

УДК 627.533: 551.482

ДИНАМИКА ПРОХОЖДЕНИЯ ПОВОДОДЬЯ ЧЕРЕЗ ЗАТАПЛИВАЕМЫЙ ПОЛЬДЕР

А.П. Русецкий, кандидат технических наук
Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси

Ключевые слова: затапливаемый пolder, расход воды, скорость, дамба, водослив-прорезь

Введение

В затапливаемых пoldерах оградительные дамбы и располагаемые в них водосливы-прорези при прохождении весенних пoldоводий подвергаются размывающему воздействию потоков [1]. Чтобы назначить одежду крепления и определить наиболее опасные участки по размыву, требуется выполнить расчет динамики расходов и глубин на ограждающих элементах пoldеров, а через них и скоростей потоков.

Реальное развитие пoldоводья характеризуется переменной динамикой уровней воды на пойме. Продолжительность периодов с разной интенсивностью подъема и спада уровней может быть самой различной. Для таких условий с учетом конструкций пoldерных систем и развития пoldоводья скорости на гребнях ограждений также будут изменяться во времени по-разному. Определение скоростей, расходов и глубин на гребнях ограждений можно выполнить только на основе совместного решения уравнений, описывающих для любого момента времени пoldоводья баланс воды в пoldере, динамику уровней на пойме и движение потоков через все элементы пoldера [2].

Уравнение баланса воды для затапливаемого пoldера, имеющего прямоугольную форму в плане и примыкающего к незатапливаемой дамбе (рис. 1), записывается в виде:

$$(Q_{вв} + Q_{вд} + Q_{впд} + Q_{нв} + Q_{нд} + Q_{нпд}) \cdot dt = \Omega \cdot dh, \quad (1)$$

где t – время;

Ω – площадь затапливаемой поверхности внутри пoldера;

$Q_{вв}$ – расход через водослив-прорезь в верхней поперечной дамбе;

$Q_{вд}$ – расход через верхнюю дамбу;

$Q_{впд}$ – расход через верхнюю часть продольной дамбы;

$Q_{нв}$ – расход через водослив-прорезь в нижней поперечной дамбе;

$Q_{нд}$ – расход через нижнюю дамбу;

$Q_{нпд}$ – расход через нижнюю часть продольной дамбы;

h – глубина воды в пoldере у нижней поперечной дамбы.

Динамика уровней воды на пойме обычно задается хронологическим графиком (рис. 2).

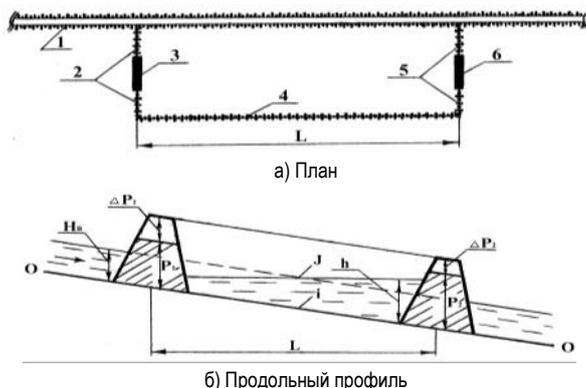


Рис. 1. Расчетная схема польдера до начала затопления через водосливы-прорези.
 1 – незатапливаемая дамба (терраса); 2 – верхняя поперечная дамба; 3 – верхний водослив-прорезь;
 4 – продольная дамба; 5 – нижняя поперечная дамба; 6 – нижний водослив-прорезь.

