

тогда как для района Камы и Нижней Волги коэффициент вариации повышается и достигает 0,32 (частный водосбор Волгоградского водохранилища).

Выводы

Происходящие в последнее время глобальные изменения климата проявились в Волжском бассейне. Так, начиная с 1980-х годов наблюдается постепенное увеличение стока реки Волги, что наиболее заметно проявляется в период межени (лето – осень – зима).

Характерной чертой является большая изменчивость режима увлажнения, во многом обусловленная особенностями атмосферной циркуляции отдельных лет.

Для бассейна реки Волги существенное значение имеет изменение бассейновых влагозапасов, причем наблюдается следующая закономерность в динамике изменения бассейновых влагозапасов: во всех 11 частных водосборах в период весеннего половодья происходит в основном процесс накопления (в диапазоне от 80 до 105 мм), а в период межени – процесс сработки накопившихся во время половодья влагозапасов. При этом максимальный уровень сработки бассейновых влагозапасов приходится на конец марта – начало апреля.

1. Исмаилов Г. Х., Федоров В. М.

Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна реки Волги // Водные ресурсы. – 2008. – Т. 35. – № 3. – С. 259–276.

2. Исмаилов Г. Х., Муращенкова Н. В. Пространственно-временные закономерности изменчивости и взаимосвязи ЭВБ половодья и межени в бассейне реки Волги в XX веке: Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока: Труды Всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающегося ученого-гидролога, профессора А. В. Рождественского. – М.: РосНИИВХ, 2012. – С. 354–363.

3. Гидрометеорологические условия Волжского региона и современные изменения климата / О. А. Анисимов [и др.] // Метеорология и гидрология. – № 5. – 2011. – С. 33–42.

Материал поступил в редакцию 28.04.12.

Исмаилов Габил Худуш оглы, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Гидрология, метеорология и регулирование стока»

Тел. 8 (499) 976-23-68

E-mail: gabil-1937@mail.ru

Муращенкова Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент

Тел. 8 (499) 976-17-45

E-mail: splain75@mail.ru

УДК 502/504:551.311.2:551.33

О. Я. МАСЛИКОВА

Институт водных проблем РАН

ЗИМНИЕ НАВОДНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ, ВЫЗВАННЫЕ ЛЕДОВЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ НА РЕКАХ

Представлены результаты исследования влияния волн возмущения в нижних бьефах гидротехнических сооружений на деформации дна и берегов, в том числе и в условиях катастрофических наводнений, вызванных воздействием волн пусков или прорыва плотин и образованием ледовых заторов. Особое внимание уделено исследованию параметров, характеризующих вечномерзлые грунты.

Русловой поток, нижние бьефы, волны пусков, лед, заторы, вечномерзлые грунты, математические модели, лабораторное моделирование.

There are given investigation results of the disturbance waves influence downstream of hydraulic works on bottom and banks deformation including under the conditions of catastrophic floods caused by the impact of release waves or dams breakage and ice jams formation. A special attention is given to the investigation of parameters which characterize permanently frozen soils.

Channel flow, downstream, waves of releases, ice, jams, permanently frozen soil, mathematical models, laboratory simulation.

Анализ результатов математического и лабораторного моделирования показал, что русловые деформации рек, протекающих в криолитозоне, значительно отличаются от деформаций русел, сложенных грунтами, не подверженными влиянию фазового перехода «вода – лед», и могут наблюдаться даже при неразмывающих скоростях водного потока. Разработанная модель основана на применении основных уравнений гидродинамики и характеристик многолетнемерзлых пород. Метод исследований – математическое моделирование и лабораторные эксперименты.

Актуальность данной темы обусловлена прежде всего тем, что расположение в зоне многолетнемерзлых пород (ММП) является серьезным фактором риска повреждения плотин и деформаций берегов водохранилищ. Основная причина повреждений – недоучет криогенных процессов в теле плотин, их основаниях и в районах примыкания, связанных с изменениями под влиянием гидроузлов условий теплообмена, температурного режима, физико-технических свойств мерзлых пород, приводящих к развитию термокарста, термоэрозии, наледообразованиям.

