

УДК 627.533.2:627.8

**ДИНАМИКА СКОРОСТЕЙ В ПОЛОВОДЬЕ
НА ГРЕБНЯХ ОГРАЖДЕНИЙ ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ ВОДОСЛИВА-ПРОРЕЗИ
В СРЕДНЕЙ ЧАСТИ ПРОДОЛЬНОЙ ДАМБЫ ЗАТАПЛИВАЕМОГО ПОЛЬДЕРА**

А.П. Русецкий, доктор технических наук
РУП «Институт мелиорации»

Ключевые слова: затапливаемый польдер, динамика скоростей, гребни ограждений, водослив-прорезь, продольная дамба

Введение

Затапливаемые польдеры применены в Белорусском Полесье при мелиорации тех участков пойм, которые было нецелесообразно защищать незатапливаемыми польдерами по технико-экономическим условиям [1]. Это земли в междамбовом пространстве незатапливаемых польдеров, располагаемых от реки Припяти на расстоянии до 2 км, а от реки Ясельда – до 500 м. Они включают, кроме природоохранной полосы, значительную часть сельскохозяйственных земель, мелиорация которых оказалась возможной затапливаемыми польдерами с регулируемой длительностью затопления. Затапливаемые польдеры построены на площади около 15 тыс. га. При их проектировании расположение водосливов-прорезей принималось в любом месте дамб. В то же время плановое расположение водослива-прорези влияет на формирование скоростей на гребнях ограждений. В данной статье рассмотрено формирование скоростей при расположении водослива-прорези в средней части продольной дамбы.

Зависимости для расчета скоростей на гребнях ограждений

При устройстве водослива-прорези в продольной дамбе возникает необходимость определения максимальных скоростей на его гребне, а также на гребнях верхней и нижней поперечных дамб. Расчетная схема затапливаемого польдера с расположением водослива-прорези в средней части продольной дамбы показана на рис. 1.

Затапливаемый польдер примыкает одной продольной стороной к дамбе незатапливаемого польдера. По второй продольной стороне устроена затапливаемая дамба, в которой располагается водослив-прорезь 6 и донный водовпуск 7 (см. рис. 1). По характеристике течения воды через гребни ограждений в половодье можно выделить пять периодов, отличающихся участками перелива через элементы польдера или подтопленностью течения. Первый период – затопление через донный водовпуск 7, перелив через гребни элементов отсутствуют. Второй период – течение через водовпуск и неподтопленный приток через гребень водослива-прорези. Третий период – течение через донный водовпуск

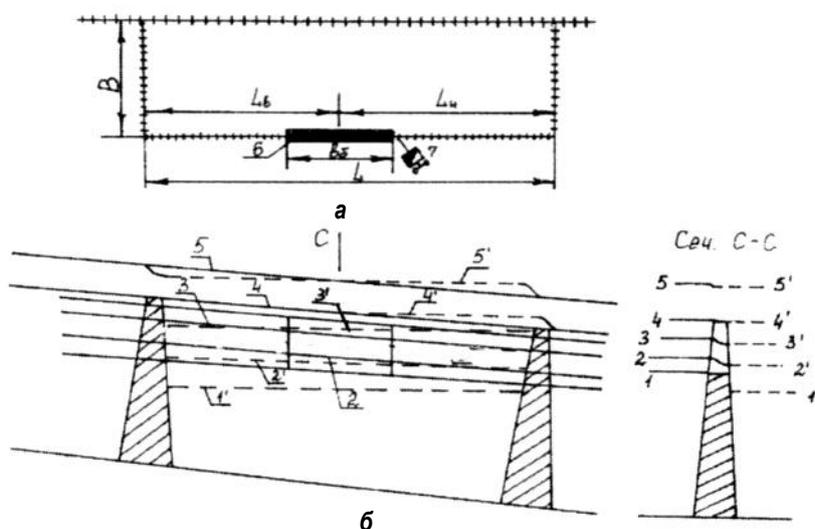


Рис. 1. Схема затопления польдера с водослив-прорезью в средней части продольной дамбы: а – план затопляемого польдера; б – расчетные профили уровней на пойме и в польдере. 1 и 1' - соответственно уровень на пойме и в польдере в конце первого периода; 2 и 2' - то же в конце второго периода; 3 и 3', 4 и 4' - то же соответственно в конце третьего, четвертого периодов; 5 и 5' - уровень в пятый период

