

УДК 627.533:551.311

## **РАСЧЕТ СКОРОСТЕЙ НА ГРЕБНЯХ ВОДОСЛИВОВ-ПРОРЕЗЕЙ И ДАМБ ЗАТАПЛИВАЕМЫХ ПОЛЬДЕРОВ**

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

**Ключевые слова:** затапливаемый польдер, скорость на гребнях, водослив-прорезь, дамба

### **Введение**

Затапливаемые польдеры с регулируемой длительностью затопления, для сокращения названные "весенние", применены в Белорусском Полесье на площади около 15 тыс. гектаров. При их проектировании использованы временные рекомендации [1], в которых не дается способов расчета и проверки устойчивости гребней дамб и водосливов-прорезей на размыв при пропуске весенних половодий через территорию польдеров. Однако опыт пропуска половодий через польдеры показал [2], что водосливы-прорези и дамбы подвергаются в ряде случаев размыву. Повышение скоростей на гребнях ограждений возникает от стеснения весенних потоков элементами затапливаемых польдеров. Общий подход к таким расчетам изложен в работе [3], но он осложняется необходимостью интегрирования дифференциальных уравнений, не имеющих простого решения. В данной работе рассматриваются упрощенные способы расчёта скоростей на гребнях при разном расположении водосливов-прорезей в оградительных дамбах.

### **Расчет скорости на гребнях ограждений при расположении водослива-прорези в верхней поперечной дамбе**

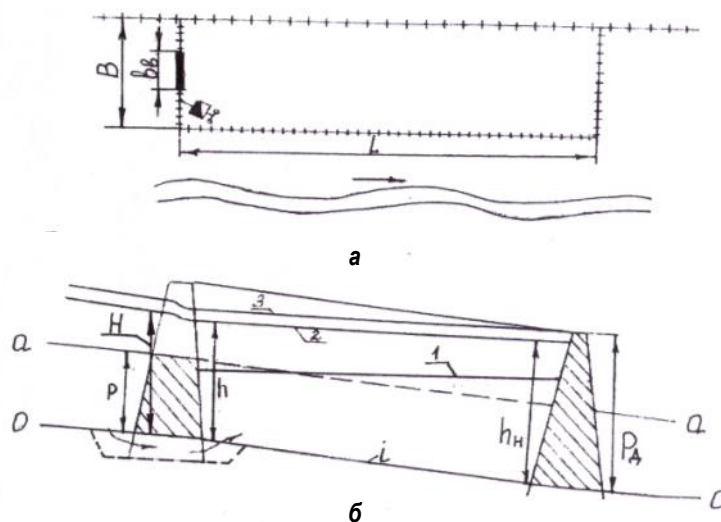
Рассмотрим задачу расчета скоростей применительно к затапливаемому польдеру, имеющему прямоугольную форму в плане, с водосливом-прорезью и водовпуском, расположенным в верхней поперечной дамбе. Польдер продольной стороной примыкает к дамбе не затапливаемого польдера (рис.1). На незащищенной пойме уровень воды соответствует развитию половодья с максимальным подъемом уровней, превышающих высоту дамб.

Отсчет глубин воды на пойме и в польдере будем вести относительно линии, проходящей по поверхности почвы и совпадающей со средним уклоном поймы на этом участке. В зависимости от того, через какие элементы будет перетекать вода, и характера течения общее время подъема половодья разделим на пять периодов. Первый – течение воды в польдер через трубу-водовпуск. Этот период будет продолжаться с начала выхода воды на пойму до момента, когда уровень на пойме поднимется до гребня водослива-прорези. Второй период – течение через трубу-водовпуск и неподтопленное через водослив-прорезь. Третий период – течение через трубу-водовпуск, подтопленное тече-

ние через водослив-прорезь. Четвертый период – приток через трубу-водовпуск, подтопленное через водослив-прорезь и отток через гребень нижней поперечной дамбы и нижнюю часть продольной дамбы. Пятый период – транзитное течение через все элементы: верхние – приток, нижние – отток.

Решение задачи сводится к определению положения уровней воды (глубин) у сооружений внутри польдера и с внешней стороны, а через них – к установлению характера течения (подтопленное или неподтопленное) и затем к выбору соответствующих формул и расчету скорости течения.

