометрического анализа. Измерения проводились при попусках, которым соответствовали расходы воды 4, 6, 8, 9, 11, 13 и 14 м³/с.

Измерения скоростей течения проводились гидрометрическими вертушками ИСП-1, F-581В и ГР-99. Колебания уровня определялись по отметкам на водомерных рейках. Отбор проб донного материала осуществлялся дночерпателем А. С. Орлова. Гранулометрический состав наносов определялся путем ситового анализа. Поперечные сечения на створах и их эволюция определялись путем эхолотирования. Распределение концентраций взвешенных наносов определялось с помощью наносонакопителей ИО РАН.

Основные результаты. По данным указанных выше измерений были рассчитаны средние величины основных гидравлических характеристик потока при различных объемах попусков для створов 1 и 6, по перепаду уровней водной поверхности, между которыми измерялись гидравлические уклоны.

4 глава посвящена разработке математической модели деформаций дна в подледном потоке. Моделирование транспорта наносов в подледных потоках пока слабо развито. Различия в транспорте наносов в открытых и

подледных руслах могут быть вызваны прежде всего изменением общего сопротивления русла и отсутствием поступления наносов мелких фракций с водосбора. Здесь формирование поля взвешенных наносов происходит в основном только за счет донного материала русла.

Основные уравнения одномерной модели нестационарного подледного потока с деформируемым дном.

Основой одномерной модели транспорта наносов, как это принято в большинстве моделей для открытых потоков, для жидкой фазы служат уравнения Сен-Венана и неразрывности для расчета скоростей и отметок воды (в неконсервативной форме записи) или расходов (в консервативной форме) и уравнение неразрывности Экснера для твердой фазы.

В случае прямоугольного призматического канала без боковых притоков стандартная форма записи этих уравнений в консервативной форме будет иметь вид:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x} + gh \frac{\partial z_b}{\partial x} = -\tau_b, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left((1-p)z_b + \frac{Q_s h}{Q} \right) + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

где x и t – координаты пространства и времени, g – ускорение силы тяжести, h – глубина воды в сечении, z_b – отклонение поверхности дна, p – пористость донного материала, Q и Q_s – расходы воды и наносов на единицу ширины соответственно, τ_b – донное трение, выражаемое обычно через коэффициент шероховатости в форме Маннинга.

Расход наносов Q_s складывается из расхода донных Q_{sb} и взвешенных Q_{ss} наносов. Из всего многообразия зависимостей для записи расхода наносов Q_s , в

одном случае нами использовалась наиболее простая зависимость
Энгелунда, не предусматривающая деление наносов на взвешенные и донные:

$$Q_s = 0.05U^2 \left(\frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gd} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{d}{(\rho_s/\rho - 1)g}}. \quad (4)$$

В другом случае для расхода донных наносов возможно использовать формулу Мейера-Петера и Мюллера, полученную для однородного потока

$$Q_{sb} = 8(u_*^2 - c_7gd\Delta)^{3/2} / g\Delta, \quad (5)$$

где $c_7 = 0.047$, u_* - динамическая скорость, $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$, d - средний диаметр частиц, ρ_s - плотность частиц, ρ - плотность воды.

Расход взвешенных наносов рассчитывался в виде

$$Q_{ss} = \int_0^h u(z)c(z)dz. \quad (6)$$

Распределение концентрации взвешенных наносов $c(z)$ принималось в виде зависимости [Graf W.H, McLean S.]

$$c(z) = c_a \left(a(h-z)/(z(h-a)) \right)^{(w/\kappa u_*)}, \quad (7)$$

где z - вертикальная координата, w - гидравлическая крупность наносов, κ - константа Кармана, a - толщина слоя, в котором осуществляется транспорт донных наносов, эквивалентная донной шероховатости. В этом слое концентрация наносов постоянна и равна $c_a = Q_{sb} / (6.34u_*a)$.

Уравнение (1) для подледных потоков, отличается от случая открытых потоков записью члена τ_b , вследствие того, что на верхней границе потока появляется дополнительное сопротивление и изменяется смоченный периметр поперечного сечения.

В качестве начальных условий нами принимается постоянство расхода по длине реки и во времени.