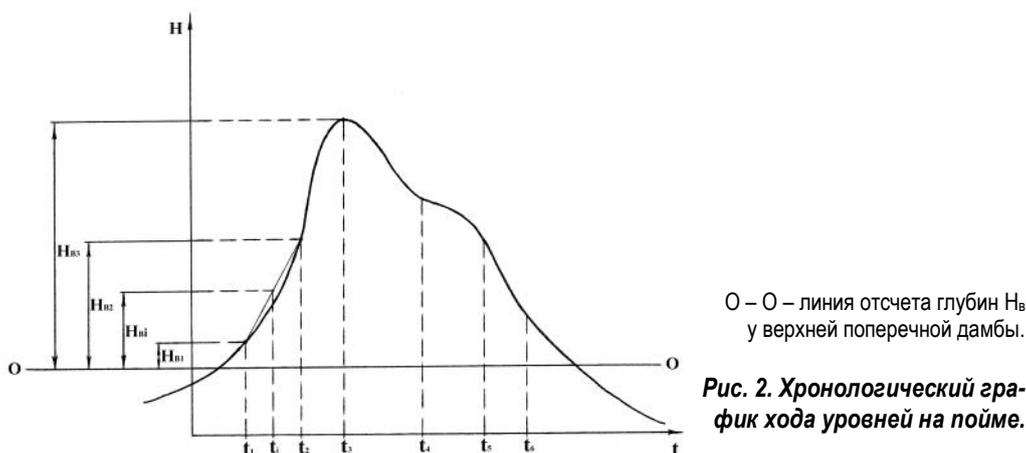


Рис. 2. Хронологический график хода уровней на пойме.

Для упрощения расчетов непрерывно плавно изменяющийся график заменяется приближенным линейно-ломаным с переломами в моменты t_1, t_2, t_3 , и т.д. Тогда для каждого линейного участка графика глубина $H_{вi}$ на пойме выражается несложно, например, для момента t_i на промежутке времени от t_1 до t_2 :

$$H_{вi} = H_{в1} + a_{1-2} \cdot (t_i - t_1), \quad (2)$$

где $H_{вi}$ – глубина на пойме в момент t_i ;

$H_{в1}$ – глубина в момент t_1 ;

a_{1-2} – угловой коэффициент графика для промежутка времени $t_1 - t_2$.

В решении принято отсчеты глубин воды на пойме и в польдере вести относительно плоскости, проведенной параллельно уклону воды на пойме, и в конструкции польдера соблюдать условие $P_1 + \Delta P_1 = P_2 + \Delta P_2$ (см. рис. 1).

Процесс взаимодействия затапливаемого польдера с половодьем на разных стадиях его развития происходит по-разному. Рассмотрим его на примере конструкции польдера

(см. рис. 1), в которой $\Delta P_1 > \Delta P_2$. В начале половодья, за счет собственного стока или устраиваемых в дамбах труб, происходит наполнение польдера водой. К моменту подъема уровня воды на пойме до отметки гребня наиболее низкого водослива-прорези внутри польдера накопится объем воды, глубины которой у нижней дамбы обозначим через h_0 . После этого, с подъемом уровня воды на пойме, в польдер начинает поступать расход воды через наиболее низкий водослив-прорезь, а впоследствии и через другой.

После наступления момента, когда внутри польдера у нижнего водослива-прорези уровень воды поднимется до отметки его гребня, через него начнет вытекать расход, т.е. направление течения поменяется на противоположное. Такое течение, при котором через верхний водослив-прорезь будет втекать расход, а через нижний – вытекать, сохранится до момента, когда глубина у нижней дамбы внутри польдера не достигнет гребня нижней поперечной дамбы. После этого из польдера дополнительно будет вытекать расход через гребень нижней дамбы и некоторый участок продольной дамбы в нижней части. Если уровень на пойме будет продолжать расти и превысит отметку гребня дамбы, то приток воды в польдер будет происходить через верхний водослив – прорезь, верхнюю поперечную дамбу и верхнюю часть продольной дамбы, а отток – через нижний водослив-прорезь, нижнюю поперечную дамбу и нижнюю часть продольной дамбы. При спаде уровней на пойме процесс взаимодействия половодья с польдером повторится в обратной последовательности до момента, когда уровни на пойме не станут ниже отметок обеих гребней водосливов-прорезей. После этого, если спад происходит медленно, ускорение сброса воды с польдера осуществляется откачкой насосной станцией.

Движение потоков через гребни водосливов-прорезей и дамб происходит аналогично тому, как через водосливы, но при малых глубинах с более низкими коэффициентами расхода и скорости (см. таблицу).

Течение воды через гребни ограждений может быть неподтопленным, подтопленным или не происходить при малых глубинах на пойме [2-4]. Ниже приведены применительно к рассматриваемой задаче уравнения расходов и условия их использования, а также формулы скорости.

