

УДК 502/504:627.83

Е. И. ДЕБОЛЬСКАЯ, О. Я. МАСЛИКОВА, А. Ю. ИСАЕНКОВ

Институт водных проблем РАН

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ РУСЛА В НИЖНИХ БЬЕФАХ ГЭС, РАСПОЛОЖЕННЫХ В КРИОЛИТОЗОНЕ, ПРИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ НАВОДНЕНИЯХ

*Рассматривается задача моделирования деформаций русла при катастрофических наводнениях, вызванных волнами попусков или прорыва плотин и формированием ледовых заторов в нижних бьефах гидротехнических сооружений в условиях вечной мерзлоты. Цель работы – выявление влияния вечной мерзлоты на деформации русел в нижнем бьефе гидротехнических сооружений. Метод исследований – математическое моделирование.*

*Русловой поток, нижние бьефы, волны попусков, разрушение плотин, наводнения, лед, заторы, вечномерзлые грунты, математические модели, численные методы.*

*There is considered a problem of channel deformation modeling during the catastrophic floods caused by waves of releases or dams break and formation of ice jam downstream hydraulic structures under the conditions of permafrost. The purpose of the work is identification of the permafrost influence on the deformation of the channel downstream hydraulic structures. The research method is mathematical modeling.*

*Channel flow, downstream (lower pools), waves of releases, break of dams, flooding, ice, jams, permafrost soils, mathematical models, numerical computing.*

Разработанная модель основана на применении основных уравнений гидродинамики и данных о зависимостях пористости грунта от характеристик вечной мерзлоты. Актуальность данной разработки обусловлена прежде всего тем, что масштабные объекты гидроэнергетики в России находятся в районах Сибири и Дальнего Востока, расположенных в зоне вечной мерзлоты. Расположение в зоне многолетнемерзлых пород (ММП) является серьезным фактором риска повреждения плотин и их водохранилищ. Почти половина всех аварий на гидростанциях (48 %) происходит именно в таких регионах.

Аномальное развитие русловых деформаций на участке нижнего бьефа в криолитозоне при зарегулировании стока связано в основном с изменениями в гидродинамическом режиме рек. При этом эрозионная составляющая процессов переформирования русла и берегов уменьшается, а интенсивность аккумулятивных процессов вдоль

берегов с формированием современных многолетнемерзлых пород и развитием русловой аккумуляции наносов возрастает, что может вызывать изменения суточных фарватеров. Русловые деформации, связанные с развитием катастрофических наводнений, вызванных экстренными попусками или прорывом плотин, а также с формированием ледовых заторов в нижних бьефах ГЭС, расположенных в криолитозоне, практически не изучены. Трудности с их прогнозированием связаны с невозможностью проведения натурных наблюдений в период развития наводнений и сложностью подбора критериев подобия для всех входящих параметров при лабораторном моделировании. Исследование такого сложного и многофакторного процесса может быть выполнено с достаточной степенью адекватности лишь с помощью математического моделирования.

Грунты всех видов относятся к мерзлым грунтам, если они имеют

отрицательную температуру и содержат в своем составе лед. Грунты называют вечномерзлыми, если в условиях залегаания они находятся в мерзлом состоянии непрерывно (без оттаивания) в течение многих (трех и более) лет.

Мерзлые породы представляют собой поликомпонентные многофазные системы, отличающиеся от пород немерзлых своим составом (наличием льда) и строением (криогенной текстурой).

Лед в мерзлых породах служит породообразующим минералом и цементом, связывающим минеральные частицы и увеличивающим прочность породы.

Мерзлые и вечномерзлые грунты из-за наличия в них льдоцементных связей при отрицательной температуре являются очень прочными и малодеформируемыми природными образованиями. Однако при повышении или понижении температуры (даже в области отрицательных температур) за счет оттаивания льда или замерзания части поровой воды их свойства могут изменяться. При оттаивании порового льда структурные льдоцементные связи лавинно разрушаются и возникают значительные деформации. Плотность мерзлой породы в большей степени зависит от льдистости породы. Зная плотность мерзлой породы и плотность ее скелета, можно определить коэффициент пористости и пористость мерзлой породы.

