

**Постановление Федерального горного и промышленного надзора России
от 5 июня 2003 г. N 51**

"Об утверждении Методических рекомендаций по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов"

Госгортехнадзор России постановляет:

1. Утвердить Методические рекомендации по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов.

2. Направить Методические рекомендации по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов на государственную регистрацию в Министерство юстиции Российской Федерации.

Начальник
Госгортехнадзора России

В.М.Кульчев

**Методические рекомендации по расчету развития гидродинамических аварий
на накопителях жидких промышленных отходов РД 03-607-03
(утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 5 июня 2003 г. N 51)**

Разработаны Управлением по надзору в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности Госгортехнадзора России

I. Общие положения

1.1. При аварии на хранилищах происходит разрушение ограждающих сооружений (дамб) и разлив содержимого хранилищ, вызывающий затопление окружающих территорий.

1.2. Опасность аварий определяется возникновением чрезвычайных ситуаций (ЧС): обстановки, которая может повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, материальные потери и нарушение жизнедеятельности людей.

1.3. Методика позволяет определить показатели, характеризующие аварию:

- границы зоны затопления;
- время образования прорана;
- размеры и форма развития прорана;
- расходы и объемы жидких отходов, выливаемых по мере развития прорана;
- высота, скорость и гидродинамическое давление волны прорыва по пути движения.

1.4. Методика предназначена для использования:

- организациями, эксплуатирующими хранилища;
- проектными организациями;
- экспертными центрами;
- другими организациями по роду своей деятельности связанными с обеспечением безопасности хранилищ;
- при декларировании безопасности гидротехнических сооружений (далее - ГТС);
- при определении последствий гидродинамической аварии;
- при определении возможности дальнейшей эксплуатации хранилищ и при других работах, в которых требуется оценка параметров прорана и зоны растекания при аварии хранилища.

II. Основные положения, принимаемые при расчете

2.1. Процесс разрушения хранилища, образования прорана и движения образующегося при этом потока отходов является сложным. Неравномерный и неустановившийся характер движения потока по всей трассе растекания обуславливают переменные значения его гидродинамических параметров, поэтому для упрощения расчетов рассматриваемый процесс разделяется в расчетном отношении на два этапа:

- а) расчет образования прорана и расчет параметров потока в сечении у подошвы откоса дамбы;
- б) расчет максимальных параметров потока по трассе растекания.

2.2. В Методике приняты следующие допущения:

- поперечное сечение прорана принимается прямоугольным и постоянным по всей длине прорана;
- после образования прорана жидкость растекается по местности, имеющей естественный уклон;

- гидравлический прыжок, возникающий на переходе потока с участка с уклоном дна, больше критического, на участок, где уклон меньше критического - не рассматривается.

III. Расчет образования прорана (процесса разрушения дамб)

3.1. В расчетах приняты следующие основные обозначения:

H_{\max}	- максимальная разница между отметкой гребня ограждающей дамбы и отметкой до которой могут вытекать жидкие отходы, м.
F	- площадь заполнения хранилища (определяется по графику зависимости площади (F) и объема (V) от уровня заполнения), м ² .
V_{\max}	- полный объем отходов в хранилище (определяется по графику зависимости F и V от уровня заполнения), м ³ .
l	- ширина гребня дамбы, м.
0	
m	- заложение внутреннего откоса дамбы (отношение длины отк. горизонтальной проекции откоса к высоте откоса), м/м.
n	- заложение внешнего откоса дамбы, м/м.
отк.	
ρ_s	- плотность частиц грунта, т/м ³ .
$\rho_{ож}$	- плотность жидкости и неконсолидированных отходов (жидких отходов), т/м ³ .
ρ_d	- средняя плотность сухого грунта тела дамбы, т/м ³ .
ν	- кинематический коэффициент вязкости жидкости и неконсолидированных отходов (жидких отходов), см ² /сек. (Для воды кинематический коэффициент вязкости равен 0,0101, см ² /сек).
d	- средневзвешенный размер частиц грунта, мм.

3.2. Исходными данными для расчета являются:

- максимальная разница между отметкой гребня ограждающей дамбы и отметкой, до которой жидкие отходы могут вытекать;
- зависимость площади и объема хранилища от отметки заполнения;
- ширина гребня дамбы;
- заложение внутреннего откоса дамбы;
- заложение внешнего откоса дамбы;
- плотность частиц грунта, плотность сухого грунта, плотность и вязкость вытекающих жидких отходов;
- средневзвешенный размер частиц грунта.

3.3. За начальные условия расчета размыва элементарного прорана принимается равенство

$$y_0 = b_0 = h_0 = 0,5 \text{ м}; \quad (1)$$

где: y_0 - начальная глубина прорана,
 b_0 - начальная ширина прорана,
 h_0 - начальная глубина потока.

На рис.1 представлена схема расчета размыва гребня и пляжной зоны хвостохранилища:

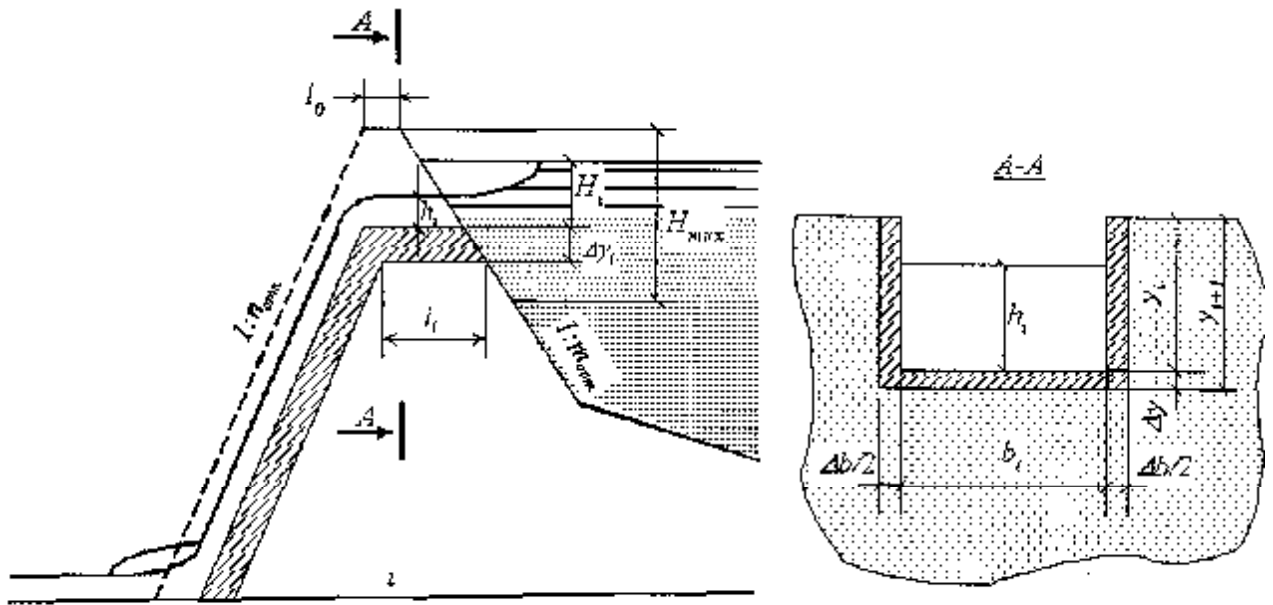


Рис. 1. Схема расчета размыва прорана.

Задавая приращение глубины прорана на каждом расчетном шаге постоянным и равным Дельта $y \leq y_0$, определяется приращение ширины прорана

$$\text{Дельта } b = \text{Дельта } y \times \frac{b_0}{y_0 + \text{Дельта } y}; \quad (2)$$

Задавая приращения размеров прорана (Дельта y и Дельта b) определяем уменьшение глубины вытекающего из прудка слоя Дельта H . Расчет ведется методом итераций.

Определение параметров размыва прорана и потока производится в расчетный i -ый промежуток времени:

$$\text{глубина прорана} \quad y = y_{i-1} + \text{Дельта } y; \quad (3)$$

$$\text{ширина прорана} \quad b = b_{i-1} + \text{Дельта } b; \quad (4)$$

$$\text{длина прорана (м)} \quad l = y_i \times (m_{\text{отк.}} + n_{\text{отк.}}) + l_0; \quad (5)$$

При достижении $y_i = H_{\text{max}}$ принимается, что увеличение прорана рассчитывается только за счет его расширения

$$b = b_{i-1} + \text{Дельта } b'; \quad (6)$$

$$\text{где Дельта } b' = 2,5 \times \text{Дельта } y \times \frac{y_0}{y_0 + \text{Дельта } y}; \quad (7)$$

$$\text{Глубина потока в проране (м):} \quad h = \frac{2}{3} \frac{H}{i}; \quad (8)$$

где H_i определяется по формуле (30).

Расход потока в проране (м³/с):

$$Q_i = m_i b_i H_i^{3/2} \times \text{кв.корень}(2g) ; \quad (9)$$

где m - коэффициент водослива, принимаемый равным 0,31.

Удельный расход потока в проране (м²/с):

$$q_i = \frac{Q_i}{b_i} = 1,373 \times H_i^{3/2} ; \quad (10)$$

Скорость потока в проране (м/с):

$$u_i = \frac{Q_i}{b_i h_i} = 2,056 \times H_i^{1/2} ; \quad (11)$$

Неразмывающая скорость u_0 (м/с) определяется для заданного значения d_{cr} и гидравлических параметров потока по зависимостям В.С.Кнороза:

для $0,05 \text{ мм} < d < 0,25 \text{ мм}$;

$$u_{0i} = 0,71 \frac{0,3 \text{ нью} (g \rho_j) d^{0,35} 0,05}{\text{кв.корень}(0,0008 + (0,006 R_i^{-0,25}))} ; \quad (12)$$

для $0,25 \text{ мм} < d < 1,5 \text{ мм}$;

$$u_{0i} = 1,8 \text{ нью} \frac{0,136 (g \rho_j)^{0,432} d^{0,292} \lg \frac{660 R_i^{0,7}}{0,35 (g \rho_j) d^{0,24} 1,81 k}}{j} ; \quad (13)$$

для $d > 1,5 \text{ мм}$;

$$u_{0i} = \text{кв.корень}(g \rho_j d) \lg(11,5 \frac{R_i}{k}) ; \quad (14)$$

где $k = 0,785 \times d^{0,75}$;

R_i - гидравлический радиус потока для прямоугольного сечения прорана, определяемый по формуле:

$$R_i = \frac{b_i h_i}{b_i + h_i}$$

$$R = \frac{i_i}{i_b + 2 \frac{h}{i_i}} \text{ (м);} \quad (15)$$

Для частиц грунтов с $d < 0,1$ мм при определении значения неразмывающей скорости необходимо учитывать силы сцепления между частицами грунта.

Неразмывающую скорость для связанных грунтов определяется по формуле:

$$u_{0i} = 1,25 \text{ кв.корень} \left(\frac{2gm}{2,6 \rho_{сж} n_{ж}} [(\rho_{сж} - \rho_{сжэ}) d + 0,044 C_{гр} k] \right); \quad (16)$$

где m - коэффициент условий работы, принимаем равным 1;

$d_{э}$ - эквивалентный диаметр отрывающихся отдельностей связанного грунта (для супесей $d_{э} = 3$ мм, для суглинков $d_{э} = 4$ мм, для глины $d_{э} = 5$ мм);

$C_{гр}$ - нормативная усталостная прочность связанного грунта на разрыв (Па): $C_{гр} = 0,35 C_{Н}$;

$C_{Н}$ - нормативное удельное сцепление грунта (Па);

k - коэффициент однородности, допускается принимать равным 0,5;

$$n_{ж} = 1 + \frac{d_{э}}{(0,00005 + 0,3 d_{э})};$$

Значение неразмывающей скорости определяется по справочнику проектировщика "Гидротехнические сооружения" (под ред. В.П.Недриги. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.).

Величина гидравлической крупности W_0 (м/с) для размываемых грунтов в проране определяется в зависимости от диаметра частиц грунта по формулам:

$$\text{при } d \leq 0,1 \text{ мм} \quad W_0 = \frac{g \times d^2 \times \rho_{сж}}{18 \times \eta_{ж}}; \quad (17)$$

$$\text{при } 0,1 \text{ мм} < d < 0,6 \text{ мм} \quad W_0 = d \times \left(\frac{g \times \rho_{сж}}{11,2 \times \text{кв.корень}(\eta_{ж})} \right)^{1/1,5}; \quad (18)$$

$$\text{при } 0,6 \text{ мм} < d < 2,0 \text{ мм} \quad W_0 = \left(\frac{1,2 \times g \times d \times \rho_{сж}}{4,4 \times \eta_{ж}} \right)^{1/1,8}; \quad (19)$$

$$\text{при } d \geq 2,0 \text{ мм} \quad W_0 = 1,2 \text{ кв.корень} (g \times d \times \rho_{сж}); \quad (20)$$

где g - ускорение силы тяжести ($g = 981 \text{ см/с}^2$).