Основные результаты. Известно, что в приплотинном створе при проведении сбросов воды наблюдаются значительные размывы. Очевидно, что

при достижении фронтом волны кромки ледяного покрова после прохождения приплотинной полыньи, резко изменяется сопротивление движению, что с необходимостью должно вызывать перестройку эпюры скорости, а, следовательно, и приводить к изменениям в процессе переноса донных и взвешенных наносов. Численные эксперименты по предложенной модели показали, что в отличие от потока с открытой поверхностью при прохождении волны возмущения в потоке, покрытом льдом, как на приплотинном участке, так и в створах, прилегающих к кромке ледяного покрова, наблюдаются размывы дна. Между этими участками наблюдается аккумуляция наносов, причем, чем больше длина полыньи, тем оно незначительнее. Это с очевидностью вытекает из сохранения общей массы переносимых потоком наносов. Расчеты были проведены для условной реки со средними характеристиками: ширина 500м, глубина 4 м, расход воды 1000 м³/с, уклон 0.00005, $k_0 = 0.02 \text{ с/м}^{1/3}$, кромка льда расположена на расстоянии 1900 м от створа гидроузла, что соответствует, например, р. Свири. На рис. 3 приведены изменения отметок дна по длине реки начиная от створа гидроузла в начальных створах и створах, прилегающих к кромке льда при различных попусках. Сплошные линии соответствуют попуску, превышающему бытовой расход в $k=4$ раза, пунктирные – в $k=3$ раза и штрихпунктирные – в $k=2$ раза. Видно, что размыв у кромки даже несколько превышает размывы в створе гидроузла.

Было показано, что величина размывов зависит от величины попуска, его продолжительности, длины полыньи, коэффициента шероховатости льда, размера частиц грунта, его пористости и плотности. Для оценки вклада каждого из этих параметров, при прочих неизменных в каждом эксперименте последовательно изменялся только один из параметров.

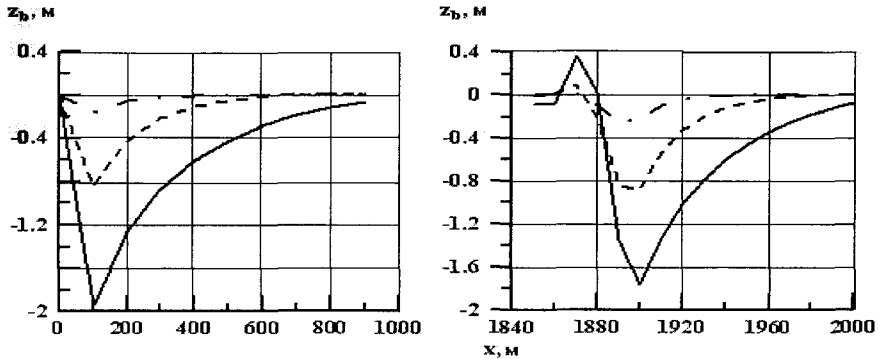


Рис. 3 Изменения отметок дна по длине реки в начальных створах и створах, прилегающих к кромке льда при различных попусках

По данным численных экспериментов были получены зависимости величины максимального размыва в створе гидроузла, в створе кромки и их отношение от параметра попуска k , характеризующего превышение попуска над бытовым расходом. Было показано, что соотношение размера размыва у кромки и в створе гидроузла уменьшается с увеличением параметра попуска.

Были получены также характеристики размыва в зависимости от изменения отношения шероховатости льда к шероховатости дна, от размера полыньи и от размера частиц наносов. Очевидно, что с ростом шероховатости льда размывы у кромки увеличиваются, а у вблизи гидроузла уменьшаются.

Все полученные зависимости удалось описать в параметрическом виде.

Для открытого потока:

$$\frac{z_1}{h_0} = \frac{k^{2.3} T^{0.5} e^{-1.5 \nu}}{h^{0.75} g^{0.75} d \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^3}$$

Для подледного потока:

$$\frac{z_1}{h_0} = \frac{k^3 L^{1/3} T^{0.5} e^{1.5} v^2}{h^{19/12} g^{0.75} d^2 \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^3 \frac{k_n}{k_d}};$$

$$\frac{z_L}{h_0} = \frac{k^{2.3} T^{0.6} e(v/d)^{1.2} \frac{k_n}{k_d}}{L^{0.2} h^{0.7} g^{0.3} \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{2.6}};$$

$$\frac{z_L}{z_0} = \frac{T^{0.1} \left(\frac{k_n}{k_d}\right)^2 \left(\frac{d}{v}\right)^{0.8} \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{0.4} g^{0.45} h^{53/60}}{k^{0.7} e^{0.5} L^{8/15}};$$

где h_0 - глубина потока до производства попуска, h - глубина в створе гидроузла или у кромки при соответствующем размыве, $v=8 \cdot v_0$, $v_0=10^{-6}$ м²/с - вязкость воды при температуре 20°C.