В основу предлагаемой модели положена двумерная модель заторообразования, разработанная авторами ранее, дополненная условием подвижного дна и двумерными уравнениями деформаций или транспорта наносов (уравнениями сохранения массы для всех переносимых наносов).

Под действием волны возмущения (в рассматриваемом случае это волна попуска с гидротехнического сооружения), которая сама по себе служит причиной наводнения, создаются, кроме того, условия для образования ледовых заторов. Развитие заторов, в свою очередь, либо приводит к увеличению интенсивности затопления, вызванного

волной возмущения, либо после прекращения действия волны попуска является единственной причиной продолжения затопления. Решение задачи о деформациях дна и берегов в таких условиях зависит не только от параметров водного объекта, попуска, характеристик наносов и сочетаний этих параметров, но также от времени и места возникновения затора, его продолжительности.

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 [1].

Для краткости приведем только основные уравнения этих моделей. Двумерные уравнения жидкости и уравнение неразрывности, получаемые при интегрировании основных трехмерных уравнений по глубине потока при наличии льда и в отсутствие ветра, использовались в следующем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left( \frac{\tau_{yx} - \tau_{xy}}{\rho h} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left( \frac{\tau_{xy} - \tau_{yx}}{\rho h} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

где  $x, y$  – декартовы координаты; причем положительная ось  $x$  направлена по потоку, а ось  $y$  поперек;  $u, v$  – среднестатистические по глубине потока продольная и поперечная компоненты скорости воды соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H = h + h_0$  – уровень или отметка поверхности воды;  $h_0$  – отметка дна;  $h$  – глубина потока;  $\tau_{dx, lx}$  и  $\tau_{dy, ly}$  – компоненты касательного напряжения на дне и поверхности льда соответственно;  $A_x$  и  $A_y$  – продольный и поперечный коэффициенты турбулентной вязкости соответственно.

Для определения коэффициентов турбулентной вязкости использовалось соотношение  $A_x = g_x h u$ ,  $A_y = g_y h v$ , где  $\gamma_{x,y}$  – эмпирические константы,

полученные в работе [2] для открытых потоков  $\gamma_x = 0,06$ ;  $\gamma_y = 0,024$ .

Связь между касательными напряжениями на твердых поверхностях  $\tau_{dx, lx}$ ,  $\tau_{dy, ly}$  и остальными характеристиками потока задается следующими соотношениями:

$$\tau_{di} - \tau_{li} = \frac{\rho \lambda U_i |\vec{U}|}{2}; \quad (4)$$

$$\lambda_{л,д} = \frac{2gn^2}{h^{1/3}}, \quad (5)$$

где  $\lambda_p, \lambda_n$  – коэффициенты гидравлического трения (донная и ледовая поверхности соответственно);  $n$  – зимний обобщенный коэффициент групповой шероховатости в формуле Маннинга;  $\vec{U}$  – вектор скорости в плане;  $U_1 = u$ ,  $U_2 = v$ ; индексы  $i = 1, 2$  соответствуют  $x$  и  $y$  координатам.

Уравнение сохранения массы переносимых наносов или уравнение деформаций в двумерной постановке использовалось, как это принято для открытых потоков [3], в следующей записи:

$$\frac{\partial}{\partial t} ((1-p)z_b) + \frac{\partial Q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{sy}}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

где  $z_b$  – отклонение поверхности дна;  $p$  – пористость донного материала;  $Q_{sx}, Q_{sy}$  – продольная и поперечная составляющие расхода наносов на единицу ширины. Для их записи использовалась наиболее простая зависимость Энгелунда, не предусматривающая деление наносов на взвешенные и донные:

$$Q_{sx} = 0,05u^2 \left( \frac{\tau_{dx}}{(\rho_s - \rho)gd} \right)^{3/2} \times \sqrt{\frac{d}{(\rho_s/\rho - 1)g}}; \quad (7)$$

$$Q_{sh} = 0,05v^2 \left( \frac{\tau_{dy}}{(\rho_s - \rho)gd} \right)^{3/2} \times \sqrt{\frac{d}{(\rho_s/\rho - 1)g}}, \quad (8)$$

где  $d$  – средний диаметр частиц;  $\rho_s$  – плотность частиц;  $\rho$  – плотность воды.