Время размыва элементарного объема прорана (с):

$$\Delta t_i = \frac{2 \times \rho \times \Delta W_i}{d_i \times \mu_i \times Q_i}; \quad (21)$$

где ΔW_i - увеличение объема размываемого прорана (м³):

$$\Delta W_i = W_i - W_{i-1} = 0,5(b_{y1} - b_{y1})_{i-1}; \quad (22)$$

μ_i - транспортирующая (размывающая) способность потока.

В зависимости от гидравлических параметров потока и диаметра частиц размываемого грунта они могут переноситься потоком либо во взвешенном, либо в донном состоянии.

Если скорость потока $u_i \geq 2,7 u_{0i}$ и все частицы $d \leq 0,15$ мм (переносятся во взвешенном состоянии), то величина μ_i может быть определена как

$$\mu_i = \left(\frac{u_{KPi} - u_{0i}}{3 W_0} \right)^4 \times \left(\frac{d}{R_i} \right)^{1,6} \times 0,01; \quad (23)$$

где u_{KPi} - критическая скорость потока (м/с) определяется:

$$\text{при } y_i < H_{\max} \quad u_{KPi} = 2,63 \times h_i^{0,15}; \quad (24)$$

$$\text{при } y_i = H_{\max} \quad u_{KPi} = 3,77 \times h_i^{0,2}; \quad (25)$$

Если $u_i < 2,7 u_{0i}$ и все частицы $d > 0,15$ мм (движутся в донном режиме), то величина μ_i определяется по формуле

$$\mu_i = 0,002 \times \left(\frac{u_i}{\sqrt{gd}} \right)^3 \times \left(1 - \frac{u_{0i}}{u_i} \right) \times \left(\frac{d}{h_i} \right)^{1,25}; \quad (26)$$

где g - ускорение силы тяжести ($g = 9,81$ м/с²).

Объем жидкости, вытекающей из прудка за время Δt_i :

$$\Delta V_i = Q_i \times \Delta t_i = \frac{2 \times \rho \times \Delta W_i}{d_i \times \mu_i}; \quad (27)$$

Общий объем, вытекший за время $T = \sum \Delta t_i$:

$$= \sum \Delta V_i; \quad (28)$$

Понижение уровня в прудке:

ΔV

$$\text{Дельта } H_i = \frac{V_i}{F_i}; \quad (29)$$

Глубина слоя вытекающего из прудка:

$$H_i = H_{i-1} + \text{Дельта } y_i - \text{Дельта } H_{i-1}; \quad (30)$$

Глубину слоя вытекающего из прудка Дельта H_i можно также определить по графикам зависимости V и F от уровня заполнения.

При $i = 1$ принимаем, что $H_0 = y_0$ и Дельта $H_0 = 0$.

Расчет ведется до того момента, когда V_i достигает значения V_{\max} или величина транспортирующей способности μ_i , становится меньше 0,003.

IV. Определение параметров потока в сечении у подошвы откоса дамбы

Для определения значений скорости U и глубины h потока по внешнему откосу дамбы из результатов расчетов, полученных в п.2.2.3, выбираются:

- максимальное значение полного расхода Q_{\max} и соответствующие ему значения ширины b_{11} и глубины h_{11} (вариант 1);
- максимальное значение удельного расхода q_{\max} и соответствующие ему значения ширины b_{12} и глубины h_{12} (вариант 2);
- максимальное значение ширины прорана b_{\max} .

Расчет по выбранным параметрам производится одновременно для Q_{\max} и q_{\max} .

4.1. Для определения формы свободной поверхности потока необходимо сравнить величину нормальной глубины h_0 с критической глубиной $h_{\text{кр}}$ и уклона внешнего откоса дамбы $i_{\text{ВО}}$ с величиной критического уклона $i_{\text{кр}}$.

Определение критической глубины потока (м) (здесь и далее по тексту формулы в левой колонке относятся к первому варианту расчета, в правой - ко второму):

$$h_{\text{кр1}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_{\max}^2}{g b_{11}^3}};$$

$$h_{\text{кр2}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q_{\max}^2}{g}}; \quad (31)$$

где α - коэффициент кинетической энергии, принимается равным 1,1.
 g - ускорение силы тяжести ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Нормальная глубина h_0 потока вычисляется в процессе итерационной процедуры (подбором) по значению модуля расхода K_0 :

вычисляется модуль расхода:

$$K_{01} = \frac{Q_{\max}}{\sqrt[3]{i}}; \quad K_{02} = \frac{q_{\max}}{\sqrt[3]{i}}; \quad (32)$$

где $i_{\text{ВО}} = \frac{1}{n_{\text{отк}}}$;

Задавая различные значения h_1 (h_2) (здесь и далее по тексту значения параметров, указанных в скобках, относятся ко второму варианту расчета), определяем характеристики потока:

- площадь сечения (m^2)

$$\omega_1 = b_1 h_1; \quad \omega_2 = b_2 h_2; \quad (33)$$

- смоченный периметр потока

$$\chi_1 = b_1 + 2h_1; \quad \chi_2 = b_2 + 2h_2; \quad (34)$$

- гидравлический радиус

$$R_1 = \frac{\omega_1}{\chi_1}; \quad R_2 = \frac{\omega_2}{\chi_2}; \quad (35)$$

- коэффициент Шези

$$C_1 = \frac{1}{n_1} R_1^{1/6}; \quad C_2 = \frac{1}{n_2} R_2^{1/6}; \quad (36)$$

где n - коэффициент шероховатости, принимаемый равным 0,025;

- значение расчетного модуля расхода K_r :

$$K_{r1} = \omega_1 C_1 \sqrt[3]{R_1}; \quad K_{r2} = \omega_2 C_2 \sqrt[3]{R_2}; \quad (37)$$

Подставляя значения параметров, определяемых по уравнениям (33) - (36) в выражения (37), получим

$$K_{r1} = 40 \times b_1 \times h_1 \times \sqrt[3]{\frac{b_1 \times h_1^2}{K_{P1} + 2h_1}}; \quad K_{r2} = 40 \times b_2 \times h_2 \times \sqrt[3]{\frac{b_2 \times h_2^2}{K_{P2} + 2h_2}}; \quad (38)$$

Результаты расчетов и значения h_1 (h_2) заносятся в таблицу. Значение h_1 (h_2), при котором расчетный модуль расхода K_{r1} приблизительно = K_{01} (K_{r2} приблизительно = K_{02}), и будет значением нормальной глубины потока h_{01} (h_{02}).