Влияние размеров частиц и начальной формы дна на его деформацию. В вышеупомянутых случаях и в условиях затора, были проведены численные эксперименты с различными размерами частиц. Очевидно, что благодаря отсутствию механизма взвешивания частиц, для потока с дном, сложенным материалом более крупного размера, преобладающим руслоформирующим процессом является размыв, хотя его интенсивность значительно ниже, чем для потоков с мелкими частицами. Особенно это характерно для случая образования затора.

Чтобы выяснить влияние первоначальной формы дна на его деформацию в результате воздействия нестационарности, были проведены численные эксперименты для потока с ровным дном и потока с донными формами, размеры которых задавались в виде синусоидальной зависимости: $z=h_r \sin(\pi x/l_r)$, где h_r - высота рифеля, l_r - его длина.

Параметры потока были таковы: начальная глубина $h_0=7\text{м}$, уклон дна $i=3\cdot 10^{-4}$, параметры попуска: максимальное значение расхода попуска $Q_{\text{пор}0}=5Q_0$ и $Q_{\text{пор}0}=7Q_0$, $Q_0=7\text{м}^2/\text{с}$, время попуска 10 мин, толщина льда $h_i=2\text{м}$. Оказалось, что в потоке, частично, покрытом льдом, даже при расходе попуска $Q_{\text{пор}0}=5Q_0$, не образующем затор в потоке с ровным дном, в случае с рифелями образовался затор и повлек за собой значительный размыв дна. Это позволило сделать вывод о том, что при прочих равных условиях наличие в потоке донных форм служит катализатором для формирования затора. Увеличение расхода попуска до $Q_{\text{пор}0}=7Q_0$ незначительно влияют на деформации дна. При этом во всех случаях первоначальные донные формы сглаживались, рифели исчезали.

Этот эффект может быть использован для регулирования возможного образования ледового затора в нижнем бьефе гидроузла небольшим попуском, позволяющим перестроить форму дна перед кромкой льда из грядовой в гладкую.

Деформации дна в условиях формирования затора. Необходимыми условиями образования заторов являются разрушение ледяного покрова и превышение скорости течения критического значения, при котором может происходить подныривание оторвавшейся льдины под неразрушенный ледяной покров. Критерии разрушения: при выполнении условия
$$\left| \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right|_{\text{max}} \geq \frac{2\sigma_{\text{пр}}}{Eh_{\text{л}}},$$

происходит разрушение, где E и $\sigma_{\text{пр}}$ – модуль упругости и предел прочности льда на изгиб. Условие подныривания льдин принято:

$$U_{\text{крит}} = \sqrt{2gh_{\text{л}}(\rho - \rho_{\text{л}})(1 - h_i/h)/\rho}, \text{ где } \rho_{\text{л}} - \text{плотность льда.}$$

Численные эксперименты, выполненные с привлечением зависимости (4) показали, что после формирования затора, на всем предзаторном участке размыв дна достигает очень больших значений, особенно в первые моменты после его образования. Расчеты, выполненные с использованием зависимостей (5) - (9) для определения расхода наносов, дают результат, значительно отличающийся для

деформаций в условиях образования затора. Характерно, что результат расчета деформаций дна и расходов воды для открытых потоков мало зависит от вида зависимости, используемой для расчета расхода наносов, в случае подледного потока расхождение становится больше, в случае же образования затора наблюдается существенное различие как в величинах деформаций, так и в расходах воды.

Существенное влияние оказывает уменьшение расхода взвешенных наносов в месте образования затора, что, в совокупности с тем, что ниже затора наносы переноситься не могут, по-видимому, и служит причиной аккумуляции наносов в верхней части предзаторного участка.

