

перехода произойдет дополнительное понижение отметок дна на ППМГ (около 10 см). В дальнейшем отметки дна будут понижаться до восстановления естественных уклонов дна и свободной поверхности. Общее понижение отметок дна на ППМГ за несколько лет может достигнуть 0,5 м. С учетом общей тенденции к размыву дна на участке ППМГ это является дополнительным фактором снижения эксплуатационной надежности магистрального газопровода и требует разработки мероприятий по его защите от воздействия неблагоприятных русловых деформаций. Полученные для конкретной реки результаты расчетов указывают на необходимость строгого соблюдения правил выбора местоположения карьеров в районе подводного инженерного сооружения, что обеспечит его надежную эксплуатацию.

Список использованных источников

1 Руководство по проектированию русловых карьеров. Мероприятия по предотвращению понижения уровня воды: утв. М-вом речного флота РСФСР 11.07.86. – М.: Транспорт, Ленингр. отд-ние, 1987. – 50 с.

2 Щербаков, А. О. Перенос и распределение взвеси в открытом потоке: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.09 / Щербаков А. О. – М., 1989. – 24 с.

3 Щербаков, А. О. Метод пофракционного расчета распределения наносов в русловом потоке / А. О. Щербаков, Г. Г. Ермаков // Мелиорация и водное хозяйство. – 2014. – № 5–6. – С. 69–73.

4 Беркович, К. М. Русловые процессы и русловые карьеры / К. М. Беркович. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 109 с.

5 Гидротехнические сооружения / Г. В. Железняков [и др.]; под общ. ред. В. П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.

УДК 626/627

Д. Т. Палуанов

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент,
Республика Узбекистан

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕЛИВА ВОДЫ ЧЕРЕЗ ГРЕБЕНЬ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ

На основе использования методов многофазных жидкостей моделируется перелив воды через гребень грунтовой плотины. Получен степенной закон распределения скоростей вблизи горизонтальной стенки (гребня плотины) и через дно плотины. Получены аналитические закономерности изменения толщины слоя воды в соответствующих областях течения (течения воды в верхнем бьефе до плотины, вблизи плотины, откосов верхнего и нижнего бьефов, над водосливной плотиной и на нижнем бьефе). Определены касательные напряжения вдоль свободной поверхности.

Ключевые слова: грунтовая плотина, течение потока, гидродинамическая модель, водослив, скорость, касательные напряжения.

D. T. Paluanov

Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

MODELING OF WATER OVERFLOW THROUGH THE EARTH DAM CREST

Water overflow through the earth dam crest using the methods of multiple fluids is simulated. A power law for the distribution of velocities near the horizontal wall (dam crest) and through the bottom of the dam is obtained. Analytical regularities of changes in water layer thickness in corresponding areas of the flow (water flows in the upstream to the dam,

near the dam, slopes of the upstream and downstream, above the overflow dam and on the downstream) have been obtained. Tangential stresses along the free surface are determined.

Key words: earth dam, stream flow, hydrodynamic model, weir, speed, tangential stress.

Аварии и повреждения плотин и причины, их вызывающие, могут быть самыми разнообразными. Многие ученые и специалисты анализируют аварии, дают их классификацию, приводят статистические данные. На основании анализа всех имеющихся данных установлено, что аварии и повреждения происходят главным образом в результате следующих воздействий:

- перелива воды через гребень плотины (30 %);
- сосредоточенной фильтрации через тело или основание (38 %);
- оползания и деформации откосов (15 %);
- землетрясений (7 %);
- волновых воздействий (5 %);
- прочих факторов (химической суффозии и т. д.).

Статический анализ показывает, что в настоящее время в мире зарегистрировано около 100 разрушений из-за перелива воды через гребень грунтовых плотин. Поэтому в эксплуатации грунтовой плотины перелив воды через гребень имеет особое значение. Перелив воды происходит при недостаточной пропускной способности водосбросных сооружений, что обусловлено занижением в проекте расчетного паводкового расхода, неполадками в затворах, водосливном тракте (особенно при туннельных водосливах) и пр.

При отсутствии на низовом откосе покрытия (особенно когда низовая призма сложена из несвязных песчаных грунтов) разрушение – размыв плотины может произойти весьма быстро на всю высоту сооружения на участке сравнительно небольшой протяженности. Чем мельче размываемый в плотине грунт, тем медленнее происходит размыв и тем более распластанной получается волна прорыва.