Воздействие гидротехнических сооружений на русла в криолитозоне – проблема, для разрешения которой необходимо не только проведение изыскательских работ, но и привлечение современных возможностей математического моделирования. В каждом конкретном случае, в соответствии с особенностями мерзлотно-геологических, геоморфологических и гидрологических условий, проявляются те или иные реакции речной системы на гидротехнические сооружения. Главные из них – это русловые деформации на участке нижнего бьефа, изменения термического, ледового и паводкового режимов, а также изменения естественного хода уровня водной поверхности и твердого расхода в различных временных масштабах (суточном, сезонном, многолетнем). Систематические натурные исследования с получением кондиционного фактического материала по этой проблематике в криолитозоне практически не проводились [1]. Трудности с прогнозированием деформаций русел, сложенных ММП, связаны с невозможностью проведения натуральных наблюдений в период развития наводнений. Исследование этого сложного и многофакторного

процесса может быть выполнено с достаточной степенью адекватности лишь с помощью математического моделирования.

Математическая модель русловых деформаций в нижних бьефах гидроэлектростанций, расположенных в криолитозоне, при катастрофических наводнениях в условиях ледовых затруднений. В нижних бьефах гидроузлов в зимний период при наличии ледяного покрова в условиях резкой нестационарности потока изменение рельефа дна может значительно отличаться от летней ситуации. Для исследования этого явления разработана двухмерная продольно-поперечная модель деформаций русел в условиях ледовых затруднений на широких реках с криволинейными участками с учетом прохождения паводочных и попусковых волн и возможности формирования ледовых заторов [2].

Основные уравнения, граничные условия, критерии разрушения ледового покрова, условия подныривания льдин под кромку сплошного ледяного покрова, условия в месте образования затора и алгоритм расчета двумерной модели заторообразования были описаны в работе [3]. Проведенные ранее лабораторные эксперименты показали, что при повышении температуры воды и воздуха изменения в структуре лабораторного аналога многолетнемерзлого грунта вызывают деформации русла даже без волнового воздействия, т. е. при стационарном режиме течения и неразмывающих скоростях водного потока [4]. В связи с этим возникла необходимость усовершенствования разработанной ранее модели деформаций русла с целью учета долгопериодных изменений структуры грунта при повышении температуры воды [5].

Анализ лабораторных экспериментов привел к необходимости учитывать термическую составляющую процесса, поскольку даже при стационарном режиме течения с неразмывающими скоростями в береговом склоне за счет таяния ледяных пластов возникают полости, приводящие к изменениям в скоростном режиме. Мерзлый грунт моделировался помещением в тело откоса нескольких пластин льда, что давало возможность рассчитать льдистость получившегося материала как отношение массы льда к массе всего материала.

При повышении температуры воды в основном потоке ледяные пластины начинают таять, образуя полости,

в которых формируются малые потоки, неоднородные по сечению и длине полости. Неоднородность потоков в полостях вызывает деформации стенок, размывая их. Кроме того, слои грунта, теряющие твердую основу в виде льда, расположенные между и над ледяными пластинами, начинают оседать под действием силы тяжести. Процессы солифлюкции и суффозии активизируются.

Основанием для моделирования таяния ледяных пластин служит предположение, что фазовый переход происходит при одной определенной температуре. В каждой фазе распределение температуры описывается уравнением теплопроводности. Закон перемещения границы фазового перехода – условие Стефана – определяется из уравнения теплового баланса и может быть записано так:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} = L\rho \frac{\partial \xi}{\partial t}, \quad (1)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности льда и воды соответственно; L – скрытая теплота таяния льда; ρ – плотность льда; ξ – координата границы раздела фаз; T – температура; t – время.

При перемещении границы раздела в процессе таяния ледяной пластины ширина русла в месте расположения пластины увеличивается на величину ξ .

Для определения продольных скоростей u , исходя из равномерности потока и постоянства расхода, в приближении «мелкой воды» и выполнения градиентно-вязкого режима можно записать:

$$A \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \rho_w g i, \quad (2)$$

где A – вертикальный коэффициент турбулентного обмена; ρ_w – плотность воды; i – гидравлический уклон; z – вертикальная координата.

Дважды интегрируя (2) по z и пользуясь граничным условием равенства скоростей нулю на твердых поверхностях, получим выражение для определения продольной скорости:

$$u = \frac{\rho g i}{A} (H z' - z^2/2), \quad (3)$$

где $z' = z - z_b$; z_b – отметка дна; $H = \zeta - z_b$ – глубина потока; ζ – отметка поверхности воды.

Поскольку из эксперимента известен только расход воды, необходимо найти среднюю скорость \bar{u} . Интегрируя выражение (3) еще раз по вертикали и разделив на глубину, получим:

$$\bar{u} = \frac{\rho g i H^2}{3A}, \text{ откуда } A = \frac{\rho g i H^2}{3\bar{u}}. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в (3), можно записать продольную скорость открытого потока:

$$u = \frac{3\bar{u}}{H^2} (H z' - z^2/2) \quad (5)$$

Глубина, зависящая от отметки дна, изменяющейся во времени и в пространстве, не является постоянной величиной. Деформация берегового склона при оттаивании определяется в первую очередь оседанием породы под действием силы тяжести. При достаточной рыхлости породы определенную роль может играть и размыв, вызываемый течением воды как в основном русле, так и в образовавшихся полостях.