Сравнение результатов численных экспериментов с данными лабораторных наблюдений. Эксперименты показали, что при прочих равных условиях покрытие вызывает изменение в режиме переноса наносов, образовании донных форм и местных деформаций дна. В качестве основного фактора для тестирования модели было выбрано образование местного размыва у кромки покрытия при резком увеличении скорости во входном створе. При нагруженном покрытии процесс деформаций значительно интенсифицировался. На рис. 4 приведены кривые изменения отметок дна по длине на начальном участке и у кромки покрытия, которая располагалась на расстоянии 200 см от головы лотка. Кривые построены по данным расчетов, выполненных по модели при параметрах потока, соответствующих эксперименту. В численном эксперименте скорость образования и величина размыва (около 2 см) у кромки покрытия совпадали с наблюдаемыми при проведении эксперимента в лотке.

Сравнение результатов численных экспериментов с данными натуральных исследований. Для тестирования модели деформаций дна были использованы данные натуральных наблюдений на реке Истре при проведении попусков с гидроузла в период открытой воды.

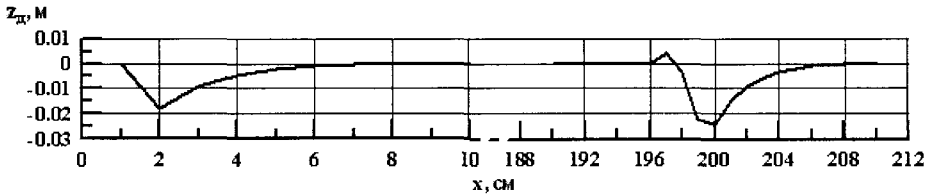


Рис. 4 Изменения отметок дна с расстоянием на начальном участке и у кромки покрытия по данным модельных расчетов

Начальный расход до попуска $4 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальный расход попуска $8 \text{ м}^3/\text{с}$. Из измерений были известны глубины потока (поперечные сечения) и пьезометрический уклон (0.0005). Коэффициенты сопротивления рассчитывались по этим параметрам исходя из предположения, что поток – стационарен.

При наблюдениях в зимний период не удалось получить условий для тестировании модели из-за отсутствия ледяного покрова. В связи с этим аналогом изменения сопротивления при достижении потоком кромки ледяного покрова послужило изменение глубины потока на небольшом участке русла.

На рис. 5 представлено изменение профиля дна после 10 часового попуска. Сплошная кривая соответствует $4 \text{ м}^3/\text{с}$, пунктирная – $8 \text{ м}^3/\text{с}$. Символами отмечены положения створов проведения измерений. На рис. 6 те же кривые, полученные по результатам численных экспериментов. Характер изменения отметок дна совпадает, отличие в величине размыва в месте локального увеличения глубины связано возможно с тем, что исследуемый участок не был прямолинейным и поперечные сечения отличались от формы, задаваемой в модели. Следует отметить, что в данном расчете размер частиц грунта был принят равным 0.0002 м , хотя в общем распределении крупности, анализ которого был проведен в ходе измерений, их вклад был не определяющим, что так же, как и применение одномерной схемы повлияло на оценку абсолютных размывов в сторону увеличения.

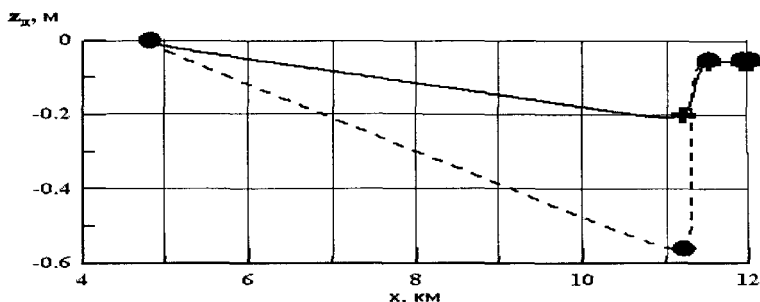


Рис. 5 Изменение профиля дна после 10 часового пускa в нижнем бьефе гидроэлектростанции Истринского гидроузла

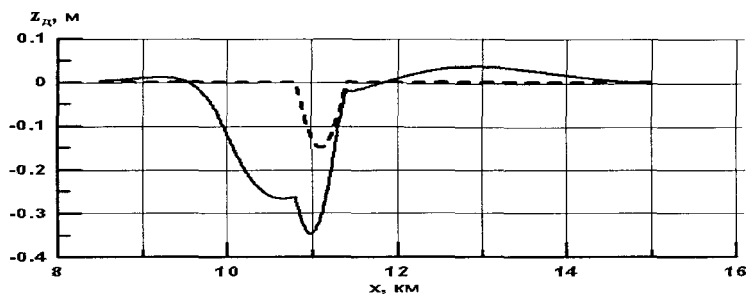


Рис. 6 Изменение профиля дна после 10 часового пускa (модельный расчет)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящего исследования сводятся к следующему:

1. Впервые разработана численная модель деформаций дна в условиях нестационарности в открытых, подледных и частично покрытых льдом потоках, а также в условиях возникновения ледовых заторов, возникающих под воздействием волны пускa. Модель позволяет одновременно рассчитывать динамику волны пускa, место и время возникновения возможных ледовых заторов, деформации дна.

2. Проведенные лабораторные эксперименты и натурные наблюдения позволили протестировать модель и подтвердили важный практический результат: наряду с возникновением размывов в створе гидроузла значительные размывы возникают и под кромкой ледяного покрова, и их величина в зависимости от входных параметров может превышать приплотинные.
3. Проведенные анализ и оценка методов расчета расхода наносов, приемлемых для моделирования существенно нестационарных потоков в условиях, формирующихся во время образования заторов, при которых возникают разнонаправленные потоки, позволил сделать важный вывод о том, что результат расчета деформаций дна для открытых потоков мало зависит от вида зависимости, используемой для расчета расхода наносов, в случае подледного потока расхождение становится больше, а в случае образования затора наблюдается существенное различие как в величинах деформаций, так и в расходах наносов.
4. Установлено, что отношение величины текущего размыва дна к величине максимального размыва в момент окончания попуска в створе гидроузла от времени одна и та же, независимо от влияния параметров.
5. На основе результатов математического моделирования впервые получены зависимости деформаций дна в нижних бьефах гидроузлов в условиях ледовых затруднений от гидродинамических параметров потока, характеристик волны возмущения, ледяного покрова и грунта, слагающего ложе русла. Параметризация зависимостей позволяет использовать их для практической оценки величин деформаций в приплотинных створах. Расчеты по предложенной модели и экспериментальные данные показали, что общий расход наносов в подледном потоке уменьшается при переходе к подледному режиму. В то же время доля донных наносов в общем расходе наносов увеличивается, а взвешенных уменьшается.

6. Впервые показано, что наличие донных русловых форм (гряд) в подледном потоке повышает вероятность формирования заторных явлений по сравнению с «гладким» дном. Это позволяет дать рекомендации по смягчению заторных явлений первоначальным попуском в нижний бьеф гидроузла с целью обеспечения «гладкого» режима транспорта наносов.
7. Направление дальнейших исследований видится в разработке двух- и трехмерных моделей взаимодействия неустановившегося течения с ледяным покровом в условиях деформируемого русла.

Список литературы составлен в алфавитном порядке, в ссылках указан номер работы в списке. Нумерация рисунков и формул подглавная (первая цифра определяет номер главы, вторая – номер ссылки).

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Дебольская Е.И. Оценка катастрофических последствий наводнений на основе математического моделирования [Текст] / Е.И. Дебольская, М.В. Дербенев, М.В. Исупова, И.С. Кузнецов, О.Я. Масликова // Труды международной научной конференции «Экстремальные гидрологические события: теория, моделирование, прогноз». – Москва, 2003. – С. 161-164.
2. Дебольская Е.И. Численное моделирование ледовых заторов [Текст] / Е.И. Дебольская, М.В. Дербенев, О.Я. Масликова // Водные ресурсы. – 2004, – №5, Т. 31. – С. 533-539.
3. Дебольская Е.И. Математическое моделирование динамики русла в покрытых льдом нестационарных потоках [Текст] / Е.И. Дебольская, О.Я. Масликова, Н.Н. Степанова // Труды VI Гидрологического съезда. – С.-Петербург, 2004. – Секция 5. – С. 49-50
4. Дебольская Е.И. Прогнозирование последствий русловых деформаций, вызываемых катастрофическими зимними наводнениями [Текст] / Е.И. Дебольская, О.Я. Масликова // Сборник материалов IV Научно-практической конференции МЧС России «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». – Москва, 2004. – С.49-50
5. Дебольская Е.И. Математическое моделирование динамики русла в покрытых льдом нестационарных потоках [Текст] / Е.И. Дебольская, О.Я. Масликова, Н.Н. Степанова // VI Конференция «Динамика и

- термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». – Москва, 2004. – С. 135-136
6. *Масликова О.Я.* Применение системы конечноэлементных расчетов «FEMLAB» к задачам речной гидродинамики [Текст] / О.Я.Масликова // Тезисы докладов на VI Конференцию «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». – Москва, 2004. – С. 68-69
 7. *Масликова О.Я.* Применение системы конечноэлементных расчетов FEMLAB к созданию математической модели процесса переформирования дна под воздействием нестационарного подледного потока в руслах [Текст] / О.Я.Масликова // Труды Всероссийской научной конференции «Новые и традиционные идеи в геоморфологии». – МГУ, 2005.
 8. *Дебольская Е.И.* Математическое моделирование деформаций дна в покрытых льдом нестационарных потоках [Текст] / Е.И. Дебольская, В.К. Дебольский, О.Я. Масликова // Водные ресурсы. – 2006. – № 1, Т. 33. – С. 29-38
 9. *Debol'skaya E.I.* Mathematical modeling of bed deformations in ice-covered non-steady Proceedings [Text] / E.I. Debolskaya., V.K. Debolsky, O.Ya. Maslikova // 18th IAHR Ice Symposium. – Sapporo, Japan, 2006.
 10. *Дебольская Е.И.* Математическое моделирование распространения загрязнений и деформаций дна в подледных потоках [Текст] / Е.И. Дебольская, В.К. Дебольский, М.В. Дербенев, О.Я. Масликова, А.В.Ермаков // Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных регионов». – Салехард, 2007.
 11. *Debol'skaya E.I.* Mathematical Modelling of Bed Deformation in Ice-Covered Non-Steady-State Flows [Text] / E.I. Debolskaja, O.Ya. Maslikova // X Int. Symposium on River Sedimentation. «Effects of River Sediments and Channel Processes on Social, Economic and Environmental Safety». – Moscow, 2007. – vol. II. – P. 84-91
 12. *Дебольская Е.И.* Влияние ледяного покрова на динамику руслового потока [Текст] / Е.И. Дебольская, О.Я. Масликова, А.В. Ермаков // Труды Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». – Архангельск, 2007. – С. 12-13
 13. *Дебольская Е.И.* Влияние ледяного покрова на динамику руслового потока [Текст] / Е.И. Дебольская, О.Я. Масликова, А.В. Ермаков // Труды научной конференции «Россия в МПГ – первые результаты». – Сочи, 2007. – С. 44
 14. *Масликова О.Я.* Математическое моделирование деформаций дна в неустановившихся подледных потоках [Текст] / О. Я. Масликова, Е. И. Дебольская // Научная сессия «Географические и экологические аспекты гидрологии». – Спб. Г.У., 2008. – С. 65

15. *Дебольская Е.И.* Влияние ледяного покрова на деформации дна в нижних бьефах [Текст] / Е.И. Дебольская, В.К. Дебольский, О.Я. Масликова, А.В. Ермаков // Водные ресурсы. – 2008. – № 6, Т. 35. – С. 663-670
16. *Дебольская Е.И.* Влияние ледового покрова на русловые и береговые процессы в нижнем бьефе гидроузлов, модель динамики русла под ледяным покровом [Текст] / Е.И. Дебольская, А. В. Котляков, О.Я. Масликова, С.А. Артемьев // Материалы гляциологических исследований. – В печати.
17. *Дебольская Е.И.* Двухмерная модель русловых деформаций в условиях формирования ледовых заторов [Текст] / Е.И. Дебольская, В.К. Дебольский, О.Я. Масликова // Гидротехническое строительство. – В печати.
18. *Дебольская Е.И.* Одномерная и двухмерная модели динамики русла в нижних бьефах ГТС в условиях формирования ледовых заторов [Текст] / Е.И. Дебольская, А. В. Котляков, О.Я. Масликова, С.А. Артемьев // Материалы гляциологических исследований. – В печати.
19. *Дебольская Е.И.* Двухмерная модель русловых деформаций в условиях формирования ледовых заторов [Текст] / Е.И. Дебольская, А. В. Котляков, О.Я. Масликова, С.А. Артемьев // Научная конференция «Вклад России в МПГ». – Сочи, 2008. – С. 32

Московский государственный университет

Природообустройства (МГУП)

Зак. № 226 Тираж 100