Коэффициенты скорости φ_k , расхода m_n и относительной критической глубины для течения через гребень водослива-прорези (дамбы) в зависимости от относительной ширины порога

l / H	φ_k	m_n	k
55	0,84	0,317	0,59
50	0,86	0,326	0,60
45	0,88	0,335	0,61
40	0,90	0,344	0,62
30	0,93	0,357	0,64
20	0,96	0,369	0,65
$3 < l / H \leq 10$	0,97	0,373	0,66

Для водослива-прорези в верхней поперечной дамбе

Течение не происходит ($Q_{\text{вв}} = 0$) при условии

$$H_{\text{в}} - P_1 < 0, \quad (3)$$

где $Q_{\text{вв}}$ – расход через водослив в верхней поперечной дамбе;

$H_{\text{в}}$ – глубина воды на пойме у верхней поперечной дамбы;

P_1 – высота порога водослива.

Неподтопленный приток

$$Q_{\text{вв}} = m_n b_{\text{в}} \sqrt{2g} (H_{\text{в}} - P_1)^{3/2}, \quad (4)$$

$$\text{при} \left. \begin{array}{l} H_{\text{в}} - P_1 > 0, \\ \frac{h - L(i - J) - P_1}{H_{\text{в}} - P_1} \leq n, \end{array} \right\} \quad (5)$$

где m_n – коэффициент расхода неподтопленного течения;

$b_{\text{в}}$ – длина верхнего водослива-прорези;

h – глубина воды в польдере у нижней поперечной дамбы;

L – продольная длина польдера;

i – продольный уклон поверхности воды на пойме;

J – продольный уклон уровня воды в польдере;

n – критерий подтопления водослива-прорези.

Скорость на гребне при неподтопленном притоке

$$v_{\text{вв}} = \frac{Q_{\text{вв}}}{k(H_{\text{в}} - P_1) \cdot b_{\text{в}}}, \quad (6)$$

где $v_{\text{вв}}$ – скорость на гребне верхнего водослива-прорези;

k – относительная глубина воды на пороге при неподтопленном течении.

Подтопленный приток

$$Q_{\text{вв}} = \Phi b_{\text{в}} (h - L(i - J) - P_1) \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_{\text{в}} - h + L(i - J)}, \quad (7)$$

$$\text{при} \left. \begin{array}{l} H_{\text{в}} - P_1 > 0, \\ 1,0 \geq \frac{h - L(i - J) - P_1}{H_{\text{в}} - P_1} > n, \end{array} \right\} \quad (8)$$

где Φ – коэффициент скорости водослива:

Скорость на гребне при подтопленном притоке:

$$v_{\text{вв}} = \frac{Q_{\text{вв}}}{(h - L(i - J) - P_1) \cdot b_{\text{в}}}. \quad (9)$$

Неподтопленный отток

$$Q_{\text{об}} = -m_n b_s \sqrt{2g} (h - L(i - J) - P_1)^{3/2}, \quad (10)$$

$$\text{при } \left. \begin{array}{l} h - L(i - J) - P_1 > 0, \\ \frac{H_s - P_1}{h - L(i - J) - P_1} \leq n. \end{array} \right\} \quad (11)$$

Скорость на гребне при неподтопленном оттоке:

$$v_{\text{об}} = \frac{Q_{\text{об}}}{k (h - L(i - J) - P_1) b_s}. \quad (12)$$

В формуле расхода (10) и в других знак минус перед уравнением означает отток воды с польдера, знак плюс – приток.

Подтопленный отток

$$Q_{\text{об}} = -\Phi b_s (H_s - P_1) \sqrt{2g} \sqrt{h - L(i - J) - H_s} \quad (13)$$

$$\text{при } \left. \begin{array}{l} h - L(i - J) - P_1 > 0, \\ 1,0 \geq \frac{H_s - P_1}{h - L(i - J) - P_1} > n. \end{array} \right\} \quad (14)$$

Скорость на гребне при подтопленном оттоке

$$v_{\text{об}} = \frac{Q_{\text{об}}}{(H_s - P_1) \cdot b_s}. \quad (15)$$

Применяя аналогичный подход для верхней поперечной дамбы, нижнего водослива-прорези и нижней поперечной дамбы, сформулированы уравнения расчета мгновенных расходов притока воды в польдер и оттока с него, в том числе при неподтопленном и подтопленном течении, граничные условия их применения и уравнения скорости на гребнях ограждений [2].