В данной статье рассматривается гидродинамическая модель течения потока воды, которое моделируется как течение над полигональным водосливом. Динамика потока воды резко меняет энергию потока.

Постановка задачи. Предположим, что слой воды, приближающейся к водосливу (область G_0 на бесконечности), вверх по течению равен H , скорость – V_A , соответственно, расход $Q_A = V_A \cdot H$. Область течения слоя воды разделим на пять смежных областей (рисунок 1):

G_0 – область течения потока воды, набегающей на водослив, здесь $\infty < x < x_B$, $0 < y < \delta_0(x)$, $\delta_0(x)$ – толщина слоя, м;

G_1 – область течения слоя воды над наклонной плоскостью BB_1 с толщиной $\delta_1(x)$ ($-x_B < x < x_B$, $0 < y < H + \delta_1(s) \sin \theta_B$, s – координата точек на стенке BB_1);

G_2 – область потока воды над вершиной водослива B_1C с толщиной $\delta_2(x)$, $-x_B \leq x \leq x_C$, $y = H$;

G_3 – область потока воды над наклонной поверхностью CD с толщиной слоя $\delta_3(x)$, $-x_C < x < x_D$, $0 < y < H + \delta_3(x_D) \sin \theta_D$;

G_4 – область потока воды над горизонтальной поверхностью DA за водосливом ($x_D < x < \infty$, $0 < y < \delta_4(x)$).

В областях G_0 , G_2 и G_3 будем иметь уравнение Навье – Стокса для воды в виде (где $\rho = \text{const}$ – плотность воды, кг/м³) [1]:

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \end{aligned} \right\}$$

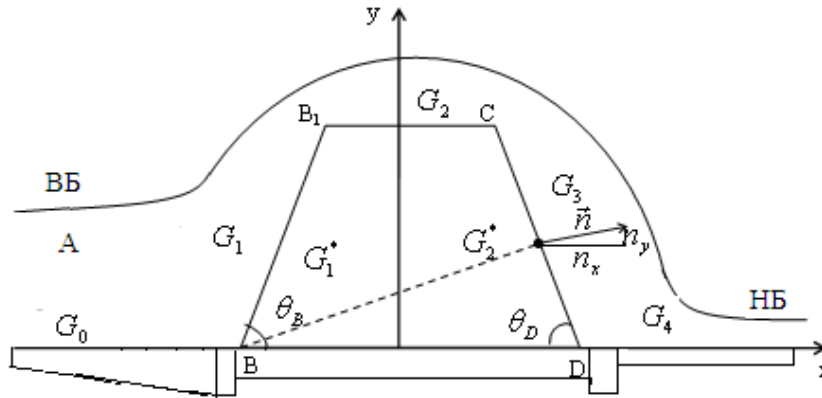


Рисунок 1 – Гидродинамическая модель течения потока воды через гребень грунтовой плотины

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0.$$

В областях G_1 и G_3 введем ортогональные координаты $\vec{\tau}$ и \vec{n} [2, 3].

С учетом криволинейности ($\vec{\tau}$) дна и нормального напряжения (\vec{n}) ко дну координаты s и n соответствуют точкам области G_1 и G_3 :

$$\left. \begin{aligned} \vec{\tau} &= n_y \vec{i} - n_x \vec{j} \\ \vec{n} &= n_y \vec{i} + n_x \vec{j} \end{aligned} \right\} \text{ в области } G_1,$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{\tau} &= -n_y \vec{i} + n_x \vec{j} \\ \vec{n} &= n_y \vec{i} + n_x \vec{j} \end{aligned} \right\} \text{ в области } G_3.$$

Запишем уравнения движения и неразрывности для областей G_1 и G_3 (дно потока криволинейно):

$$\left. \begin{aligned} u_s \frac{\partial u_s}{\partial s} + (1+kn)v \frac{\partial p}{\partial s} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \nu \frac{\partial}{\partial n} (1+kn) \frac{\partial u}{\partial n} - g \sin \theta_D \\ u_s \frac{\partial v_s}{\partial s} + (1+kn)v_n^2 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \nu \frac{\partial}{\partial n} (1+kn) \frac{\partial u_s}{\partial n} + g \cos \theta_D \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial s} + \frac{\partial [(1+kn)v_n]}{\partial n} = 0,$$

где ∂u_s – приращение скорости, соответствующее приращению координаты ∂s ;

$\frac{\partial u_s}{\partial s}$ – градиент скорости (определяет изменение скорости, приходящееся на единицу длины в направлении нормали к поверхности);