Величина критического уклона определяется по формуле:

$$i_{кр1} = \frac{g \chi_{кр1}}{2 \alpha C_{кр1} b_{кр1}}; \quad i_{кр2} = \frac{g \chi_{кр2}}{2 \alpha C_{кр2} b_{кр2}}; \quad (39)$$

Подставляя значения параметров, определяемых по уравнениям (33) - (36) при $h = h_{кр}$, в (39), получим

$$i_{кр1} = 5,57 \times 10^{-3} \sqrt[3]{\frac{(b_{кр1} + 2h_{кр1})^4}{b_{кр1} \times h_{кр1}}};$$

$$i_{кр2} = 5,57 \times 10^{-3} \sqrt[3]{\frac{(b_{кр2} + 2h_{кр2})^4}{b_{кр2} \times h_{кр2}}}; \quad (40)$$

где $b_{кр1} = b_{11}$; $b_{кр2} = b_{12}$;

В зависимости от глубины потока в начале откоса h_{11} (h_{12}) и соотношения $i_{кр1} < i_{кр2}$ ($i_{кр1} > i_{кр2}$) и $h_{01} < h_{02}$ ($h_{01} > h_{02}$)

определяется форма свободной поверхности потока.

4.2. Определение глубины потока в сечении у подошвы откоса.

Из полученных значений h_{11} , h_{01} , $h_{кр1}$ (h_{12} , h_{02} , $h_{кр2}$) выбираются наибольшее и наименьшее значение глубины потока [h_{max1} , h_{min1} , (h_{max2} , h_{min2})] и вычисляется среднее значение:

$$h_{сп1} = \frac{h_{max1} + h_{min1}}{2}; \quad h_{сп2} = \frac{h_{max2} + h_{min2}}{2}; \quad (41)$$

Определяем длину откоса L, на которой устанавливается нормальная глубина h_{01} (h_{02}):

$$L_{1 \text{ отк.}} = h_{01} n_{21} \left[\eta_{21} - \eta_{11} - (1 - \bar{j}_1) [\Phi(\eta_{21}) - \Phi(\eta_{11})] \right];$$

$$L_{2 \text{ отк.}} = h_{02} n_{22} \left[\eta_{22} - \eta_{12} - (1 - \bar{j}_2) [\Phi(\eta_{22}) - \Phi(\eta_{12})] \right]; \quad (42)$$

$$\bar{j}_1 = 45 \times \sqrt[3]{\frac{b_{сп1}^4}{b_{кр1} \times h_{сп1}^4}};$$

$$\bar{j}_2 = 45 \times \sqrt[3]{\frac{b_{сп2}^4}{b_{кр2} \times h_{сп2}^4}};$$

где $b_{ch1} = b_{11}$, $b_{ch2} = b_{12}$;

η_{ij} - относительная глубина (для каждого из вариантов) определяется:

$$\eta_{11} = \frac{h_{\max 1}}{h_{01}}; \quad \eta_{12} = \frac{h_{\max 2}}{h_{02}}; \quad (44a)$$

$$\eta_{21} = \frac{h_{\min 2}}{h_{01}}; \quad \eta_{22} = \frac{h_{\min 2}}{h_{02}}; \quad (44б)$$

По величинам гидравлических показателей русла X_1 (X_2) и относительным глубинам находятся функции относительной глубины $\phi(\eta_{11})$, $\phi(\eta_{12})$ и $\phi(\eta_{21})$, $\phi(\eta_{22})$ (см. Приложение 1).

Гидравлический показатель русла определяется по формулам:

$$X_1 = 3,4 - \frac{2,8}{\frac{b_{CP1}}{h_{CP1}} + 2}; \quad X_2 = 3,4 - \frac{2,8}{\frac{b_{CP2}}{h_{CP2}} + 2}; \quad (45)$$

Полученные в (42) величины L_1 и L_2 сравниваются с длиной внешнего откоса дамбы L_0 . Если полученное значение $L_1 < L_0$ ($L_2 < L_0$), то считается, что глубина потока у подошвы откоса равна нормальной глубине $h_{01} = h_{11}$ и $h_{02} = h_{12}$. Если же значение $L_1 > L_0$ ($L_2 > L_0$), тогда, задавая $L_1 = L_0$ ($L_2 = L_0$), из уравнения (42) определяем глубину потока у подошвы откоса:

$$h_{01} = \frac{L_0}{n_{\text{отк.}} \left\{ \eta_{21} - \eta_{11} - \left(1 - \frac{1}{j}\right) [\phi(\eta_{21}) - \phi(\eta_{11})] \right\}};$$

$$h_{02} = \frac{L_0}{n_{\text{отк.}} \left\{ \eta_{22} - \eta_{12} - \left(1 - \frac{1}{j}\right) [\phi(\eta_{22}) - \phi(\eta_{12})] \right\}}; \quad (46)$$

4.3. Определение скорости потока в сечении у подошвы откоса дамбы.

Скорость U определяется по известному расходу и глубине потока в сечении у подошвы откоса:

$$u_1 = \frac{Q_{\max}}{b_1 h_{01}}; \quad u_2 = \frac{q_{\max}}{h_{02}}; \quad (47)$$

Из полученных расчетов из двух случаев выбираем максимальные значения параметров потока в сечении у подошвы откоса: глубины h_{\max} и скорости u_{\max} . Ширина потока в этом сечении принимается равной максимальной ширине прорана b_{\max} . Эти величины являются исходными для расчета движения потока по прилегающей к хранилищу местности.

V. Расчет максимальных параметров потока по трассе растекания

В зависимости от характера рельефа, вытекающий из хранилища поток может быть ограничен боковыми склонами долины, либо растекание может происходить нестесненным образом, если

хранилище расположено на плоской местности или в широкой долине.