С начала выхода воды на пойму в половодье принимаем открытой трубу-водовпуск. Затопление польдера с начала половодья предназначено для уменьшения перепада уровней между бьефами водослива-прорези к моменту перелива воды через его гребень, снижения скоростей перелива и сокращения сроков их воздействия.



*B – ширина польдера; L – длина польдера;  $b_{с}$  – длина водослива-прорези;  $P_{д}$  – высота порога водослива-прорези;  $P_{д}$  – высота дамбы*

**Рис.1. Схема затопления польдера с водосливом-прорезью в верхней поперечной дамбе: а – план; б – расчетные профили уровней.**

*1-3 – уровни воды, соответственно, в конце 1,2 и 3-го периодов*

Расход течения через трубу-водовпуск определяется уравнением [4]:

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

где  $Q_{тр}$  – расход трубы-водовпуска;  $\mu$  – коэффициент расхода водовпуска;  $\omega$  – площадь отверстия водовпуска;  $H$  – глубина воды на пойме, т.е. в верхнем бьефе водослива-прорези;  $h$  – глубина воды в польдере;  $g$  – ускорение свободного падения.

Уравнение баланса воды на польдере для первого периода за элементарный про-

межутки времени  $dt$  запишется в виде:

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

или с учетом (1):

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

где  $\Omega(h)$  – площадь затопления польдера;

$dh$  – изменение глубины воды в польдере за время  $dt$ .

Глубина воды на пойме определяется хронографом половодья:

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

Совместное решение уравнений (3) и (4) позволяет определить глубину воды в польдере на конец первого периода. Эту систему уравнений можно представить в конечных разностях в виде:

$$\dot{t}_2 - \dot{t}_1 \cdot \mu \omega \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} = \Omega \dot{h} \dot{h}_2 - h_1 \quad (5)$$

$$H_1 = f(\dot{t}_1) \quad (6)$$

$$H_2 = f(\dot{t}_2) \quad (7)$$

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

Решением уравнений (5)-(7) устанавливается глубина в польдере у водослива-прорези в конце первого периода, уровень воды в польдере располагается горизонтально по линии 1. Уровень воды на пойме достигает гребня водослива-прорези и располагается по линии а – а (см. рис. 1).

Уравнение баланса воды в польдере во второй период учитывает приток через трубу-водовпуск (1) и неподтопленный приток через водослив-прорезь и выражается уравнением:

$$dt \mu \omega \sqrt{2g} \dot{H} - h \pm m_n b_s \sqrt{2g} \dot{H} - P^{\frac{3}{2}} = \Omega \dot{h} dh, \quad (8)$$

где  $m_n$  – коэффициент расхода неподтопленного водослива-прорези;  $b_s$  – длина водослива-прорези в верхней дамбе;  $P$  – высота порога водослива-прорези.

В конечных разностях уравнение (8) принимает вид:

$$\dot{t}_2 - \dot{t}_1 \left[ \mu \omega \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} + m_n b_s \cdot \sqrt{2g} \left( \frac{H_1 + H_2}{2} - P \right)^{\frac{3}{2}} \right] = \Omega \dot{h} \dot{h}_2 - h_1 \quad (9)$$

Уравнение (9) должно решаться совместно с уравнениями (6) и (7). Здесь должны соблюдаться условия:

$$\Delta_{II} \leq h_{кр}, \quad (10)$$

$$h_H = h_2 + iL \leq P_d, \quad (11)$$

где  $\Delta_{II}$  – превышение уровнем воды в польдере порога водослива-прорези;  $h_{кр}$  – критическая глубина на пороге водослива-прорези;  $h_H$  – глубина воды в польдере у нижней поперечной дамбы;  $i$  – уклон поверхности поймы;  $P_d$  – высота дамбы;  $L$  – длина польдера между верхней и нижней поперечными дамбами;  $h_2$  – глубина в нижнем бьефе водослива-прорези.

Если условия (10) и (11) выполняются, то по полученной из условия (9) глубине  $H_2$  вычисляется скорость на гребне водослива-прорези по формуле:

$$v = \varphi_k \sqrt{2g(H_2 - P - h_{кр})} \quad (12)$$

где  $\varphi_k$  – коэффициент скорости водослива-прорези.