$\frac{\partial p}{\partial s}$ – градиент давления в направлении координаты s ;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Первое уравнение системы (1) с учетом уравнения неразрывности можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial s}(\rho u_s)^2 + \frac{\partial}{\partial n}[(1+kn)u_s v_n] = -\frac{\partial p}{\partial s} + v \frac{\partial}{\partial n}(1+kn) \frac{\partial u_s}{\partial n} - \rho g \sin \theta_D,$$

а для области G_0 , G_2 и G_3 уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)^2 + \frac{\partial}{\partial y}[uv] = -\frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - g \sin \theta_D. \quad (2)$$

Толщина слоя воды определяется известным методом интегральных соотношений, составленных по методу осреднения. Для области G_0 , G_2 и G_3 построим интегральное соотношение Кармана [2]:

$$\int_0^{\delta_k(x)} \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} dy + \int_0^{\delta_k(x)} \frac{\partial}{\partial y}(uv) dy = - \int_0^{\delta_k(x)} \frac{\partial p}{\partial x} + \int_0^{\delta_k(x)} v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (3)$$

Вне слоя воды предполагается, что имеется потенциальное течение идеальной жидкости. Распределение скоростей определяется как безотрывное обтекание водослива заданной формы [3]. Распределение скоростей вдоль свободной поверхности $V(x)$ определяется согласно интегралу Бернулли:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = U(x) \frac{dU}{dx}. \quad (4)$$

Вдоль свободной поверхности в областях G_1 и G_3 , где распределение скоростей выражается через ортогональные координаты, $V(s)$ имеет вид:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = U(s) \frac{dU}{ds}. \quad (5)$$

Для интегральных соотношений (3) для рассматриваемых областей запишем: в области G_0 из равенств (3) и (4) с учетом постоянства плотности $\rho = \text{const}$ имеем:

$$\int_0^{\delta_0(x)} U_0^2(x, y) dy + u_0 v_0 \Big|_0^{\delta_0(x)} = U U^* \delta_0(x) - \frac{\tau_0}{\rho} \Big|_{y=0},$$

где $\tau_0 = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$; $\frac{\tau_0}{\rho} = U^*$ – динамическая скорость потока.

После некоторых преобразований, т. е. для облегчения решения задач, имеем:

$$\frac{d}{dx} \left[\int_0^{\delta_0(x)} U_0^2(x, y) dy \right] - \frac{d\delta_0(x)}{dx} U_0^2(x) = U_0 U_0^* \delta_0(x) - \frac{\tau_0}{\rho} \Big|_{y=H}. \quad (6)$$

Таковыми же уравнения будут и для областей G_2 и G_4 . Выводим уравнения и для областей G_1 и G_3 . Для области G_1 из уравнений (5) и равенства (6) имеем:

$$\frac{d}{ds} \left[\int_0^{\delta_1(x)} U_1^2(s, n) dn \right] - \frac{d\delta_1(s)}{ds} U_1^2(s) = U_1 U_1^* \delta_1(s) - \frac{\tau_{01}}{\rho} \Big|_{n=1} - g \delta_1(s) \sin \theta_B. \quad (7)$$

Для области G_3 из равенства (2) и (7) имеем:

$$\frac{d}{ds} \left[\int_0^{\delta_3(s)} U_3^2(s, n) dn \right] - \frac{d\delta_3(s)}{ds} U_3^2(s) = U_3 U_3^* \delta_3(s) - \frac{\tau_{01}}{\rho} \Big|_{n=0} - g \delta_3(s) \sin \theta_D.$$

Таким образом, задачи приведены к определению распределения скоростей в области течения G_k ($k = 0; 1; 2; 3; 4$). Распределения скоростей в областях G_k имеют вид [3]:

$$U_k(s, n) = U_k(s) \left[a_0^k + a_1^k \eta_k + a_2^k \eta_k^2 + a_3^k \eta_k^3 + a_4^k \eta_k^4 \right], \quad (8)$$

где η_k определяется равенствами:

$$\eta_0 = \frac{n}{\delta_0(x)}, \quad \eta_1 = \frac{n}{\delta_1(x)}, \quad \eta_2 = \frac{n}{\delta_2(x)}, \quad \eta_3 = \frac{n}{\delta_3(x)}, \quad \eta_4 = \frac{n}{\delta_4(x)}.$$

Установим основные краевые условия для определения неизвестных коэффициентов выражений для распределения скорости a_n^k .