Учитывая, что хранилища организаций подконтрольных органам Госгортехнадзора России в основном относятся к овражным, овражно-пойменным и/или равнинным типам, принимается, что вытекающий поток ограничен постоянным значением боковых склонов ложбин, лога или слабонаклоненных поверхностей поймы или равнины.

В расчете принято допущение о том, что лог по всей длине трассы растекания имеет треугольное сечение.

Для определения параметров потока по трассе растекания русло потока разбивается на участки с постоянными уклонами дна и формой поперечного сечения. На границах участков принимается условие равенства расходов. За расчетное принимается максимальное значение расхода потока $Q_{\Pi} = Q_{\max}$, полученное в результате расчета на первом этапе.

Для расчета площади сечения лога на концах выбранных участков задаются характерные абсолютные отметки бортов $A_{\text{Б}}$ и дна $A_{\text{Д}}$ лога (см. рис.2).

Для определения формул расчета скорости u_i , глубины h_i и ширины b_i потока вычисляются уклоны i -ых участков лога l_{i-1} :

$$l_{i-1} = \frac{A_{\text{Д}i-1} - A_{\text{Д}i}}{L_i};$$

где L - длина выбранного i -го участка лога.
 L_i

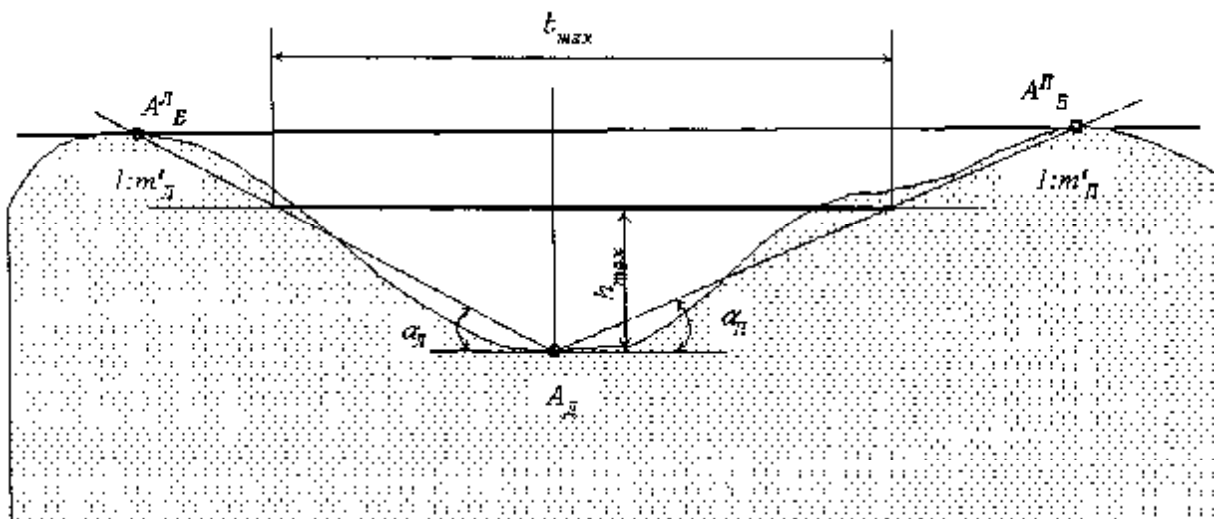


Рис. 2. Поперечное сечение лога.

Для плоского рельефа местности и уклонов с $l_{i-1} < 0,01$ параметры потока определяются:

- скорость потока $u_i = \frac{Q_{\Pi}}{b_{i-1} h_{i-1}} \times \left(1 - \frac{\bar{X}_i}{3,32 + \bar{X}_i} \right);$ (48)

- глубина потока $h_i = h_{i-1} \times \left(1 - \frac{\bar{X}_i}{3,32 + \bar{X}_i} \right);$ (49)

$$b_i = b_{i-1} \times (1 + 4,69 \times \frac{2,85 + \bar{X}_i}{i})^{0,6}; \quad (50)$$

где $\bar{X}_i = \frac{l_i \times \sqrt[3]{g \times h_{i-1}}}{b_{i-1} \times u_{i-1}}$ - относительное расстояние. (51)

Для уклонов $l_i > 0,01$ параметры потока в створах критическую $h_{кр}$ и нормальную $h(n)$ глубины в i -ом створе при расходе Q_{Π} определяются следующим образом:

$$h_{кр} = \sqrt[5]{\frac{2 \alpha Q_{\Pi}^2}{g m}}; \quad (52)$$

$$h_n = \sqrt[3]{\frac{2 Q_{\Pi}^2}{m C_i \sqrt[3]{R_i}}}; \quad (53)$$

где m - среднее заложение откосов лога в створе:

$$m = \text{ctg} \left(\frac{\alpha_l + \alpha_{\Pi}}{2} \right);$$

Так как коэффициент Шези C и гидравлический радиус R , зависят от глубины $h(n)$, то $h(n)$ определяется методом последовательных итераций. При этом C определяется по формуле (36), R по формуле (34).

В зависимости от соотношения глубин $h_{(i-1)}$, $h_{кр}$, $h(n)$ и уклона будем иметь кривую спада либо подпора. Исходя из уравнения Бернулли

$$h_{i-1} + \frac{\alpha U_{i-1}^2}{2g} + i l = h_i + \frac{\alpha U_i^2}{2g} + h_{TP}; \quad (54)$$

где $h_{TP} = \frac{U_{ср}^2}{2C_{ср} R_{ср}}$ - потери напора между створами

$$U_{ср} = \frac{U_{i-1} + U_i}{2}; \quad C_{ср} = \frac{C_{i-1} + C_i}{2}; \quad R_{ср} = \frac{R_{i-1} + R_i}{2};$$

$$\frac{2 Q_{\Pi}^2}{\Pi}$$

$U = \frac{Q}{h m}$ скорость потока в i -том створе;

$i = \frac{I}{L_i}$

определяем длину кривой свободной поверхности l :

$$l = \frac{h_i^2 - h_{i-1}^2 - 0,056(U_{i-1}^2 - U_i^2)}{2(U_{cp} - C_{cp} R_{cp})}; \quad (55)$$

где h_{i-1} - глубина в предыдущем створе.