Второй период будет проходить при подъеме уровней в польдере до линии 2, соответствующей неподтопленному течению воды через водослив-прорезь (см. рис. 1).

Если условие (10) соблюдается, а (11) не выполняется, то по уравнениям (9) и (10) определяется глубина воды на пойме  $H_2$  при глубине в польдере у верхней дамбы:

$$h_2 = P_d - iL, \quad (13)$$

Скорость на гребне в этом случае определяется формулой (12), но с новой глубиной воды на пойме  $H_2$ , определенной при  $h_2$  по (13).

При соблюдении условия (10), но не соблюдении условия (11) третьего периода, т.е. с подтопленным течением через водослив-прорезь, не будет.

Третий период тот, при котором происходит подтопленное течение через водослив-прорезь, пока уровень в польдере не поднимется от линии 2 до линии 3 (см. рис. 1) при соблюдении условий (11) и (14):

$$\Delta_{II} > h_{кр}, \quad (14)$$

Балансовое уравнение в конечных разностях для третьего периода имеет вид:

$$t_2 - t_1 \left[ \mu \alpha \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} + \varphi_k b_6 \left( \frac{h_1 + h_2}{2} - P \right) \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} \right] = \Omega h \left[ \bar{h}_2 - h_1 \right], \quad (15)$$

Совместным решением (15) с (6) и (7) определяются глубины на пойме  $H_2$  и соответствующая глубина внутри польдера  $h_2$  в период подъема уровня у нижней поперечной дамбы до ее высоты  $P_d$ .

Скорость течения на гребне водослива-прорези будет определяться уравнением:

$$v = \varphi_k \sqrt{2g(H_2 - h_2)} \quad (16)$$

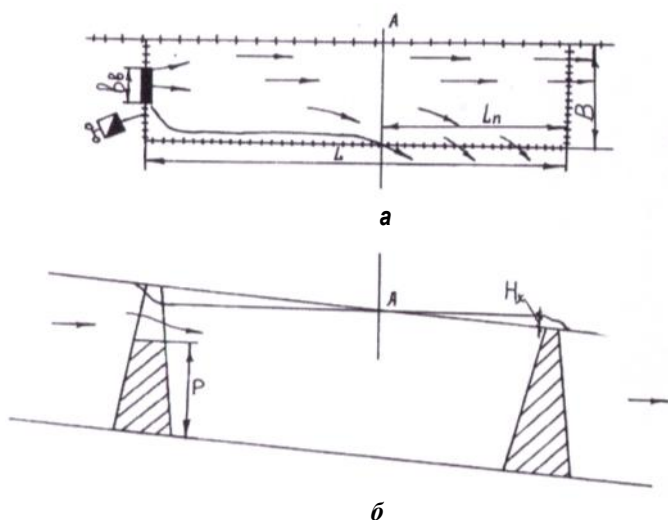


Рис.2. Схема течения в четвертом периоде:  
а – план;  
б – расчетный профиль

Четвертый период характеризуется притоком воды в польдеры через водослив-прорезь и трубу-водовпуск, а отток через гребни нижней поперечной дамбы и нижней части продольной дамбы (рис.2).

Для приближенного расчета этого периода получены зависимости:

$$t_2' - t_1 \left[ \varphi_x b_e \sqrt{2g} \left( \frac{h_1 + h_2}{2} - P \right) \sqrt{\frac{H_1 + H_2 - h_1 + h_2}{2}} + \mu \omega \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2 - h_1 + h_2}{2}} \right] -$$

$$- t_2' - t_1 \left[ m_n B \sqrt{2g} \left( \frac{H_x}{2} \right)^{\frac{3}{2}} + m_n L_n \sqrt{2g} \left( \frac{0.5 H_x}{H_x + P_1 - h_2} \right) \left( \frac{H_x}{4} \right)^{\frac{3}{2}} \right] = \Omega \bar{h} \left[ \frac{h_2 - h_1 + H_x}{2} \right], \quad (17)$$

$$H_x = L i' - J \pm H_2 - P_d = H_2 - h_2, \quad (18)$$

$$J = \left( \frac{Q_{cp} h}{B} \right)^2 \cdot \frac{1}{h^{3.4}}, \quad (19)$$

где  $H_x$  – напор перелива через нижнюю поперечную дамбу;

$J$  – уклон свободной поверхности воды в польдере;

$Q_{cp}$  – средний расход течения в польдере по его длине;

$h$  – средняя глубина воды в польдере;

$B$  – длина нижней поперечной дамбы;

$L_n$  – длина нижней части продольной дамбы, через которую происходит отток воды с польдера.