и подтопленный приток через водослив-прорезь. Четвертый период – течение через донный водовпуск, подтопленный приток через водослив-прорезь и неподтопленный отток воды с польдера через нижнюю поперечную дамбу и нижнюю часть продольной дамбы. Пятый период – приток через верхнюю поперечную дамбу и верхнюю и часть продольной дамбы и отток через нижнюю поперечную дамбу и нижнюю часть продольной дамбы.

Прежде всего следует определить глубину затопления польдера к моменту подъема уровней на пойме до отметки гребня водослива-прорези, т.е. к концу первого периода. Для удобства расчета отсчеты глубин будем производить от линии, проходящей по поверхности почвы на польдере и совпадающей со средним уклоном поймы на этом участке.

Водовпуск будем считать открытым с начала выхода воды на пойму.

Расход течения через водовпускное отверстие в любой момент времени определяется уравнением:

$$Q_{тр} = \mu\omega \sqrt{2g(H - h)}, \quad (1)$$

где $Q_{тр}$ – расход водовпускных труб; μ – коэффициент расхода водовпусков; ω – общая площадь отверстий водовпусков; H – глубина воды на пойме; h – глубина воды в польдере у водовпускных сооружений; g – ускорение свободного падения.

Изменение объема воды в польдере за элементарный промежуток времени dt составит:

$$Q_{mp} dt = \Omega(h) \cdot dh, \quad (2)$$

где t – время; $\Omega(h)$ – площадь затопления в польдере.

Уравнение (2) с учетом зависимости (1) принимает вид:

$$\mu\omega \sqrt{2g(H-h)} \cdot dt = \Omega(h)dh, \quad (3)$$

Глубина воды на пойме для любого момента времени определяется по графику уровней половодья, т.е.

$$H = f(t). \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (3) совместно с зависимостью (4) в пределах первого периода позволяет получить динамику уровней воды в польдере в этот период, в том числе глубину воды в начале перелива ее через гребень водослива-прорези.

Задача определения глубины воды в начале перелива через водослив-прорезь с помощью уравнений (3) и (4) не имеет строгого теоретического решения. Для условий, когда глубина воды в польдере изменяется линейно по времени $H = at$ можно воспользоваться способом, изложенным в [2]. В общем случае развития половодья, когда $H = f(t)$ изменяется нелинейно, можно применить приближенный способ расчета пошагового решения с интервалами времени $\Delta t = t_2 - t_1$, представив уравнение (3) в конечных разностях в виде:

$$(t_2 - t_1) \cdot \mu\omega \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} = \Omega(h)(h_2 - h_1), \quad (5)$$

где t_1 и t_2 – время в начале и конце каждого шага решения; H_1 и H_2 , h_1 и h_2 – уровни воды соответственно на пойме и в польдере в начале и конце каждого шага решения.

После подъема на пойме уровня до отметки гребня водослива-прорези, дальнейший его подъем приведет к затоплению польдера одновременно через водовпускное сооружение и водослив-прорезь. Течение воды во второй период через водослив-прорезь происходит неподтопленным. Наиболее опасное по устойчивости к размыву сечение будет в конце порога водослива-прорези, где глубина равна критической, определяемой уравнением:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (6)$$

где $h_{кр}$ – критическая глубина на водосливе-прорези; α – коэффициент кинетической энергии; q – удельный расход водослива-прорези.

