

В.А. ШАБАНОВ

кандидат технических наук, профессор кафедры природоохранного и гидротехнического строительства
Самарский государственный архитектурно-строительный университет

К РАСЧЕТУ ПАВОДКОВЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ВОДОСБРОСОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПОРЕ

ABOUT CALCULATING FLOODWATER FILTER SPILLWAYS OPERATING AT VARIABLE PRESSURE

С целью снижения пиков паводков, вероятности наступления экологических и экономических рисков предлагается строить буферные водохранилища.

Разработана приближенная, теоретически обоснованная формула расчета пропускной способности фильтрующего водосброса при переменном напоре.

Ключевые слова: паводковый водосброс, фильтрация линейная и квадратичная, напорная функция, скорость фильтрации при переменном напоре, приближенное решение.

В последние годы на реках ряда регионов, особенно в северных, необжитых районах страны, замечено повышение интенсивности паводков, несущих разрушение водоподпорным сооружениям, выполненным из грунтовых материалов.

С целью снижения пиков паводков, снижения вероятности наступления экологических и экономических рисков предлагается строить буферные водохранилища на притоках основной реки. В качестве плотин на таких гидроузлах можно использовать фильтрующие дамбы или иные сооружения, имеющие фильтрующие вставки. Эти дамбы или вставки могут работать в автоматическом режиме.

Расчет одного варианта фильтрующего водопропускного сооружения предлагается ниже.

In order to reduce flood peaks, environmental and economic risks it is offered to build buffer reservoirs. The approximate theoretically proved formula for calculating the capacity of the filter spillway at variable pressure has been derived.

Key words: floodgate, linear and square-law filtration, pressure ability, seepage velocity in case of variable pressure, approximate solution.

Рассмотрим фильтрующий элемент в виде цилиндрической трубы, заполненной крупнообломочным грунтом. В обычном состоянии уровень верхнего и нижнего бьефов равны и движения воды не происходит. При прохождении паводка уровень верхнего бьефа повышается и начинается процесс фильтрации. В данном случае имеем дело с неустановившейся нелинейной фильтрацией. Предположим, что повышение уровня верхнего бьефа является функцией времени. Предположим также, что во время прохождения пика паводка расход в реке остается постоянным. В этом случае повышение уровня будет также зависеть от формы поперечного сечения русла. Для прямоугольного русла повышение уровня пропорционально первой степени времени: $h(t) = h_0 t$.

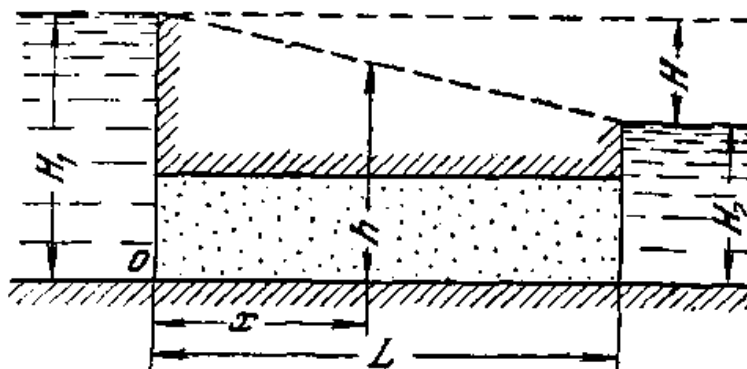


Рис. 1

Для треугольного русла: $h(t) = h_0 t^5$.

Вообще, зависимость уровня от времени можно найти используя кривую связи уровней и расходов.

Известно, что течение жидкости в крупнопористой среде является турбулентным, а сопротивление движению пропорционально квадрату скорости. Оно описывается уравнением Краснопольского:

$$v = k\sqrt{J}, \quad (1)$$

где k - коэффициент фильтрации;

J - градиент напора, равный $\frac{H}{L}$.

В рассматриваемом случае движение будет одномерным, неустановившимся и для прямоугольного русла оно описывается уравнением движения:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{g v^2}{k^2} = \frac{gh}{L} t = Hct, \quad (2)$$

где $h=h(t)$ - текущий напор, напорная функция.

$Hc = const$ - постоянная, учитывающая расход и форму русла.