Уравнения (17)-(19) также должны решаться совместно с (6) и (7), в результате которого определяются глубины  $H_2$  и  $h_2$ , а также напор  $H_x$  у нижней поперечной дамбы. Для подтопленного течения через водослив-прорезь скорость определяется по (16), а

для неподтопленного течения через гребень нижней поперечной дамбы по формуле:

$$v = \varphi_n \sqrt{2g(H_x - h_{кр})} \quad (20)$$

где  $\varphi_n$  – коэффициент скорости нижней поперечной дамбы.

Дальнейший подъем уровней на пойме, которому соответствует условие  $H > P_d$ , вызовет появление пятого периода с транзитным течением воды через польдеры, расчет которого изложен в [5].

### Расчет скоростей на гребнях оградений при расположении водослива-прорези в нижней поперечной дамбе

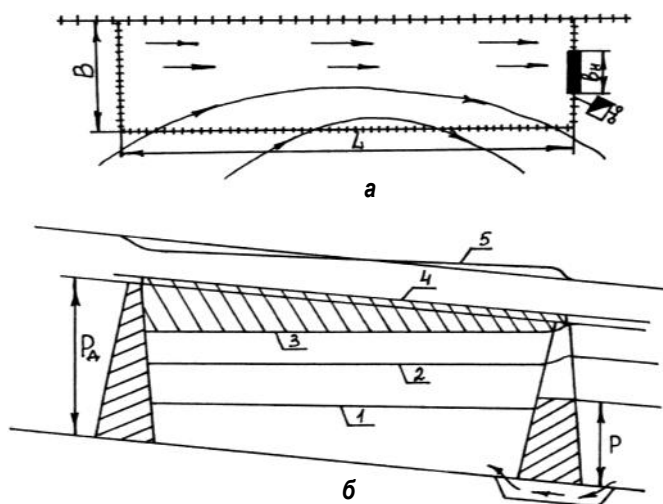
При расположении водослива-прорези в нижней поперечной дамбе общий период течения воды также делится на пять сроков. Первый из них – затопление только через трубу-водовпуск, второй – продолжение затопления через водовпуск и неподтопленное через водослив-прорезь, третий – затопление через трубу-водовпуск и подтопленное течение через водослив-прорезь, четвертый – затопление через гребни всех сооружений и трубу-водовпуск, пятый – транзитное течение воды через польдер (рис.3).

Глубина воды в польдере в первом периоде определяется приведенными уравнениями (5)-(7) в пределах подъема уровней на пойме до высоты водослива-прорези  $P$ .

Во втором периоде для расчета используется уравнение (9) при соблюдении условия (10). В этом периоде скорость на гребне водослива-прорези определяется уравнением (12).

При использовании уравнения (9) следует вместо  $b_в$  подставлять длину нижнего водослива-прорези  $b_n$ .

Третий период начнется с момента, когда подтопление водослива-прорези со стороны польдера  $\Delta_n$  начнет превышать критическую глубину  $h_{кр}$  на гребне. Расчет в этот период следует производить по уравнению (15) с заменой  $b_в$  на  $b_n$  и исполь-



$L$  – длина польдера;  $B$  – ширина польдера;  $b_n$  – длина нижнего водослива-прорези;  $P_d$  – высота дамбы;  $P$  – высота водослива-прорези

Рис.3. Схема затопления польдера с водосливом-прорезью в нижней поперечной дамбе: а – план (стрелками показано течение в пятом периоде); б – расчетные профили уровней в польдере. 1-4 – уровни, соответственно, в конце первого, второго, третьего, четвертого периода; 5 – уровень в пятом периоде

зовании зависимостей (6) и (7), выражающих график хода уровней на пойме. Продолжаться третий период будет до момента, когда уровень воды на пойме поднимется до гребней дамб  $H_2 = P_d$ . Скорость на гребне водослива-прорези следует определять уравнением (16).