При решении поставленной задачи был применен алгоритм, используемый в задаче моделирования заторов и подробно описанный в предыдущей работе авторов [1] с добавлением расчета деформаций дна по уравнениям (6),

(7), (8), значения скоростей в которых были взяты из уравнений (1)...(3). В качестве параметров в задачу вошли значения шероховатостей в русле и на пойме, продольный уклон дна русла, форма изменяемых по длине поперечных сечений (ширина до уреза воды  $B(x, y)$  и глубины в каждой расчетной точке) в стационарном состоянии, характеристики попуска (коэффициент, характеризующий отношение высоты волны попуска к первоначальной глубине, продолжительность и время начала), толщина льда и его прочностные характеристики, длина полыньи, характеристики наносов (крупность и пористость). Количество расчетных точек как по длине, так и по ширине в процессе счета остается постоянным, но шаг счета меняется в зависимости от изменения размеров затапливаемого участка. На левой расчетной границе задается волна возмущения в виде попуска.

В связи с тем, что установившееся движение воды в русле с изменяющейся по длине формой и различными коэффициентами шероховатости на открытом и подледном участках неравномерно, возникает дополнительная проблема установления первоначального потока. В качестве начальных условий для решения существенно нестационарной задачи о распространении волны попуска [уравнения (1)...(3)] используется стационарное решение системы той же системы уравнений. Возникшую нестационарную задачу решают до тех пор, пока результаты решения на каждом шаге по времени не перестанут меняться. Время решения методом установления существенно зависит от начальных условий. В данной задаче в качестве начальных условий при решении стационарной начальной задачи использовалось одномерное аналитическое решение уравнения (1) с учетом только первого и последнего членов правой части и выражений (4) и (5). Таким образом, получено выражение для продольного компонента скорости:

$$u = \frac{i^{1/2} h^{2/3}}{n}. \quad (9)$$

Поперечный компонент равен нулю. Таким образом, сначала решается задача на установление, а результат решения этой задачи служит начальными условиями для нестационарной задачи о распространении волны попуска. После получения стационарного решения уравнений (1)...(3), соответствующего морфометрическим параметрам рассматриваемого русла, на левой границе задается «возмущение» в виде увеличения глубины (прорыва плотины или открытия створов ГТС), т. е. высота волны попуска. На твердых поверхностях (берегах) оба компонента скорости задавались нулевыми, на правой границе – условие излучения. Так как неразрушенный ледяной покров до момента выполнения условия отрыва считался примерзшим к берегам, при выполнении критерия подныривания в створе его выполнения глубина уменьшалась на величину, равную толщине льдины (одно из допущений модели – льдина имеет поперечный размер, равный первоначальному размеру ледяного поля, так как взаимодействия между отдельными льдинами не учитываются и нет причин для их последующего разрушения в поперечном направлении). Скорость заполнения русла отколовшимися льдинами может превышать скорость подъема уровня за счет действия волны попуска, и затор начинает образовываться еще во время действия попуска. В зависимости от соотношения входящих параметров задачи такой затор в дальнейшем может не развиваться до состояния полного перекрытия русла, зато ниже по течению может возникнуть затор гораздо более интенсивный, т. е. с полным перекрытием русла. Иногда образовывалась цепочка заторов. При других соотношениях параметров задачи затор образовывался после прекращения попуска, когда скорости течения еще достаточно велики для выполне-

ния условия подныривания, а общая глубина потока уже не увеличивается. Выход воды на поверхность льда не предусматривался, так как оценки показывают, что всегда сначала происходит отрыв ледяного поля от берегов, и после этого отрыва отколовшаяся льдина движется вместе с потоком жидкости. Таким образом, моделировался затор подныривания, а не торошения. При полном перекрытии русла последовательно поднырнувшими льдинами скорости в створе образования затора становятся нулевыми.