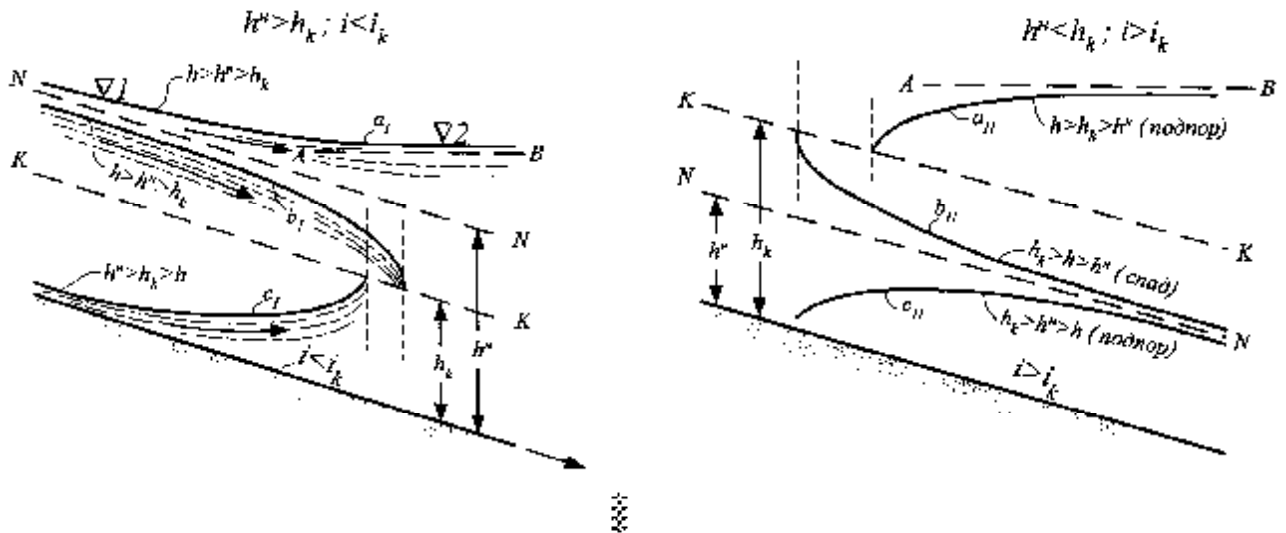


Рис. 3. Кривые свободной поверхности.

Если длина кривой l меньше расстояния между створами L_{li} , то h_i достигнет $h(n)$ или $h_{кр}$ и будет им равна (соответственно), в противном случае определяем глубину h_i , по формуле

$$h_i = h_{i-1} + \frac{(h_i - h_{i-1})l}{L_{li}}; \quad (56)$$

Площадь максимального затопления между створами определяем по формуле

$$S = \frac{h_{i-1}(m_{Л} + m_{П}) + h_i(m_{Л} + m_{П})}{2} L_{li}; \quad (57)$$

Расчет повторяется для следующего створа.

Гидродинамическое давление P_i на сооружения, расположенные на пути потока на расстоянии l

от подошвы дамбы, вычисляется по формуле:

$$P_i = \frac{2,7 \times \rho_{ж} \times u_i^2}{2} \text{ (Па);} \quad (58)$$

Для защиты объектов, попадающих в зону затопления можно с помощью защитных дамб отвести поток через какое-либо пропускное сооружение (водоотводной канал), находящегося на расстоянии l от подошвы дамбы, расчет которого ведется по условию пропуска максимального расхода потока Q_{Π} . Поперечное сечение S_K , обеспечивающее отвод потока, рассчитывается по значению скорости и в этом месте и по максимальному расходу:

$$S_K = \frac{Q_{\Pi}}{K \cdot u}; \quad (59)$$

Приведенные выше формулы позволяют рассчитать параметры потока по длине выбранной расчетной трассы движения на прилегающей к хранилищу местности, нанести их на соответствующий план или карту и определить границы зоны затопления.

Приложение 1

Функции относительной глубины $\phi(\text{эта}_{ij})$

	2,00*	2,50	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,50	5,00	5,50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,00**	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0,05	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
0,10	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
0,15	0.151	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
0,20	0.202	0.201	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
0,25	0.255	0.252	0.251	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
0,30	0.309	0.304	0.302	0.301	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300
0,35	0.365	0.357	0.354	0.352	0.351	0.351	0.351	0.350	0.350	0.350
0,40	0.423	0.411	0.407	0.404	0.403	0.403	0.402	0.401	0.400	0.400
0,45	0.484	0.468	0.461	0.458	0.456	0.455	0.454	0.452	0.451	0.450
0,50	0.549	0.527	0.517	0.513	0.510	0.508	0.507	0.504	0.502	0.501
0,55	0.619	0.590	0.575	0.570	0.566	0.564	0.561	0.556	0.554	0.552
0,60	0.693	0.657	0.637	0.630	0.624	0.621	0.617	0.610	0.607	0.605
0,61	0.709	0.671	0.650	0.642	0.636	0.632	0.628	0.621	0.618	0.615
0,62	0.725	0.685	0.663	0.654	0.648	0.644	0.640	0.632	0.629	0.626
0,63	0.741	0.699	0.676	0.667	0.660	0.662	0.652	0.644	0.640	0.637
0,64	0.758	0.714	0.689	0.680	0.673	0.668	0.664	0.656	0.651	0.648
0,65	0.775	0.729	0.703	0.693	0.686	0.681	0.676	0.668	0.662	0.659