Через продольную дамбу приток воды может не происходить, может осуществляться через всю ее длину или через часть длины. В том случае, когда приток осуществляется через часть ее длины, через оставшуюся часть происходит отток воды [2,5]. Для продольной дамбы, в связи с переменным напором не только по времени, но и по длине, а также одновременным притоком и оттоком воды на разных участках, разработаны уравнения расчета мгновенных расходов отдельно на участках притока и оттока. Участок притока назван верхней частью продольной дамбы (от верхней поперечной дамбы до сечения А, рис. 3), а участок оттока – нижней частью продольной дамбы (от сечения А до нижней поперечной дамбы, см. рис. 3).

Для верхней части продольной дамбы.

Участок неподтопленного течения обозначен $x_{1н}$, а подтопленного – $x_{1п}$. Общий расход притока через верхнюю часть продольной дамбы выражается суммой:

$$Q_{впд} = Q'_{впд} + Q''_{впд}, \quad (16)$$

где $Q'_{впд}$ и $Q''_{впд}$ – расходы соответственно неподтопленного и подтопленного течений через верхнюю часть продольной дамбы.

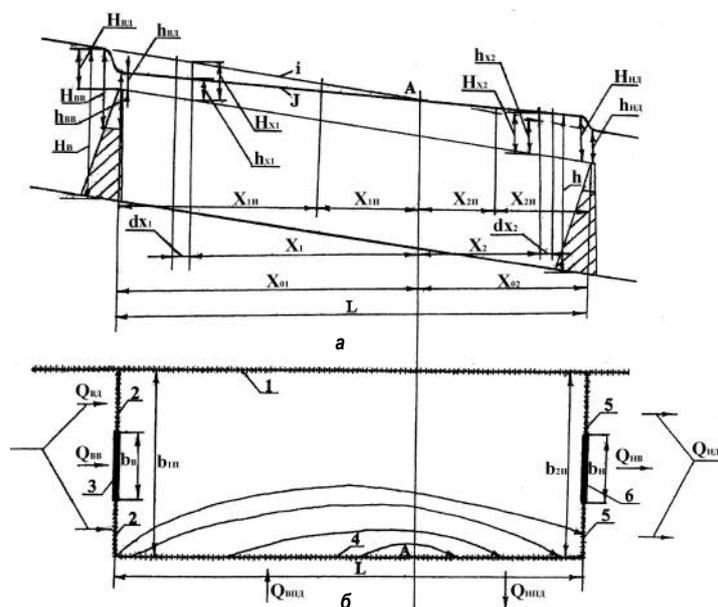


Рис. 3. Расчетная схема течения воды через затопленный польдер: а – профиль; б – план. 1 – незатапливаемая дамба; 2, 4, 5 – соответственно верхняя, продольная и нижняя затопливаемые дамбы; 3, 6 – водосливы-прорезы соответственно в верхней и нижней поперечных дамбах.

Приток не происходит ($Q'_{впд} = 0, Q''_{впд} = 0$) при условии:

$$H_{в} - (P_1 + \Delta P_1) \leq 0. \quad (17)$$

Приток через неподтопленный участок:

$$Q'_{впд} = k' m_n x_{1н} \sqrt{2g} \cdot H_{в} - (P_1 + \Delta P_1)^{3/2}, \quad (18)$$

где k' – коэффициент, учитывающий угол подхода потока к направлению дамбы.

Длина неподтопленного участка определяется уравнениями:

$$x_{1н} = x_{01} - x_{1п} \quad (19)$$

$$x_{01} = L - \frac{h - H_{в}}{i - J}, \quad (20)$$

$$x_{1п} = \frac{H_{в} - (P_1 + \Delta P_1)(1 - n)}{i - J}, \quad (21)$$

где x_{01} – длина верхней части продольной дамбы, через которую происходит приток воды в польдер.