Поперечный размер сползания вышележащего над образовавшейся в процессе таяния ледяной пластины полостью, заполненной водой, можно описать уравнением следующего вида [6]:

$$\xi = \beta \frac{y^2}{h}, \quad (6)$$

где y – поперечный размер протаявшей области, упругости; h – толщина слоя грунта над полостью.

Величину β можно подобрать, проведя численные расчеты по модели. Для нашего случая значение $\beta = 0,00007$ дало наиболее близкий результат.

Метод и алгоритм решения. При решении поставленной задачи был применен алгоритм, используемый в задаче моделирования заторов (подробно описан в работе [3]). При решении задачи варьировались следующие параметры: наклон береговых откосов русла и поймы; интенсивность попуска с гидроузла; толщина ледяного покрова; положение кромки льда относительно гидроузла (длина полыньи); пористость грунта, обратная связанная с льдистостью породы, задаваемая в модели различной геометрией входящих в нее ледяных пластин.

Результаты моделирования. Для оценки влияния перечисленных параметров рассчитывались сценарии со всеми одинаковыми параметрами, кроме оцениваемого, и рассматривалось изменение ширины русла – характеристики наводнения и деформаций дна и русла, площади и объема размыва в каждом створе – характеристик деформаций.

Численные эксперименты показали, что при учете размыва значительную роль играют коэффициенты шероховатости внутри протаявших областей.

На рис. 1а приведены рельефы, полученные по данным расчетов при задании коэффициентов шероховатости в протаявших полостях, в 2 раза превышающих коэффициенты шероховатости в русле.

На рис. 1б представлена фотография склона после проведения лабораторного эксперимента при тех же параметрах, что и в численном эксперименте. Оценки изменения наклона берега, полученные в лабораторном и численном эксперименте, совпадают с достаточной степенью точности. Полученная модель введена в систему, описанную в [2, 3].

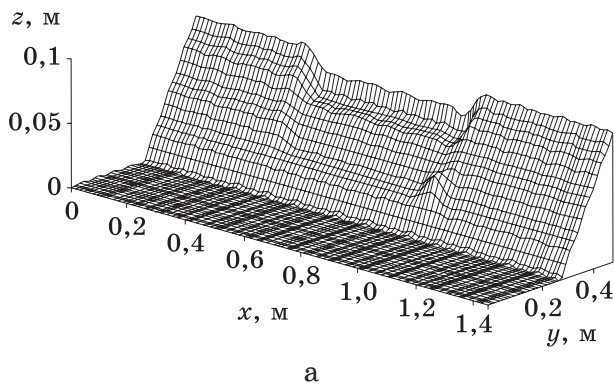


Рис. 1. Рельефы склона: а – при численном моделировании; б – при лабораторном эксперименте с одинаковыми входными параметрами

Получены результаты численных экспериментов для предполагаемых натуральных условий, рассчитанные по модели, – поперечные сечения потоков через 100 мин после начала попусков различной продолжительности. Длина приплатинной полыньи 4 км. Толщина льда 1 м. Коэффициент пористости $\epsilon = 0,5$, длина расчетного участка 45 км, $\Delta x = 1$ км. Число расчетных точек по ширине $m = 35$.

Через 25 мин после начала попуска образуются затор с неполным перекрытием русла. Ширина русла в месте затора 11 м. В створах ниже затора деформаций и изменения ширины русла не происходит. До середины участка между плотиной и местом образования затора происходит интенсивный размыв, на второй половине – аккумуляция. С течением времени объемы деформаций стремятся к нулю. Баланс объемов деформаций – отрицательный.

Рисунок 2 демонстрирует поперечные сечения потоков через 100 мин после начала попусков различной продолжительности на расстоянии 1 км от створа плотины и первоначальное поперечное сечение. В расположенном ближе створе наблюдаются размывы дна и берегов, интенсивность деформаций пропорциональна продолжительности попуска. Модельные эксперименты показали, что на расстоянии 2 км наблюдается аккумуляция наносов на дне во всех трех случаях и интенсивный размыв берегов при $T = 50$ и 75 мин.