Второй период будет продолжаться с момента начала перелива воды через гребень водослива-прорези до соблюдения условий:

$$\Delta_n = h_{кр}, \quad (7)$$

$$h_2 + iL_n \leq P_d, \quad (8)$$

где Δ_n – превышение глубины в польдере над порогом водослива-прорези; h_2 –

глубина в среднем створе нижнего бьефа бокового водослива-прорези; L_n – расстояние от среднего створа водослива-прорези до нижней поперечной дамбы (см. рис. 1); i – продольный уклон поймы; P_d – высота нижней поперечной дамбы.

При изменяющемся уровне на пойме по времени удельный расход и критическая глубина также будут зависимыми от времени. На подъеме уровня на пойме глубина в польдере может расти более быстро, чем на пойме, тогда условия (7) и (8) будут соблюдаться и второй период будет иметь конечный срок.

Уравнение баланса объема воды в польдере для второго периода имеет вид:

$$(Q_{mp} + Q_e)dt = \Omega(h)dh, \quad (9)$$

где Q_b – расход притока через водослив-прорезь.

Расход неподтопленного водослива-прорези, пренебрегая скоростным напором, определяется формулой:

$$Q_e = m_n b_o \sqrt{2g} (H - P)^{\frac{3}{2}}, \quad (10)$$

где m_n – коэффициент расхода водослива-прорези; b_o – длина бокового водослива-прорези; P – высота порога водослива-прорези.

С учетом расходов водовпускного сооружения по (1) и водослива-прорези по (10), уравнение (9) принимает вид:

$$\left[\mu\omega \sqrt{2g} (H - h) + m_n b_o \sqrt{2g} \cdot (H - P)^{\frac{3}{2}} \right] dt = \Omega(h)dh, \quad (11)$$

Для расчета в конечных разностях во втором периоде, уравнение (11) приводится к виду:

$$\left[\mu\omega \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} + m_n \cdot b_o \sqrt{2g} \left(\frac{H_1 + H_2}{2} - P \right)^{\frac{3}{2}} \right] (t_2 - t_1) = \Omega(h)(h_2 - h_1), \quad (12)$$

По уравнению (12) и зависимости (4) устанавливается глубина на пойме H_2 и в польдере h_2 на конец свободного течения через водослив-прорезь. Максимальная скорость течения воды в наиболее опасном сечении с критической глубиной на водосливе-прорези определяется по формуле:

$$v = \varphi_k \sqrt{2g (H_2 - P - h_{sp})}, \quad (13)$$

При соблюдении условия (7), но не соблюдении (8) следует определить глубину на пойме H_2 в конце второго периода из уравнения (12) при глубине в польдере у бокового водослива-прорези

$$h_2 = P_d - iL_n, \quad (14)$$

при этом третьего периода не будет.

Скорость на гребне водослива-прорези в этом случае определяется уравнением (13).

Третий период затопления будет в течение времени, которое соответствует изме-

нению глубины в польдере у водослива-прорези от $h = P + h_{кр}$ до глубины, при которой уровень в польдере поднимется до гребня нижней поперечной дамбы P_d . Уравнение баланса для третьего периода соответствует уравнению (9), а расход водослива-прорези определяется формулой:

$$Q_a = \varphi_k b_o (h - P) \sqrt{2g} \sqrt{(H - h)}, \quad (15)$$

где φ_k – коэффициент скорости водослива-прорези [2].

Подставим в уравнение (9) расходы $Q_{тр}$ по (1) и водослива-прорези по (15), получим дифференциальное уравнение для третьего периода:

$$\left[\mu\omega \sqrt{2g} \sqrt{(H - h)} + \varphi_k b_o (h - P) \sqrt{2g} \sqrt{(H - h)} \right] dt = \Omega(h) \cdot dh \quad (16)$$

Уравнение (16) приводится в конечных разностях к виду:

$$\left[\mu\omega \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} + \varphi_k b_o \left(\frac{h_1 + h_2}{2} - P \right) \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} \right] (t_2 - t_1) = \Omega(h)(h_2 - h_1), \quad (17)$$