При решении был применен метод прогонки и расщепления по координатам и по физическим процессам, как описано в модели заторообразования [1]. В результате расчетов по различным сценариям можно проследить динамику распространения наводнений и деформаций русла, вызванных действием волны попуска и образованием заторов.

Для оценки влияния вышеперечисленных параметров рассчитывали сценарии со всеми одинаковыми параметрами, кроме оцениваемого, и рассматривали изменение ширины русла как характеристики наводнения и деформаций дна и русла, площади и объема размыва в каждом створе, как характеристики деформаций.

Площади и объемы размыва рассчитывались в каждом створе от левого уреза до правого в зависимости от времени.

На рис. 1 представлено трехмерное изображение русла и его плановое сечение с указанием отметок дна через 100 мин после начала попуска для сценария с начальной глубиной 5 м, шириной 200 м, с поперечным сечением в виде несимметричной трапеции. Попуск продолжительностью 50 мин был задан превышением начальной глубины в 3 раза. Длина приплотинной полыньи 4 км. Толщина льда 1 м. Коэффициент пористости  $\epsilon = 0,5$ . Длина расчетного участка 45 км. Через 25 мин после начала попуска образовался затор с неполным перекрытием русла.



Ширина русла в месте затора 11 м. В створах ниже затора деформаций и изменения ширины русла не происходило. До середины участка между плотинной и местом образования затора

наблюдался интенсивный размыв, на второй половине – аккумуляция. С течением времени объемы деформаций стремятся к нулю. Баланс объемов деформаций – отрицательный.