0,66	0.792	0.744	0.717	0.706	0.699	0.694	0.688	0.680	0.674	0.670
0,67	0.810	0.760	0.731	0.720	0.712	0.707	0.700	0.692	0.686	0.681
0,98	0.829	0.776	0.746	0.734	0.725	0.720	0.713	0.704	0.698	0.692
0,69	0.848	0.792	0.761	0.748	0.739	0.733	0.726	0.716	0.710	0.704
0,70	0.867	0.809	0.776	0.763	0.753	0.746	0.739	0.728	0.722	0.716
0,71	0.887	0.826	0.791	0.778	0.767	0.760	0.752	0.741	0.734	0.728
0,72	0.907	0.843	0.807	0.793	0.781	0.774	0.766	0.754	0.747	0.740
0,73	0.928	0.861	0.823	0.808	0.796	0.788	0.780	0.767	0.760	0.752
0,74	0.950	0.880	0.840	0.823	0.811	0.802	0.794	0.780	0.773	0.764
0,75	0.972	0.899	0.857	0.839	0.827	0.816	0.808	0.794	0.786	0.776
0,76	0.996	0.919	0.874	0.855	0.843	0.832	0.823	0.808	0.799	0.788
0,77	1.020	0.939	0.892	0.872	0.860	0.848	0.838	0.822	0.812	0.801
0,78	1.045	0.960	0.911	0.890	0.877	0.865	0.854	0.837	0.826	0.814
0,79	1.071	0.982	0.930	0.908	0.895	0.882	0.870	0.852	0.840	0.828
0,80	1.098	1.006	0.950	0.929	0.913	0.900	0.887	0.867	0.854	0.842
0,81	1.127	1.031	0.971	0.947	0.932	0.918	0.904	0.882	0.869	0.857
0,82	1.156	1.056	0.993	0.968	0.951	0.937	0.922	0.898	0.884	0.872
0,83	1.188	1.082	1.016	0.990	0.971	0.956	0.940	0.915	0.900	0.888
0,84	1.221	1.110	1.040	1.013	0.992	0.976	0.960	0.933	0.917	0.904
0,85	1.256	1.139	1.065	1.037	1.015	0.997	0.980	0.952	0.935	0.921
0,86	1.293	1.170	1.092	1.062	1.039	1.019	1.002	0.972	0.953	0.938
0,87	1.333	1.203	1.120	1.088	1.065	1.043	1.025	0.993	0.972	0.956
0,88	1.375	1.238	1.151	1.116	1.092	1.069	1.049	1.015	0.992	0.975
0,89	1.421	1.276	1.183	1.146	1.121	1.097	1.075	1.039	1.014	0.995
0,90	1.472	1.316	1.218	1.179	1.152	1.127	1.103	1.065	1.038	1.017
0,905	1.499	1.338	1.237	1.197	1.169	1.143	1.117	1.079	1.050	1.028
0,910	1.527	1.361	1.257	1.216	1.186	1.159	1.132	1.093	1.063	1.040
0,915	1.557	1.385	1.278	1.236	1.204	1.176	1.148	1.108	1.077	1.053
0,920	1.589	1.411	1.300	1.257	1.223	1.194	1.165	1.124	1.091	1.066
0,925	1.622	1.439	1.323	1.279	1.243	1.214	1.184	1.141	1.106	1.080
0,930	1.658	1.469	1.348	1.302	1.265	1.265	1.204	1.159	1.122	1.095
0,935	1.696	1.501	1.374	1.326	1.288	1.257	1.225	1.178	1.139	1.111
0,940	1.738	1.535	1.403	1.352	1.312	1.280	1.247	1.198	1.157	1.128
0,945	1.782	1.571	1.434	1.380	1.338	1.305	1.271	1.219	1.176	1.146
0,950	1.831	1.610	1.467	1.411	1.367	1.332	1.297	1.241	1.197	1.165

0,955	1.885	1.653	1.504	1.445	1.399	1.362	1.325	1.265	1.220	1.186
0,960	1.945	1.701	1.545	1.483	1.435	1.395	1.356	1.292	1.246	1.209
0,965	2.013	1.756	1.591	1.526	1.475	1.432	1.391	1.324	1.275	1.235
0,970	2.092	1.820	1.644	1.575	1.521	1.475	1.431	1.362	1.308	1.265
0,975	2.184	1.895	1.707	1.632	1.575	1.525	1.479	1.407	1.347	1.300
0,980	2.297	1.985	1.783	1.703	1.640	1.587	1.537	1.460	1.394	1.344
0,985	2.442	2.100	1.881	1.795	1.727	1.666	1.611	1.525	1.455	1.400
0,990	2.646	2.264	2.018	1.921	1.844	1.777	1.714	1.614	1.538	1.474
0,995	3.000	2.544	2.250	2.137	2.043	1.965	1.889	1.770	1.680	1.605
1,005	2.997	2.139	1.647	1.477	1.329	1.218	1.107	0.954	0.826	0.730
1,010	2.652	1.863	1.419	1.265	1.138	1.031	0.936	0.790	0.680	0.598
1,015	2.450	1.704	1.291	1.140	1.022	0.922	0.836	0.702	0.603	0.525
1,020	2.307	1.591	1.193	1.053	0.940	0.847	0.766	0.641	0.546	0.474
1,025	2.197	1.504	1.119	0.986	0.879	0.789	0.712	0.594	0.503	0.435
1,030	2.107	1.432	1.061	0.931	0.827	0.742	0.668	0.555	0.468	0.402
1,035	2.031	1.372	1.010	0.885	0.784	0.702	0.632	0.522	0.439	0.375
1,040	1.966	1.320	0.967	0.845	0.747	0.668	0.600	0.494	0.416	0.353
1,045	1.908	1.274	0.929	0.810	0.716	0.638	0.572	0.469	0.394	0.334
1,05	1.857	1.234	0.896	0.779	0.687	0.612	0.548	0.447	0.375	0.317
1,06	1.768	1.164	0.838	0.726	0.640	0.566	0.506	0.411	0.343	0.290
1,07	1.693	1.105	0.790	0.682	0.600	0.529	0.471	0.381	0.316	0.266
1,08	1.629	1.053	0.749	0.645	0.565	0.497	0.441	0.355	0.292	0.245
1,09	1.573	1.009	0.713	0.612	0.534	0.469	0.415	0.332	0.271	0.226
1,10	1.522	0.969	0.680	0.583	0.506	0.444	0.392	0.312	0.253	0.210
1,11	1.477	0.933	0.652	0.557	0.482	0.422	0.372	0.293	0.237	0.196
1,12	1.436	0.901	0.626	0.533	0.461	0.402	0.354	0.277	0.223	0.183
1,13	1.398	0.872	0.602	0.512	0.442	0.384	0.337	0.263	0.211	0.172
1,14	1.363	0.846	0.581	0.493	0.424	0.368	0.322	0.250	0.200	0.162
1,15	1.331	0.821	0.561	0.475	0.407	0.353	0.308	0.238	0.190	0.153
1,16	1.301	0.797	0.542	0.458	0.391	0.339	0.295	0.227	0.181	0.145
1,17	1.273	0.775	0.525	0.442	0.377	0.326	0.283	0.217	0.173	0.137
1,18	1.247	0.755	0.510	0.427	0.364	0.314	0.272	0.208	0.165	0.130
1,19	1.222	0.736	0.495	0.415	0.352	0.302	0.262	0.200	0.158	0.124
1,20	1.199	0.718	0.480	0.400	0.341	0.292	0.252	0.192	0.151	0.118
1,21	1.177	0.701	0.467	0.388	0.330	0.282	0.243	0.184	0.144	0.113
1,22	1.156	0.685	0.454	0.377	0.320	0.272	0.235	0.177	0.138	0.108