Для расчета четвертого периода, соответствующего затоплению польдера через гребни затапливаемых дамб и водослив-прорезь, получена зависимость:

$$\frac{2 m_n \dot{B} + L \sqrt{2g}}{5a} \cdot H_{д}^{\frac{5}{2}} = H_{д} + 0,5iL \cdot \Omega \cdot h_{сп} \quad (21)$$

где  $H_{д}$  – напор над гребнем дамб в конце четвертого периода;  $a$  – скорость подъема горизонта на пойме в четвертом периоде.

Из уравнения (21) определяется неизвестная величина напора  $H_{д}$ . Более подробно расчет этого периода изложен в [6].

Максимальная скорость на гребнях дамб при неподтопленном течении определяется уравнением:

$$v = \varphi_{\kappa} \sqrt{2g \dot{H}_{д} - h_{сп}} \quad (22)$$

Подъем горизонта воды на пойме выше напора  $H_{д}$  вызовет транзитное течение воды через польдер, соответствующее пятому периоду [5].

**Расчет скорости на гребнях оградений при расположении водослива-прорези в средней части продольной дамбы**

При устройстве водослива-прорези в средней части продольной дамбы наблюдается также пять периодов течения воды, как в предыдущих случаях, но с некоторым отличием.

Первый период может рассчитываться по уравнению (5) совместно с зависимостями (6) и (7) и расчет ничем не отличается от предыдущих.

Второй период неподтопленного течения воды в польдер через водослив-прорезь может рассчитываться по уравнению (9) совместно с (6) и (7) при соблюдении условия (10), а также (23):

$$h_2 + 0,5iL_{н} \leq P_{д}, \quad (23)$$

где  $L_{н}$  – расстояние от середины водослива-прорези до нижней поперечной дамбы.

В уравнении (9) должна подставляться вместо  $b_в$  длина бокового водослива-прорези  $b_б$  (рис. 4).

При соблюдении условия (10), но несоблюдении (23) следует определить глубину на пойме  $H_2$  в конце второго периода из уравнения (9) при глубине в польдере у водослива-прорези:

$$h_2 = P_{д} - 0,5iL_{н}, \quad (24)$$

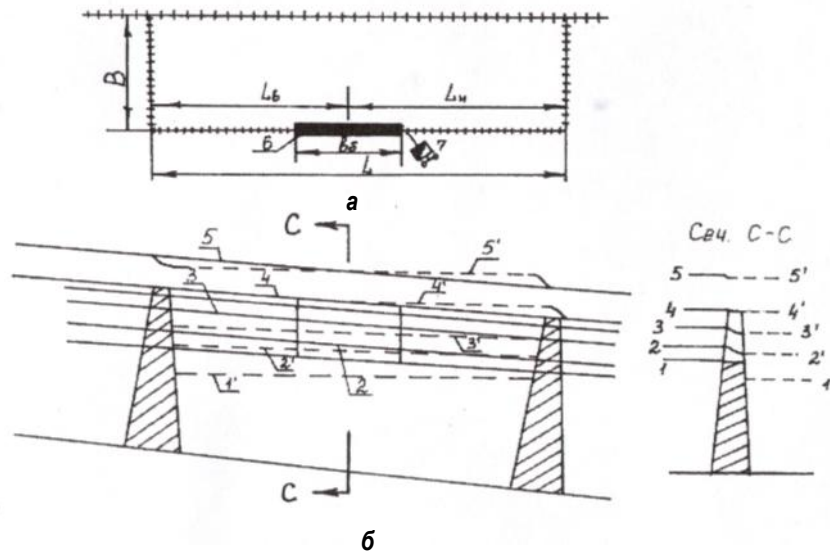


Рис.4. Схема затопления польдера с водослив-прорезью в средней части продольной дамбы: а – план затопляемого польдера; б – расчетные профили уровней на пойме и в польдере; 1 и 1' – соответственно уровень на пойме и в польдере в конце первого периода; 2 и 2' – уровень на пойме и в польдере в конце второго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

Скорость на гребне водослива-прорези в этом случае определяется уравнением (12).