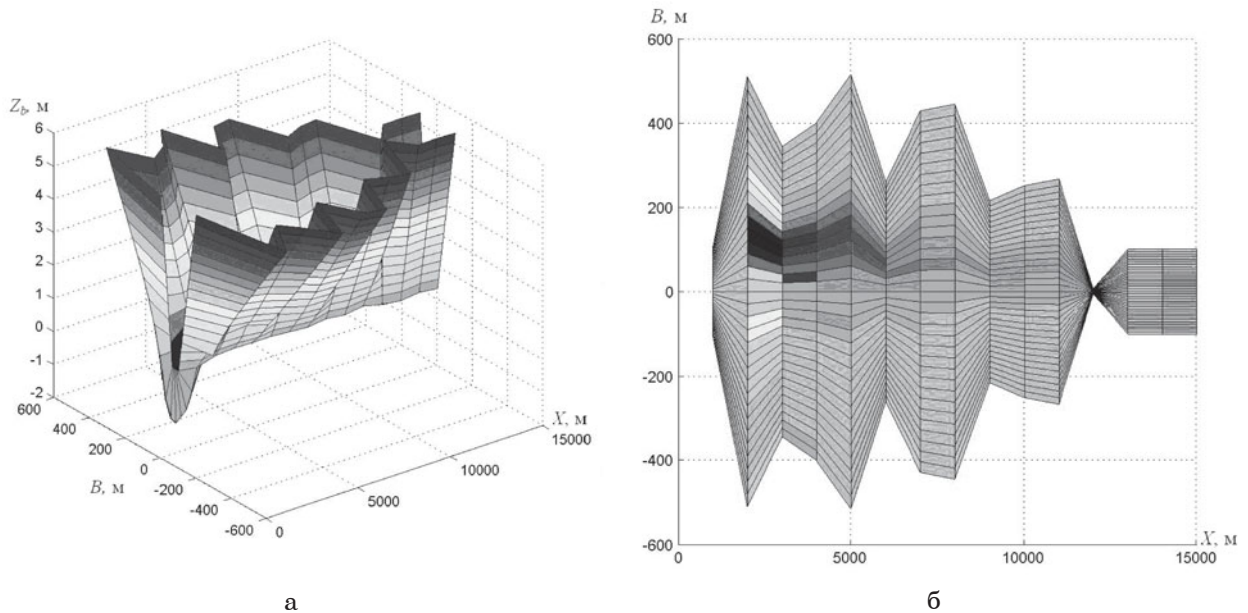


Рис. 1. Трехмерное изображение русла (а) и его плановое сечение (б) с указанием отметок дна через 100 мин после начала попуска. Исходный створ русла (створ плотины) – на переднем плане

Чтобы оценить влияние попуска, задавали попуски с разным превышением начальной глубины (в 1,5; 2; 3 раза) и различной продолжительности (25, 50, 75 мин) для сценария с поперечным сечением в виде симметричной трапеции (описанного выше).

Рис. 2 демонстрирует поперечные сечения потоков через 50 мин после окончания попусков различной интенсивности на расстоянии 1 и 2 км от створа плотины и первоначальное поперечное сечение. В створе, расположенном ближе, наблюдаются размывы дна и берегов, наиболее интенсивные переформирования берегов происходят при попуске с большей интенсивностью. На расстоянии 2 км наблюдается аккумуляция наносов на дне во всех трех случаях и интенсивный размыв берегов при попуске, в 3 раза превосходящем начальную глубину.

Для оценки влияния продолжительности попуска на характеристики наводнения и формирование заторов

продолжительность попуска варьировалась: 25, 50, 75 мин. Интенсивность попуска во всех случаях была одинаковой. Заторы образовывались во всех трех случаях в разных местах.

На рис. 3 представлены кривые изменения площадей размыва во времени для двух начальных створов (1 и 2 км от плотины) попусков различной продолжительности. Отрицательные значения площадей деформаций на первом рисунке соответствуют отрицательным отклонениям отметок дна и означают, что в течение всего времени расчета в этом створе происходил размыв. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что продолжительность попуска, так же как и его интенсивность, оказывает значительное влияние на русловые деформации.

Чтобы выявить влияние формы поперечного сечения русла на возникновение заторов и на деформации русла, были проведены расчеты сценария с поперечным сечением в виде скошенной