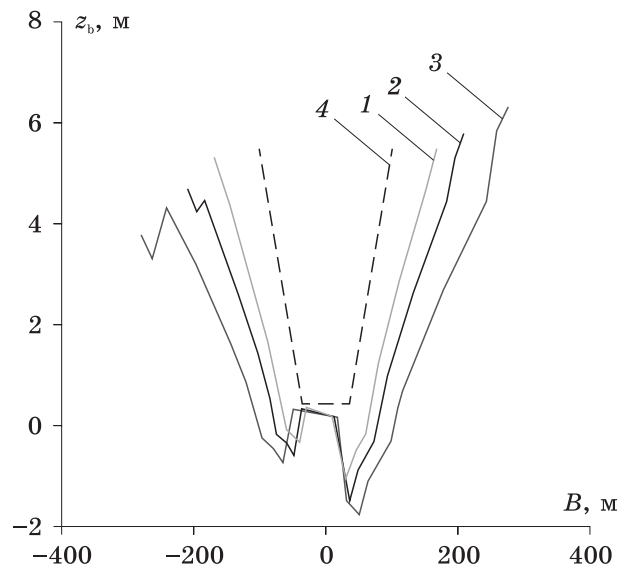


Рис. 2. Поперечные сечения потоков через 100 мин после начала попусков различной продолжительности на расстоянии 1 км от створа плотины: $L = 1$ км; 1 – $T = 25$ мин; 2 – $T = 50$ мин; 3 – $T = 75$ мин. Первоначальное поперечное сечение $L = 0$ км

Влияние пористости грунта. При постановке задачи основным параметром, характеризующим степень замерзания грунта, рассматривалась его пористость. Для того чтобы проследить влияние мерзлоты на характеристики наводнения и

деформации русла, были проведены численные эксперименты с различными пористостями. Для мерзлых грунтов характерны пористости 0,1...0,3.

Численные эксперименты показали, что изменение пористости мало влияет на ширину разлива при наводнении, но от нее значительно зависят вертикальные деформации русла. Деформационные изменения русла зависят от расстояния до плотины (показаны для различных значений пористости на рис. 3).

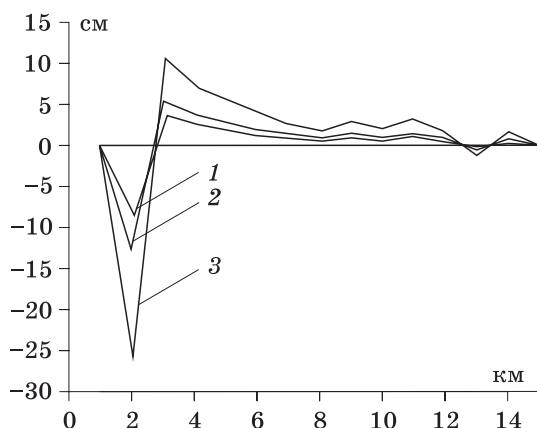


Рис. 3. Изменения вертикальных деформаций русла для различных значений пористости (в зависимости от расстояния плотины): e – коэффициент пористости: 1 – 0,1; 2 – 0,3; 3 – 0,7

На рис. 4 приведены величины площадей размыва в створе (1 км от плотины) в зависимости от времени для грунтов различной пористости.

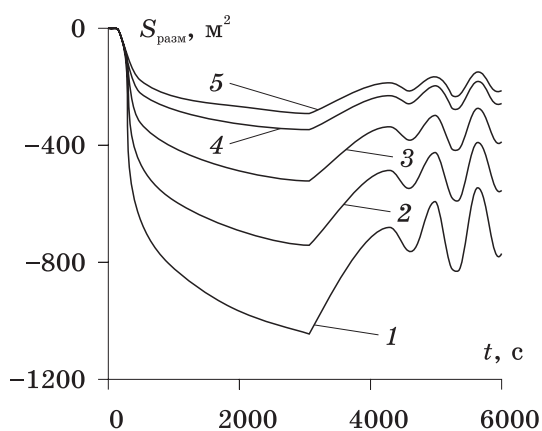


Рис. 4. Изменение площадей размыва в створе в зависимости от времени для грунтов различной пористости (1 км от плотины): $L = 1$ км; 1 – $e = 0,75$; 2 – $e = 0,65$; 3 – $e = 0,5$; 4 – $e = 0,25$; 5 – $e = 0,1$

Выводы

Повышение температуры воды и воздуха приводит к изменениям русловых деформаций за счет таяния мерзлых грунтов и пластов льда, включенных в грунт. Деформации таких русел в отличие от русел, сложенных грунтами, неподверженными влиянию фазового перехода «вода – лед», наблюдаются даже при неразмывающих скоростях потоков. Это подтверждают результаты лабораторных исследований и численных экспериментов, проведенных с помощью разработанной математической модели воздействия речного потока на деформации береговых склонов, сложенных вечномерзлыми породами с включением пластов льда.