Третий период – подтопленного течения воды в польдер через водослив-прорезь – может рассчитываться по уравнению (15) совместно с зависимостями (6) и (7) при замене  $b_s$  на  $b_6$  и при соблюдении условий (14) и (23). Этот период продлится до тех пор, пока глубина у нижней дамбы не станет равной ее высоте.

При подъеме уровней внутри польдера до гребня у нижней дамбы наступит четвертый период и будет продолжаться до того времени, пока уровень воды на пойме не поднимется до гребней дамб. В четвертом периоде одновременно с поступлением воды через 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:

$$t_2' - t_1 \left[ \mu \omega \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2 - h_1 + h_2}{2}} + \varphi_k b_6 \left( \frac{h_1 + h_2 - P}{2} \right) \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2 - h_1 + h_2}{2}} \right] -$$

$$- t_2' - t_1 \left[ m \cdot 0,5L_n + B \sqrt{2g} \cdot \left( \frac{h_1 + h_2 + iL_n - P_d}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right] = \Omega \cdot \bar{h}_2 - \bar{h}_1 \quad (25)$$



В уравнении (25) второе слагаемое в первых квадратных скобках выражает подтопленный расход через водослив-прорезь. Это условие требует при расчетах проверки, и если течение окажется неподтопленным, то следует вместо указанного слагаемого подставить расход неподтопленного течения:

$$Q_6 = m_{II} b_6 \sqrt{2g} \left( \frac{H_1 + H_2}{2} - P \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (26)$$

где  $Q_6$  – расход неподтопленного бокового водослива-прорези.

Дальнейший подъем уровней на пойме вызовет транзитное течение через польдер, соответствующий пятому периоду [5].

#### **Результаты расчета динамики скоростей на гребнях ограждений**

Полученные зависимости позволяют рассчитывать скорости на гребнях водосливов-прорезей и ограждающих дамбах в различные периоды затопления польдеров, находить их максимальные значения, основываясь на которых можно предусматривать мероприятия по предотвращению размывов.

Рассмотрим затопляемый польдер, характеризующийся следующими исходными данными: площадь затопления  $\Omega = 100$  га, высота ограждающих дамб  $P_d = 1,0$  м, высота водослива-прорези  $P = 0,7$  м, длина водослива-прорези  $b = 30$  м, польдер имеет прямоугольное положение шириной  $B = 500$  м и длиной 2000 м, уклон поверхности поймы  $i = 0,00005$ , в дамбе устроен трубчатый водовпуск с площадью отверстия  $\omega = 1,57$  м<sup>2</sup>, допустимая скорость на размыв  $v = 0,83$  м/с, польдер затопляется весенним половодьем.

Расчеты выполнены для польдеров при расположении водослива-прорези в верхней, нижней поперечных и в средней части продольной дамбах. Водовпуск принимался полностью открытым к началу выхода воды на пойму. В первый период расчетом устанавливалась глубина воды в польдере, соответствующая достижению уровнем воды на пойме отметки гребня водослива-прорези.

При продолжении роста уровней на пойме далее затопление происходило через водовпуск и водослив-прорезь (второй период). Расходы и скорости на гребне водослива-прорези возрастали во втором периоде до момента его подтопления.

Затем, после наступления подтопленного течения и росте уровней на пойме (третий период), скорости резко снижались. Затем вновь возрастали и снижались в следующие периоды в зависимости от степени подтопления ограждений. Результаты расчёта скоростей на гребнях ограждений для различного расположения водосливов-прорезей показаны на рис.5-7.

Максимальные скорости во втором периоде во всех вариантах польдеров были одинаковы. Но дальнейшая динамика скоростей отличалась, и скорости были значительно ниже при расположении водослива-прорези в нижней поперечной или в средней части продольной дамбы.