Всюду в областях G_k на твердых неподвижных границах удовлетворяются условия прилипания воды к твердой стенке:

$$u_k(s, 0) = 0. \quad (9)$$

На свободных поверхностях, когда $\eta_k = 1$:

$$\eta_k(s, \delta_k(s)) = U_k(s), \quad \left. \frac{\partial u_k(s, n)}{\partial n} \right|_{n=\delta_k(s)} = 0. \quad (10)$$

Из уравнений движения с учетом граничных условиях (9) и (10) определим условия для:

$$\left. \frac{\partial^2 u_k}{\partial n^2} \right|_{n=0} = \lambda_k, \quad \left. \frac{\partial^2 u_k}{\partial n^2} \right|_{n=1} = \lambda_k.$$

Учитывая полученные граничные условия для областей G_k , из равенства (8) будем иметь выражения для распределения скорости в областях G_0 , G_2 и G_4 ($k = 0; 2; 4$):

$$\hat{U} = \left[(2\eta - 2\eta^3 + \eta^4) + \left(\frac{1}{3}\eta - \eta^2 - \eta^3 + \frac{1}{4}\eta^4 \right) \lambda \right].$$

И в областях G_1 и G_3 :

$$\begin{aligned} \hat{U} = & \left(6 - \frac{\sin \theta_D}{3v} \left[\frac{g - UU^*}{U_0 \hat{U}_0} \right] \right) \eta - \left(4 + \frac{2 \sin \theta_D}{3v} \left[\frac{g - UU^*}{U_0 \hat{U}_0} \right] \right) \eta^3 - \\ & - \left(1 - \frac{\sin \theta_D}{3v} \left[\frac{g - UU^*}{U_0 \hat{U}_0} \right] \right) \eta^4 - \left(\frac{1}{3}\eta - \eta^2 + \frac{1}{3}\eta^3 - \frac{1}{4}\eta^4 \right) \lambda. \end{aligned}$$

Определим производные по x в областях G_0 , G_2 и G_4 или по s в областях G_1 и G_3 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_k}{\partial x} = & U'_k(x) \left[a_0^{(k)} + a_1^{(k)} \eta_k + a_2^{(k)} \eta_k^2 + a_3^{(k)} \eta_k^3 + a_4^{(k)} \eta_k^4 \right] + \\ & + U_k(x) \left[(a_0^{(k)})'_{x,s} + (a_1^{(k)})'_{x,s} \eta_k + (a_2^{(k)})'_{x,s} \eta_k^2 + (a_3^{(k)})'_{x,s} \eta_k^3 + (a_4^{(k)})'_{x,s} \eta_k^4 \right] + \\ & + U_k(x) \frac{d\delta_k}{d} \left[a_1^{(k)} + 2a_2^{(k)} \eta_k^2 + 3a_3^{(k)} \eta_k^2 + 4a_4^{(k)} \eta_k^3 \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда, интегрируя по $y(n)$ в пределах $0 \leq \tilde{\eta} \leq \eta$, $0 \leq \tilde{n} \leq n$, получим выражение для распределения нормальных скоростей в виде:

$$\begin{aligned} V_k(x, y) = V_k(s, n) = & U'_k(x) \partial_k(x) \left[a_0^{(k)} \eta_k + \frac{1}{2} a_1^{(k)} \eta_k^2 + \frac{1}{3} a_2^{(k)} \eta_k^3 + \frac{1}{4} a_3^{(k)} \eta_k^4 + \frac{1}{5} a_4^{(k)} \eta_k^5 \right] + \\ & + U_k(x) \partial_k(x) \left[(a_0^{(k)})'_{x,s} \eta_k + \frac{1}{2} (a_1^{(k)})'_{x,s} \eta_k^2 + \frac{1}{3} (a_2^{(k)})'_{x,s} \eta_k^3 + \frac{1}{4} (a_3^{(k)})'_{x,s} \eta_k^4 + \frac{1}{5} (a_4^{(k)})'_{x,s} \eta_k^5 \right] + \\ & + U_k(x) \partial_k(x) \left[\frac{a_1^{(k)}}{2} \eta_k^2 + \frac{2}{3} a_2^{(k)} \eta_k^3 + \frac{3}{4} a_3^{(k)} \eta_k^4 + \frac{4}{5} a_4^{(k)} \eta_k^5 \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Имея выражения для распределения скоростей (11) и (12) и интегральные соотношения для каждой области, получим обыкновенные дифференциальные уравнения для толщины каждого слоя $\delta_k(x)$ для областей U_k . Для этого определим $U_k^2(x, n)$:

$$u_k^2 = U_k^2(s) [a_0^{[k]} + a_1^{[k]} \eta_k + a_2^{[k]} \eta_k^2 + a_3^{[k]} \eta_k^3 + a_4^{[k]} \eta_k^4]. \quad (13)$$