По уравнению (17) последовательно по времени совместно с зависимостью (4) рассчитывается динамика уровней до глубины в польдере, соответствующей конечной глубине (14) третьего периода. Скорость течения на гребне водослива-прорези определяется формулой:

$$v = \varphi_k \sqrt{2g(H_2 - h_2)}, \quad (18)$$

Четвертый период будет при глубине в польдере у нижней дамбы.

$$h_2 \geq P_d - iL_n, \quad (19)$$

Четвертый период будет продолжаться, пока уровень воды на пойме не поднимется до гребней дамб. В четвертом периоде одновременно с поступлением воды через водовпуск и водослив-прорезь будет происходить ее отток через нижнюю поперечную дамбу и некоторую длину в нижней части продольной дамбы. Для расчета в четвертом периоде получено следующее уравнение в конечных разностях:

$$\left[\mu\omega \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} + \varphi_k b_o \left(\frac{h_1 + h_2}{2} - P \right) \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} \right] (t_2 - t_1) - \left[m_{II} (0,5L_n + B) \cdot \sqrt{2g} \left(\frac{h_1 + h_2}{2} + iL_n - P_d \right)^{\frac{3}{2}} \right] (t_2 - t_1) = \Omega(h)(h_2 - h_1). \quad (20)$$

В уравнении (20) второе слагаемое в первых квадратных скобках выражает подтопленный расход воды через боковой водослив-прорезь. Условие подтопления требует при расчетах проверки, и если течение окажется неподтопленным, то следует вместо указанного слагаемого подставить расход неподтопленного течения:

$$Q_6 = m_{II} b_6 \sqrt{2g} \left(\frac{H_1 + H_2}{2} - P \right)^{\frac{3}{2}} \quad (21)$$

где Q_6 – расход неподтопленного водослива-прорези.

Скорости на гребнях водослива – прорези и дамб в четвёртом периоде определяются по соответствующим формулам (13) или (18) свободного или подтопленного течения. Дальнейший подъем уровней на пойме, соответствующий пятому периоду, вызовет транзитное течение через польдер. На спаде половодья все выше описанные процессы будут повторяться в обратной последовательности и расчеты скоростей могут определяться по приведенным зависимостям.

Результаты расчета скоростей на гребнях ограждений

Расчет динамики скоростей на гребнях ограждений позволяет найти максимальные их значения в различные периоды течения воды в польдере, определить наиболее опасные случаи и предусмотреть мероприятия по предупреждению размыва.

Результаты нижеприведенных расчетов относятся к затопляемому польдеру, характеризующемуся следующими исходными данными: площадь затопления $\Omega = 100$ га, высота ограждающих дамб $P_d = 1,0$ м, высота водослива-прорези $0,7$ м, длина водослива-прорези $b_6 = 30$ м, польдер имеет прямоугольное положение в плане шириной $B = 500$ м, длиной $L = 2000$ м, уклон поверхности поймы $i = 0,00005$, в дамбе расположен водовпуск у водослива-прорези с площадью отверстия $\omega = 1,57$ м².

Принято, что водовпуск в половодье полностью открыт и через него происходит затопление польдера при выходе воды на пойму. Уровни на пойме изменяются во время половодья по графику (ряд. 1), приведенному на рис. 2. В таких условиях скорости, рассчитанные по выше приведенным зависимостям, показаны на рис. 2 (ряды 2, 3 и 4).