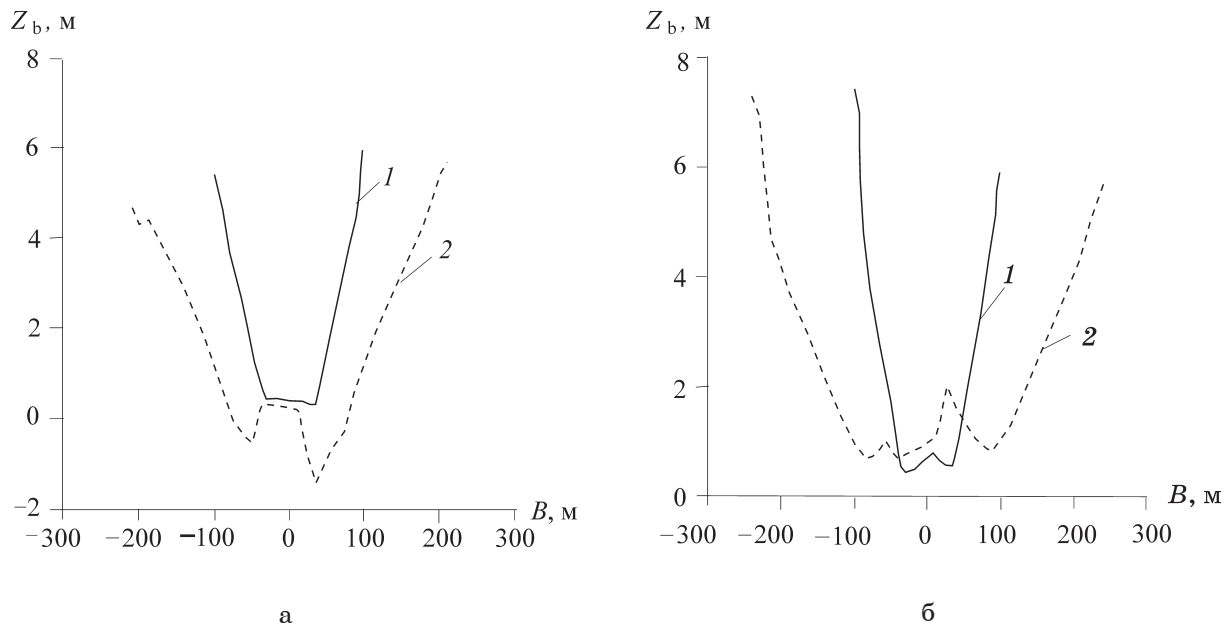


Рис. 2. Поперечные сечения потоков через 50 мин после окончания попусков различной интенсивности на расстоянии 1 (а) и 2 (б) км от створа плотины: 1 – при  $k_{пор} = 2$ ; 2 – при  $k_{пор} = 3$

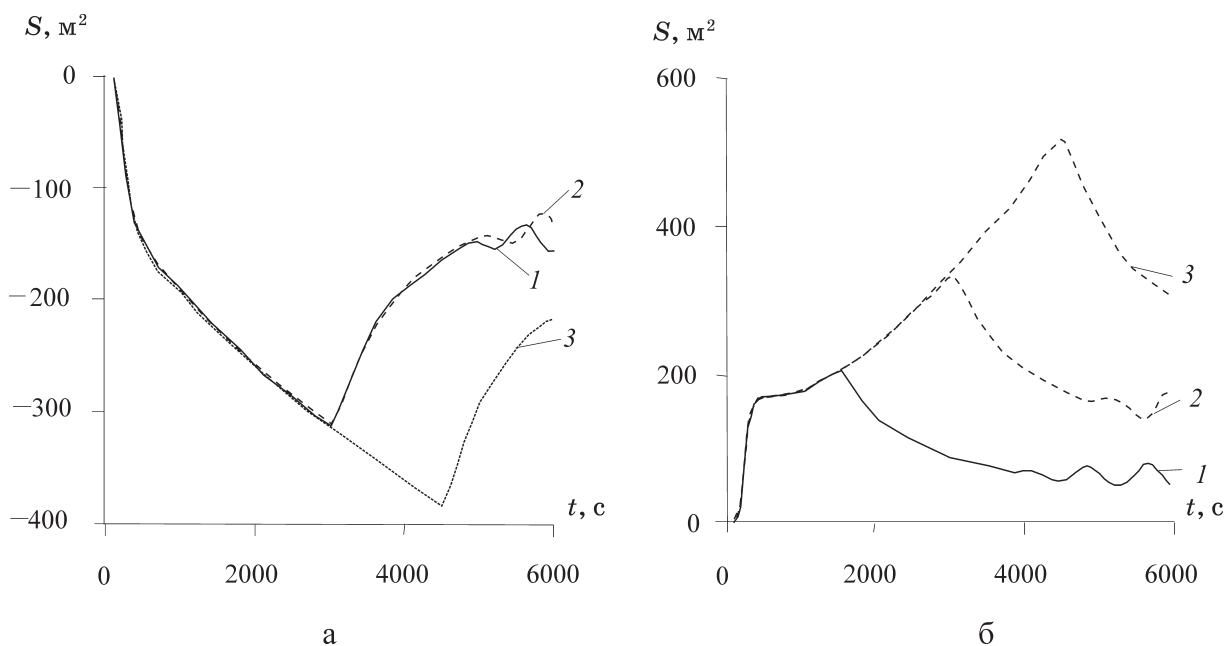


Рис. 3. Изменения площадей размыва во времени для двух начальных створов 1 (а) и 2 (б) км от плотины для попусков различной продолжительности: 1 – 25 мин; 2 – 50 мин; 3 – 75 мин