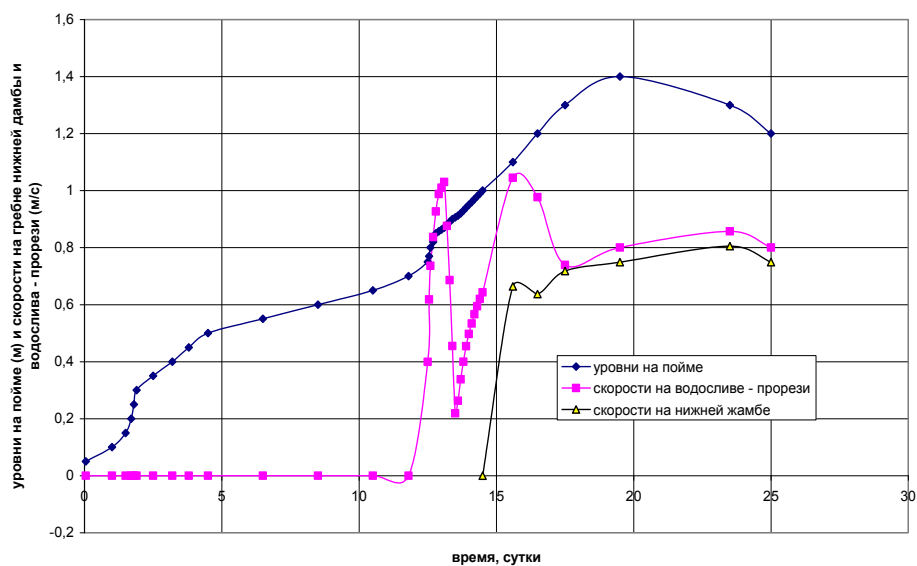


Рис.5. Динамика скоростей при расположении водослива-прорези в верхней дамбе

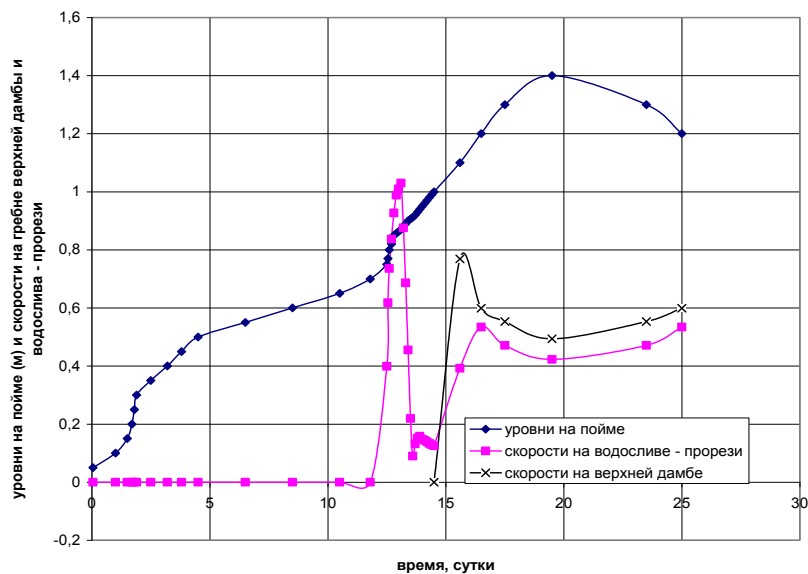
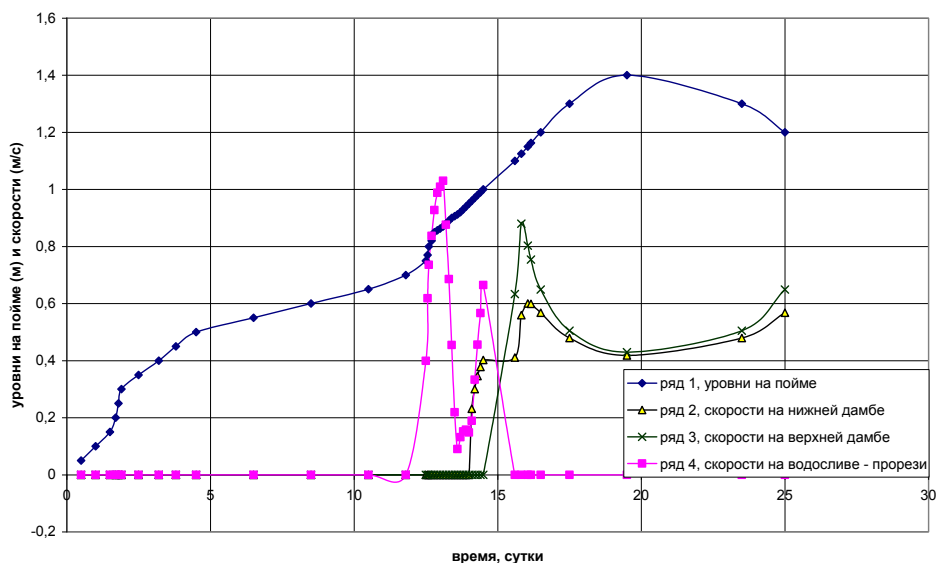