Первый период, при котором уровни на пойме поднимутся до гребня водослива-

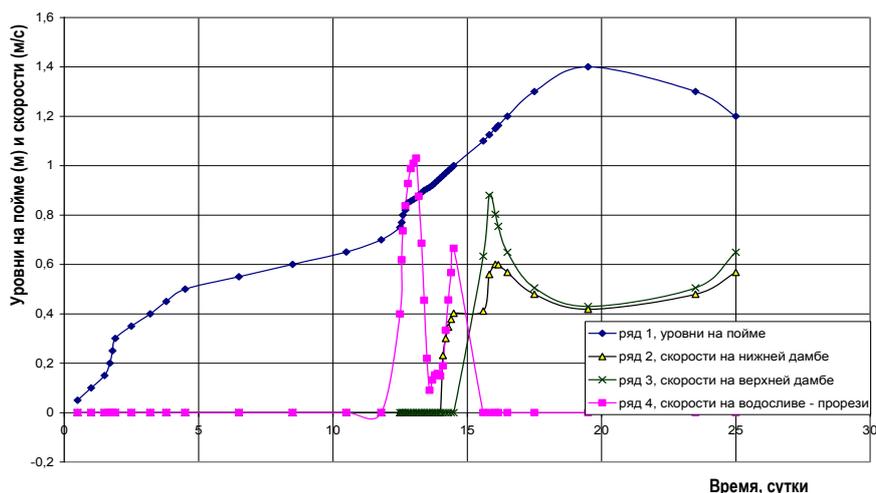


Рис.2. Динамика скоростей при расположении водослива-прорези в боковой (продольной) дамбе

прорези, произойдет за 11,8 суток, затопление в этот период происходит только через водовпуск, уровень в польдере установится на глубине 0,61 м. Второй период неподтопленного течения через водослив-прорезь будет происходить в срок с 11,8 до 13,1 суток от начала затопления польдера. Скорость на водосливе-прорези за это время возрастет до 1,03 м/с (ряд 4, см. рис. 2). Третий период будет в срок с 13,1 до 13,6 суток, за который скорость на водосливе-прорези снизится до 0,09 м/с (ряд 4, см. рис. 2). После этого будет происходить четвертый период в срок с 13,6 до 14,5 суток. Скорость вновь возрастет до 0,66 м/с. Далее в пятом периоде скорость на водосливе-прорези снизится до нуля.

На нижней поперечной дамбе скорость появится и будет возрастать только после начала перелива через нее воды в четвертом периоде. Максимального значения (0,6 м/с) она достигнет в пятом периоде (ряд 2, см. рис. 2). На верхней поперечной дамбе скорость до четвертого периода будет равной нулю, затем в пятом периоде сначала начнет возрастать и достигнет максимального значения 0,88 м/с, затем при дальнейшем подъеме уровня за счет увеличения степени подтопления, снова будет снижаться (ряд 3, см. рис. 2).

Приведенный расчет указывает на возможность использования разработанных зависимостей для анализа динамики скоростей на гребнях ограждений затапливаемых польдеров. Из расчета примера следует, что наиболее опасным из условия размыва, будет водослив – прорезь, где скорость получает максимальное значение.

Вывод

Разработанные зависимости позволяют производить расчет динамики скоростей на гребнях ограждений и определять наиболее опасные к размыву участки при расположении водослива-прорези в средней части продольной дамбы. В рассмотренном примере получено, что максимальное значение скорости будет на водосливе-прорези в момент перехода неподтопленного течения в подтопленное.

Литература

1. Буткевич, Л.Д. Технические решения по обвалованию р. Припяти / Л.Д. Буткевич // Проблемы Полесья: сб. научн. ст. / Академия Наук БССР; редкол.: С.Х. Будыка (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1984. – Вып. 9. – С. 171 – 172.
2. Русецкий, А.П. Затапливаемые польдеры Белорусского Полесья / А.П. Русецкий. – Минск: ГУ УМЦ МСХиП. – 2004. – 146 с.

Summary

Rusetsky A. Dynamics of Rates on Protective Crests at Arrangement of Weir-Opening in the Middle Part of Longitudinal Embankment of Drowned Polder

Devised: The way of calculation for the dynamics of rate of water stream through crests of protecting embankments and weir-openings at arrangement of weir-opening in the middle part of longitudinal (side) embankment. The analysis of dynamics of rates makes it possible to define the most dangerous sections and to provide for the procedures on preventing the protective fence undercutting.

Поступила 14 июля 2008 г.