Приток через подтопленный участок:

$$Q''_{\text{внд}} = k' \varphi \sigma_6 \cdot x_{1n} \sqrt{2g} \cdot H_v - (P_1 + \Delta P_1)^{3/2}, \quad (22)$$

где $\sigma_6 = 0,23$ – коэффициент, учитывающий подтопление продольной дамбы на участке x_{1n} .

Уравнения (18) и (22) относятся к условиям

$$\left. \begin{aligned} H_v - (P_1 + \Delta P_1) &> 0, \\ \frac{h - L(i - J) - (P_1 + \Delta P_1)}{H_v - (P_1 + \Delta P_1)} &\leq n. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Для нижней части продольной дамбы

Отток с польдера через нижнюю часть продольной дамбы состоит из суммы расходов неподтопленного и подтопленного течений:

$$Q_{\text{ннд}} = Q'_{\text{ннд}} + Q''_{\text{ннд}}, \quad (24)$$

где $Q'_{\text{ннд}}$ и $Q''_{\text{ннд}}$ – расход соответственно неподтопленного и подтопленного течений нижней части продольной дамбы.

Отток не происходит ($Q'_{\text{ннд}} = 0, Q''_{\text{ннд}} = 0$) при условиях:

$$\left. \begin{aligned} h - P_2 + \Delta P_2 &\leq 0, \\ H_v - P_2 + \Delta P_2 &\leq 0. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Отток через неподтопленный участок:

$$Q'_{\text{ннд}} = -k' m_n \beta x_{2n} \sqrt{2g} \cdot h - (P_2 + \Delta P_2)^{3/2}, \quad (26)$$

$$\beta = \frac{2}{5 \left(1 - \frac{H_{\text{вд}}}{kH_{\text{нд}}} \right)} \cdot \left[1 - \left(\frac{H_{\text{вд}}}{kH_{\text{нд}}} \right)^{5/2} \right], \quad (27)$$

$$\frac{H_{\text{вд}}}{H_{\text{нд}}} = \frac{H_v - (P_2 + \Delta P_2)}{h - (P_2 + \Delta P_2)}. \quad (28)$$

где β – коэффициент, учитывающий изменение напора по длине;

x_{2n} – длина участка нижней части продольной дамбы, на которой происходит неподтопленное течение;

$H_{\text{вд}}$ и $H_{\text{нд}}$ – напор соответственно на верхней и нижней дамбе.

$$x_{2n} = x_{02} - x_{2n}, \quad (29)$$

где x_{02} – длина нижней части продольной дамбы;

x_{2n} – длина участка, на котором происходит подтопленный отток воды.

$$x_{02} = \frac{h - H_b}{i - J} \quad (30)$$

$$x_{2n} = \frac{H_b - (P_2 + \Delta P_2) \left(\frac{1}{n} - 1 \right)}{i - J} \quad (31)$$

Отток через подтопленный участок:

$$Q''_{\text{нпд}} = -\kappa' \Phi x_{2n} \sigma \sqrt{2g} \cdot H_b - (P_2 + \Delta P_2)^{3/2}, \quad (32)$$

где $\sigma = 0,77$ – коэффициент подтопления.

Уравнения (26) и (32) относятся к условиям:

$$\left. \begin{aligned} h - (P_2 + \Delta P_2) > 0, \\ H_b - (P_2 + \Delta P_2) > 0, \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

$$\frac{H_b - (P_2 + \Delta P_2)}{h - (P_2 + \Delta P_2)} \leq n. \quad (34)$$

Разработанные зависимости позволяют с помощью приближенных способов решения дифференциальных уравнений рассчитать динамику скоростей на гребнях водосливов-прорезей и дамб за период половодья. На рис. 4 для примера приведена динамика скоростей на гребнях ограждений затапливаемого польдера при исходных данных: $\Omega = 200$ га, $L = 2000$ м, $B = 1000$ м, $b_b = 100$ м, $P_1 = P_2 = 0,7$ м, $\Delta P_1 = \Delta P_2 = 0,3$ м, $i = 0,00005$; $n_{\text{ш}} = 0,03$, $h_0 = 0,5$ м, график хода уровней принят наблюдавшийся в пойме р. Пина в 1979 г. Расчеты динамики уровней выполнены с применением способа приближенного решения дифференциальных уравнений Рунге-Кутта.