Рис.6. Динамика скоростей при расположении водослива-прорези в нижней дамбе

Анализ результатов формирования скоростей на гребнях ограждений показывает, что самым невыгодным является устройство водослива-прорези в верхней поперечной дамбе. В этом случае образуется два пика с высокими скоростями на водосливе-прорези (в примере  $v > 1,0$  м/с) и в период высоких вод скорость превышала значение допустимой на размыв  $v = 0,8$  м/с (см. рис. 5).

Наилучшим оказался вариант расположения водослива-прорези в нижней попе-



**Рис.7. Динамика скоростей при расположении водослива-прорези в боковой (продольной) дамбе**

речной дамбе. Здесь образуется только один пик со скоростью более 1,0 м/с. Скорость на верхней дамбе не превышала 0,8 м/с. В период высоких вод скорость на водосливе-прорези и верхней дамбе также не превышала 0,6 м/с (см. рис. 6).

### **Выводы**

1. На польдерах в зависимости от расположения водослива-прорези и периода затопления формируются различные скорости на гребнях ограждений. Максимальная скорость возникает на гребнях водосливов-прорезей во время перехода неподтопленного течения воды в подтопленное.

2. Для расчета динамики уровней и проверки дамб затапливаемых польдеров на размыв разработаны способы, которые позволяют определять глубины воды в бьефах ограждений и в последующем вычислить скорости на их гребнях.

3. Мероприятиями, снижающими максимальную скорость на гребнях ограждений, являются уменьшение площади польдера, увеличение пропускной способности (площади отверстий) водовпусков, увеличение длины водослива-прорези.

4. Расположение водослива-прорези в нижней или средней части ограждающих дамб способствует снижению скоростей по отношению к его расположению в верхней поперечной дамбе.

### **Литература**

1. Временные рекомендации по проектированию и использованию мелиоративных систем на пойменных землях длительного затопления. – Минск: БелНИИМВХ, 1983. – 32 с.
2. Русецкий, А.П. Экспериментальные исследования прохождения весеннего половодья через

- затапливаемый польдер «Бежеевский» / А.П.Русецкий, В.А.Полевой // Мелиорация и луговое хозяйство на пойменных землях. / БелНИИМил. – Минск, 1996. – С. 23-35.
3. Русецкий, А.П. Затапливаемые польдеры Белорусского Полесья. / А.П.Русецкий. – Минск, 2004. – 146 с.
  4. Агроскин, И.И. и др. Гидравлика / И.И. Агроскин, Г.Т. Дмитриев, Ф.И. Пикалов. – М., 1964. – 352 с.
  5. Станкевич, Н.Д. Обоснование высоты дамб польдеров с регулируемой длительностью затопления / Н.Д.Станкевич // Мелиорация и водное хозяйство. – 2008. – № 4. – С. 45-48.
  6. Русецкий, А.П. Проектирование водосливов-прорезей в затапливаемых польдерах / А.П.Русецкий, Н.Д.Станкевич // Природообустройство.– 2008. – № 5. – С. 48-52.

### **Summary**

#### **Rusetsky A. Rate Calculation on Weir-Opening Crests and Embankments of Drowned Polders**

Examined: Rate calculation on crests of weir-openings of drowned polders at arrangement of weir-openings at upper, lower transverse and middle part of longitudinal embankment. Stated: Dependences for approximate calculation of dynamics of levels in drowned polder and rates at weir-opening crest during flood. Proposals are given regarding the procedure of structural design of drowned polder, resistant to washout during flood.

*Поступила 26 марта 2009 г.*