Анализ численных экспериментов показал, что в зоне многолетнемерзлых пород основным фактором, формирующим горизонтальный размыв берегов, является гидрограф попуска. Вертикальная амплитуда изменений рельефа дна, определяющая размыв и аккумуляцию, в большей степени зависит от пористости грунта, слагающего ложе реки. Аномальное развитие русловых деформаций на участке нижнего бьефа при зарегулировании стока, связанное в основном с изменениями в гидродинамическом режиме реки, в условиях вечной мерзлоты приводит к уменьшению эрозионной составляющей процессов переформирования русла и берегов.

Сопоставление экспериментальных данных, полученных в процессе лабораторных исследований, с результатами математического моделирования позволило уточнить числовые значения параметров модели и области ее применения.

Воздействие потоков, обусловленных наводнениями и ледовыми явлениями, может приводить к еще более значительным изменениям в русловых деформациях. Для оценки этих деформаций необходимо найти решение нестационарной задачи транспорта наносов и динамики водного потока.

1. Разумов С. О. Проблемы гидротехнического строительства в криолитозоне: отчет о результатах научных исследований. – Якутск: Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова СО РАН, 2009. – 30 с.

2. Дебольская Е. И., Дебольский В. К.,

Масликова О. Я. Двухмерная модель русловых деформаций в условиях формирования ледовых заторов // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 5. – С. 41–45.

3. Дебольская Е. И., Масликова О. Я., Исаенков А. Ю. Математическое моделирование деформаций русла в нижних бьефах ГЭС, расположенных в криолитозоне, при катастрофических наводнениях // Природообустройство. – 2010. – № 3. – С. 51–58.

4. Котляков А. В., Грицук И. И., Масликова О. Я., Пономарёв Н. К. Экспериментальное исследование влияния льдистости грунтов, слагающих русло рек, на динамику берегового склона // Лёд и Снег. – № 2. – 2011. – С. 92–98.

5. Дебольская Е. И., Дебольский В. К., Масликова О. Я. Математическое моделирование деформаций дна в покрытых льдом нестационарных потоках // Водные ресурсы. – 2006. – Т. 33. – № 1. – С. 29–38.

6. Герсеванов М. Н., Польшин Д. Е. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения. – М.: Госиздат по строительству и архитектуре, 1948. – 486 с.

Материал поступил в редакцию 24.01.13.

Масликова Оксана Яковлевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Тел. 8 (499) 135-72-01

E-mail: oksana68@mail.ru

УДК 502/504:551.491.5

В. Ф. ЖАБИН, Н. П. КАРПЕНКО, И. М. ЛОМАКИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ РАСЧЕТНАЯ СХЕМАТИЗАЦИЯ ТОНКОСЛОИСТЫХ СРЕД И НАДЕЖНОСТЬ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ

Рассмотрены основные типы осадочных пород, сформированных при выпадении частиц из взвесенесущего потока. Изучены структурные и текстурные особенности этих отложений, которые позволяют отнести их к фильтрационно-анизотропным средам с характеристиками, определенными по результатам опытно-фильтрационных работ и опытно-фильтрационным наблюдениям. Анализируются ошибки схематизации при произвольной замене анизотропной среды на фильтрационно-однородную в прогнозных оценках эффективности дренажа и безопасной эксплуатации подпорных сооружений. Даются обоснованные рекомендации по планированию опытно-фильтрационных испытаний анизотропных отложений.

Схематизация, осадочные анизотропные отложения, фильтрационная неоднородность, анизотропия, дренаж, подпорные сооружения, инженерные решения.

There are considered main types of the sedimentary rocks formed when particles falling out from a suspensions carrying flow. Structural and textural peculiarities of these sediments are studied which makes it possible to attribute them to the filtration-anisotropic media with the characteristics determined according to the results of experimental-filtration works and experimental-filtration observations. Schematization mistakes are analyzed during the unconditioned replacement of the anisotropic medium into a filtration-homogeneous one in forecast assessments of the drainage efficiency and safe operation of retaining works. There are given sound recommendations on planning experimental-filtration tests of anisotropic sediments.

Schematization, anisotropic sediments, filtration heterogeneity, anisotropy, drainage, retaining works, engineering decisions.