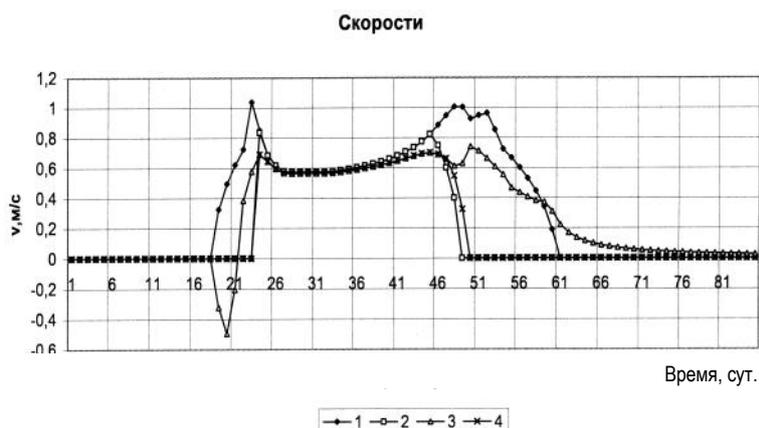


Рис. 4. Динамика скоростей на гребнях ограждений верхнего водослива (1), верхней дамбы (2), нижнего водослива (3), нижней дамбы (4)

Выводы

1. Динамика расходов и скоростей на гребнях водосливов-прорезей и ограждающих дамб затапливаемых полей при прохождении весенних половодий характеризуется различными условиями течения потоков через разные элементы ограждений и зависит от конструкции поля, гидрологического развития половодья, начальных условий затопления.

2. Разработан способ определения расходов, скоростей и глубин на гребнях ограждений и внутри поля, основанный на совместном решении уравнения баланса воды в поле, хронологического хода уровней воды в половодье, уравнений расхода перелива воды через все элементы ограждений.

3. Полученные зависимости для расчета течения воды через продольную дамбу учитывают не только переменный напор во времени, но и по длине дамбы, а также разную на отдельных участках направленность перелива потоков (в поле и из него).

Литература

1. Русецкий А.П., Полевой В.А. Экспериментальные исследования прохождения весеннего половодья через затапливаемый поле «Беляевский» // Мелиорация и луговое хозяйство на пойменных землях. / БелНИИМил. – Мн.: 1996. – С. 23-35.
2. Русецкий А.П. Затапливаемые поля Белорусского Полесья / А.П. Русецкий – Мн.: ГУ УМЦ МСХиП. – 2004. – 146 с.
3. Агроскин И.И., Дмитриев Г.Т., Пикалов Ф.И. Гидравлика. – М.: Энергия, 1964. – 352 с.
4. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
5. Карнаухов В.Н. Исследование режима водного потока на модели затапливаемого поля // Мелиорация переувлажненных земель: Сб. науч. раб. БелНИИМил. – Мн., 1998. – Т. XLV. – С. 65-80.

Summary

Rusetsky A. DYNAMICS OF THE HIGH WATER PASSAGE THROUGH THE FLOODED POLDER

The article is devoted to the water current flows, speeds and depths definition way on crests of protections and inside the polder, based upon the water balance equations joint decision in polder, a chronological course of water levels in a high water, and the flow of waters flowing through all the elements of protections. Calculation of these characteristics (flows of water, speeds and depths) enables to determine the sites of a dam most dangerous in spite of polder washout and to fulfill its strengthening.

The description of the streams flowing through the flooded older at passage of a spring high water dynamics is presented. The solution for water flows and speeds definition on crests of protective dams and spillways – slots in view of high water development character, polder design, and flowing over through the elements crests conditions is given. Water current through the longitudinal dam details, consisting in the fact that there is water inflow through its top part, and water outflow through the bottom for variable pressures on length and on a high water development time are considered in the solution. Underflooded and on some sites underflooded current can occur on each of these parts of a longitudinal dam. Dependences for conditions and current flows determining through the sites of a longitudinal dam are given. The dependences developed allow to calculate by means of the differential equations decision approximate ways the speeds dynamics on crests of spillways – slots and flooded dams taking into account the regime of a high water.

Поступила 15 июня 2006 г.