трапеции с углами откоса берегов 0,073 и 0,05 и с двумя симметричными трапециями с углами береговых откосов 0,073 и 0,036. Наименьшие разливы происходят при русле с поперечным сечением в виде симметричной трапеции с более крутыми откосами (0,036), наименьшие деформации – при русле с поперечным сечением в виде симметричной трапеции с пологими

откосами (0,073). Асимметрия поперечного сечения вызывает наибольшие разливы и деформации.

При постановке задачи основным параметром, характеризующим степень замерзания грунта, была его пористость. В связи с этим для того, чтобы проследить влияние мерзлоты на характеристики наводнения и деформации русла, были проведены численные эксперименты с

пятью различными пористостями (0,1; 0,25; 0,5; 0,65; 0,75). Для мерзлых грунтов характерны пористости 0,1...0,3.

Численные эксперименты показали, что изменение пористости мало влияет на ширину разлива при наводнении, но от них значительно зависят вертикальные деформации русла.

Затор во всех случаях происходил в створе, расположенном в 11 км от плотины через 1500 с с момента

начала попуска. Длительность попуска 3000 с. После возникновения затора в створах, расположенных ниже, ни изменения ширины водной поверхности, ни деформаций не происходит. Максимальные объемы размыва больше, чем максимальные объемы аккумуляции. Их разность в значительной степени зависит от пористости грунта. Эта зависимость представлена на рис. 4.

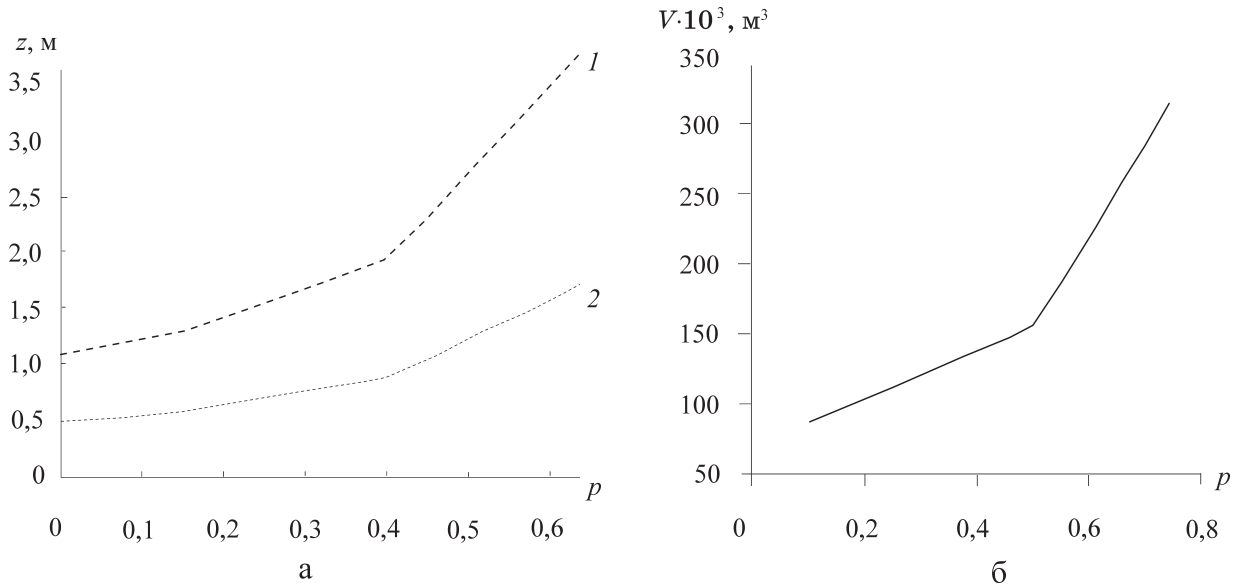


Рис. 4. Зависимости: а – максимальных вертикальных размывов (1) и аккумуляции наносов (2); б – разности максимальных объемов размыва и аккумуляции от пористости берегового материала