1,23	1.136	0.670	0.442	0.366	0.310	0.263	0.227	0.170	0.132	0.103
1,24	1.117	0.656	0.431	0.356	0.301	0.255	0.219	0.164	0.126	0.098
1,25	1.098	0.643	0.420	0.346	0.292	0.247	0.212	0.158	0.121	0.094
1,26	1.081	0.630	0.410	0.337	0.284	0.240	0.205	0.152	0.116	0.090
1,27	1.065	0.618	0.400	0.328	0.276	0.233	0.199	0.147	0.111	0.086
1,28	1.049	0.606	0.391	0.320	0.268	0.226	0.193	0.142	0.107	0.082
1,29	1.033	0.594	0.382	0.312	0.261	0.220	0.187	0.137	0.103	0.079
1,30	1.018	0.582	0.373	0.304	0.254	0.214	0.181	0.133	0.099	0.076
1,31	1.004	0.571	0.365	0.297	0.247	0.208	0.176	0.129	0.095	0.073
1,32	0.990	0.561	0.357	0.290	0.241	0.202	0.171	0.125	0.092	0.070
1,33	0.977	0.551	0.349	0.283	0.235	0.197	0.166	0.121	0.089	0.067
1,34	0.964	0.542	0.341	0.277	0.229	0.192	0.161	0.117	0.086	0.064
1,35	0.952	0.533	0.334	0.271	0.224	0.187	0.157	0.113	0.083	0.061
1,36	0.940	0.524	0.328	0.265	0.219	0.182	0.153	0.109	0.080	0.058
1,37	0.928	0.516	0.322	0.259	0.214	0.177	0.149	0.106	0.077	0.056
1,38	0.917	0.508	0.316	0.253	0.209	0.173	0.145	0.103	0.074	0.054
1,39	0.906	0.500	0.310	0.248	0.204	0.169	0.141	0.100	0.072	0.052
1,40	0.896	0.492	0.304	0.243	0.199	0.165	0.137	0.097	0.070	0.050
1,41	0.886	0.484	0.298	0.238	0.195	0.161	0.134	0.094	0.068	0.048
1,42	0.876	0.477	0.293	0.233	0.191	0.157	0.131	0.091	0.066	0.046
1,43	0.866	0.470	0.288	0.229	0.187	0.153	0.128	0.088	0.064	0.045
1,44	0.856	0.463	0.283	0.225	0.183	0.150	0.125	0.085	0.062	0.044
1,45	0.847	0.456	0.278	0.221	0.179	0.147	0.122	0.083	0.060	0.043
1,46	0.838	0.450	0.273	0.217	0.175	0.144	0.119	0.081	0.058	0.042
1,47	0.829	0.444	0.268	0.213	0.171	0.141	0.116	0.079	0.056	0.041
1,48	0.821	0.438	0.263	0.209	0.168	0.138	0.113	0.077	0.054	0.040
1,49	0.813	0.432	0.259	0.205	0.165	0.135	0.110	0.075	0.053	0.039
1,50	0.805	0.426	0.255	0.201	0.162	0.132	0.108	0.073	0.052	0.038
1,55	0.767	0.399	0.235	0.184	0.147	0.119	0.097	0.065	0.045	0.032
1,60	0.733	0.376	0.218	0.170	0.134	0.108	0.087	0.058	0.039	0.027
1,65	0.703	0.355	0.203	0.157	0.123	0.098	0.079	0.052	0.034	0.023
1,70	0.675	0.336	0.189	0.145	0.113	0.090	0.072	0.046	0.030	0.020
1,75	0.650	0.318	0.177	0.134	0.104	0.083	0.065	0.041	0.026	0.017
1,80	0.626	0.303	0.166	0.124	0.096	0.077	0.060	0.037	0.023	0.015
1,85	0.605	0.289	0.156	0.115	0.089	0.071	0.055	0.033	0.020	0.013

1,90	0.585	0.276	0.147	0.108	0.083	0.066	0.050	0.030	0.018	0.011
1,95	0.567	0.264	0.139	0.102	0.078	0.061	0.046	0.027	0.015	0.009
2,0	0.550	0.253	0.132	0.097	0.073	0.057	0.043	0.025	0.013	0.008
2,1	0.518	0.233	0.119	0.086	0.064	0.049	0.037	0.021	0.012	0.007
2,2	0.490	0.216	0.108	0.077	0.057	0.043	0.032	0.018	0.010	0.006
2,3	0.466	0.201	0.098	0.069	0.051	0.038	0.028	0.015	0.008	0.005
2,4	0.444	0.188	0.090	0.063	0.046	0.034	0.024	0.013	0.007	0.004
2,5	0.424	0.176	0.082	0.057	0.041	0.031	0.021	0.011	0.006	0.003
2,6	0.405	0.165	0.076	0.052	0.037	0.028	0.019	0.010	0.005	0.003
2,7	0.389	0.155	0.070	0.048	0.033	0.025	0.017	0.009	0.005	0.002
2,8	0.374	0.146	0.065	0.044	0.030	0.022	0.015	0.008	0.004	0.002
2,9	0.360	0.138	0.060	0.040	0.027	0.020	0.013	0.007	0.004	0.001
3,0	0.346	0.131	0.056	0.037	0.025	0.019	0.012	0.006	0.003	0.001
3,5	0.294	0.104	0.041	0.026	0.017	0.012	0.008	0.004	0.002	0.001
4,0	0.255	0.084	0.031	0.019	0.012	0.008	0.005	0.002	0.001	0.000
4,5	0.226	0.070	0.025	0.014	0.009	0.007	0.004	0.002	0.001	0.000
5,0	0.203	0.059	0.020	0.010	0.007	0.005	0.003	0.001	0.000	0.000
6,0	0.168	0.047	0.014	0.007	0.004	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000
8,0	0.126	0.029	0.009	0.004	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
10,0	0.100	0.021	0.005	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000

* гидравлический показатель русла

** значение относительной глубины, определяемые # в п.2.3.2 по формулам 44(а) и 44(б)