Введя $k = 1; 3; 0; 2; 4$ и интегрируя $U_k^2(x, n)$ в отрезке $0 < y < \delta_k(x)$, имеем:

$$\int_0^{\delta_1} [u_k(x, y)]^2 dy = \delta_1 \int_0^1 [u_k(\eta)]^2 d\eta_k = \delta_k U_k^2(x) \int_0^1 \{U_k(\eta)\} d\eta_k = \delta_k(x) U_k^2(x) I_{0k}.$$

Пользуясь равенством (8), определяем:

$$\tau^{(x)} = \mu \frac{\partial U_k}{\partial y} = \mu \frac{\partial U_k}{\partial(\delta \eta)} = \mu \frac{1}{\delta_k(x)} \frac{\partial U_k}{\partial \eta} = \mu \frac{\partial U_k}{\delta_k(x)} [a_1^{(k)} + 2a_2^{(k)} \eta_k^2 + 3a_3^{(k)} \eta_k^2 + 4a_4^{(k)} \eta_k^3]. \quad (14)$$

Уравнение (6) с учетом распределения скоростей (8) для области G_0 , $k = 0$:

$$\eta = \frac{y}{\delta_0(x)}.$$

Вблизи горизонтальной стенки обычно задается степенной закон скорости $\hat{U}_0(\hat{x}) = |\hat{x}|^m$ вдали от водослива $m = \text{ctg} \theta_D$.

При $m = 1/7$ имеем:

$$\hat{\delta}_0(x) = \delta_0(-x_B) \sqrt{1 - \lambda_0 \frac{1}{1 - 0,03m} |\hat{x}|^{(1-m)} - |\hat{x}_B|^{1-m}}.$$

Далее определяются распределение скорости и толщины слоя в областях G_1 , G_2 , G_3 и G_4 :

$$\delta_2(x) = \delta_2(\hat{x}_{B1}) \sqrt{1 - \lambda_1 (\hat{x}^{1-m} - \hat{x}_{B1}^{1-m})}, \quad \delta_4(x) = \delta_4(\hat{x}_D) \sqrt{1 - \lambda_4 (\hat{x}^{1-m} - \hat{x}_D^{1-m})}.$$

Вдоль поверхности ВВ₁:

$$\delta_1(x) = \delta_1(\hat{x}_B) \sqrt{1 - \lambda_1 [|\hat{x}|^{1-m} - |\hat{x}_B|^{1-m}]}, \quad \delta_3(x) = \delta_3(\hat{x}_C) \sqrt{1 - \lambda_1 (\hat{x}^{1-m} - \hat{x}_C^{1-m})},$$

где $\delta_1(|\hat{x}_B|) = \delta_1(\hat{x}_B) / \cos \theta_B$, $\delta_3(\hat{x}_B) = \delta_4(\hat{x}_D) / \cos \theta_D = \delta_1(\hat{x}_C) / \cos \theta_D$.

Толщины слоев определяются равенствами в точках В, В₁, С, С₁.

Касательные напряжения вдоль поверхностей определяются следующим образом:

$$\tau_k = -\mu \frac{a_1^{(k)} U_A \hat{U}_0(x)}{H \hat{\delta}_k(x)}.$$

Используя выражения (8), (13) и (14), касательные напряжения определим следующим образом:

$$\tau = \mu \frac{U(s)}{\delta_k(s)} [a_1^{(k)} + 2a_1^{(k)} \eta_k + 3a_3^{(k)} \eta_k^2 + 4a_4^{(k)} \eta_k^3].$$

Выводы. На основе использования дифференциального уравнения получено распределение скоростей во всей области течения потока воды и степенной закон распределения скоростей вблизи горизонтальной стенки плотины.

Список использованных источников

1 Богомолов, А. И. Гидравлика: учеб. для вузов / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

2 Хамидов, А. А. Плоские и осесимметрические струйные течения идеальной несжимаемой жидкости / А. А. Хамидов. – Ташкент: Наука, 1978. – 139 с.

3 Хамидов, А. А. Теория струй многофазной вязкой жидкости / А. А. Хамидов, С. И. Худайкулов. – Ташкент: Фан, 2005. – 120 с.