**Выводы**

В поставленной задаче моделирования деформаций русла при катастрофических наводнениях, вызванных волнами попусков или прорыва плотин и формированием ледовых заторов в нижних бьефах гидротехнических сооружений в условия вечной мерзлоты, основное внимание было уделено определению значимости факторов, влияющих на параметры наводнения и русловые деформации. Основным методом работы было изучение всех процессов, участвующих в изучаемом явлении, и определение самых значимых из них для построения адекватной математической модели. Разработанная двумерная модель позволила выявить определяющие параметры задачи, способные привести к наиболее неблагоприятным последствиям при зимних наводнениях в условиях вечной мерзлоты.

Численные эксперименты позволили описать влияние вечной мерзлоты на деформации дна и берегов, площади и объемы размывов под действием волн возмущения в нижних бьефах гидротехнических сооружений, а также при условии возникновения ледовых заторов.

Наиболее значимыми факторами, вызывающими максимальные площади затопления, оказались параметры волны возмущения и форма поперечного сечения русла.

На условия возникновения заторов в значительной степени влияют толщина льда и размеры приплотинной полыньи.

Численные эксперименты показали, что изменение пористости мало влияет на ширину разлива при наводнении, но от пористости зависят вертикальные

деформации русла. Объемы размывов при увеличении пористости увеличиваются в степенной зависимости. Это позволяет сделать вывод о том, что изменение климата, приводящее к изменению всех характеристик мерзлых грунтов, при прочих равных условиях вызовет значительное переформирование русел с изменением размеров и положения зон размывов и аккумуляции наносов.

1. **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.

2. **Орлов А. С., Долгополова Е. Н., Дебольский В. К.** Некоторые эмпирические закономерности русловой турбулентности // Водные ресурсы. – 1985. – № 6. – С. 85–90.

3 Application of 3D Mobile bed, hydrodynamic model / D. Gessler, B. Hall, M. Spasojevic, F. Holly, H. Pourtaheri and N. Raphelt // J. of Hydraulic Engineering. – V. 125. – 1999. – № 7. – P. 737–749.

Материал поступил в редакцию 15.01.10.

**Дебольская Елена Ивановна**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник

Тел. 8 (499) 135-72-01

**Масликова Оксана Яковлевна**, кандидат технических наук, младший научный сотрудник

Тел. 8 (499) 135-72-01

**Исаенков Александр Юрьевич**, аспирант

Тел. 8 (499) 135-72-01

УДК 502/504 : 626.83

**С. Н. КАРАМБИРОВ**

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

**Д. М. ЛИХАНОВ**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОЛЬЦЕВЫХ ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

*Приводятся результаты расчета переходных процессов на примере города Кингисеппа Ленинградской области. Моделируются переходные процессы, возникающие при авариях на трубопроводах, резком сокращении водопотребления, кратковременном отключении электроэнергии. Учитываются вариации параметров в расчетах переходных процессов в системах подачи и распределения воды.*

*Водоснабжение, система подачи и распределения воды, СПРВ, переходные процессы, гидравлический удар.*

*There are given results of calculation of transitional processes on the example of the city of Kingisepp of the Leningrad area. Transitional processes are simulated which occur at pipe lines breakages, sharp reduction of water consumption, short-term energy cutting-off. Parameters variations are taken into consideration at estimations of transitional processes in the systems of water supply and distribution.*

*Water supply, systems of water supply and distribution, SWSD, transitional processes, hydraulic impact.*

Переходные процессы в водопроводных системах по своей природе относятся к сложным динамическим про-

цессам. Факторы, определяющие протекание этих процессов, многообразны, а учет их влияния весьма затруднен. В