Уравнение сплошности для одномерного потока запишется так:

$$\frac{dv}{dx} = 0. \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что скорость фильтрации зависит только от времени и не зависит от координаты x . Значит, уравнение (2) является обыкновенным дифференциальным уравнением первого

порядка. Его решение выражается через функцию Эри и представлено ниже:

$$v = \frac{\left(-\frac{gHc}{k^2}\right)^{1/3} \left(\sqrt{3} \operatorname{AiryAi} \left(1, -\left(-\frac{gHc}{k^2}\right)^{1/3} t \right) + \operatorname{AiryBi} \left(1, -\left(-\frac{gHc}{k^2}\right)^{1/3} t \right) \right) k^2}{g \left(\sqrt{3} \operatorname{AiryAi} \left(-\left(-\frac{gHc}{k^2}\right)^{1/3} t \right) + \operatorname{AiryBi} \left(-\left(-\frac{gHc}{k^2}\right)^{1/3} t \right) \right)}. \quad (4)$$

AiryAi и AiryBi являются линейно независимыми решениями для дифференциального уравнения $w'' - z^*w=0$.

$$\operatorname{AiryAi}(z) = c1 * 0F1(; 2/3; z^{3/9}) - c2 * z * 0F1(; 4/3; z^{3/9}),$$

$$\operatorname{AiryBi}(z) = 3^{1/2} * [c1 * 0F1(; 2/3; z^{3/9}) + c2 * z * 0F1(; 4/3; z^{3/9})],$$

где $0F1$ - обобщенная гипергеометрическая функция,

$$c1 = \operatorname{AiryAi}(0) \text{ и } c2 = -\operatorname{AiryAi}'(0).$$

Двухаргументная форма записи функции Эри используется для представления её производной, например, $\operatorname{AiryAi}(1, x) = D(\operatorname{AiryAi})(x)$ и $\operatorname{AiryBi}(1, x) = D(\operatorname{AiryBi})(x)$.

Был рассмотрен численный пример с использованием ПСМ Maple 10.

Зависимость скорости от времени, полученная в примере, представлена на рис. 2.

Предложенная формула (3) громоздка для практических расчетов.

Нами найдено приближенное решение (4), которое отличается от точного только в начальный момент времени.

$$v = k\sqrt{Ht}. \quad (4)$$

10^{-3}

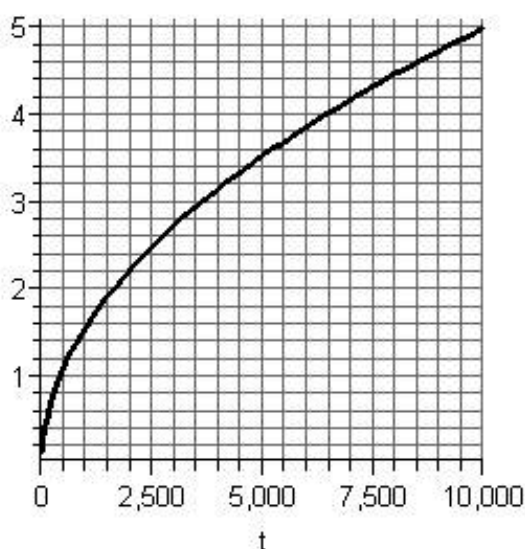


Рис. 2

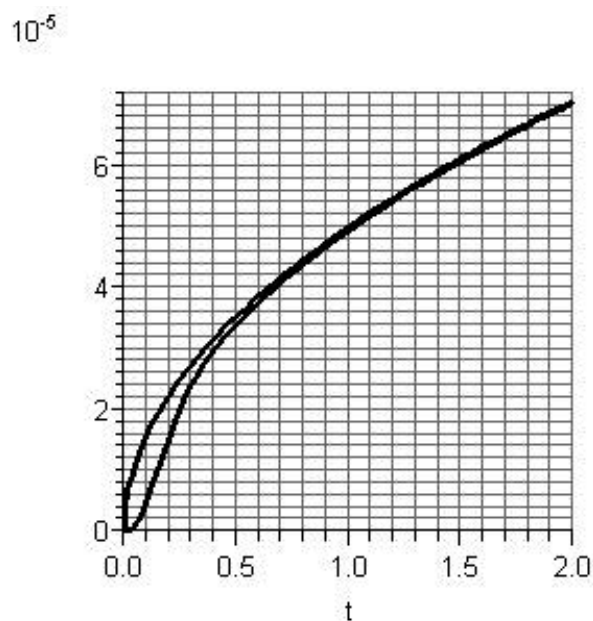


Рис. 3

Сравнение двух решений по формулам (3) и (4) представлено на рис. 3.

Как видно, приближенное решение (верхняя кривая) отличается от точного решения (нижняя кривая) только в начальный момент времени.

Расход через фильтрующий водосброс в любой момент времени можно вычислить по формуле

$$Q = \omega \cdot k \sqrt{H \cdot t},$$

где ω - площадь поперечного сечения водосброса.

Вывод. Предложена приближенная, теоретически обоснованная формула расчета пропускной способности фильтрующего водосброса при переменном напоре.

© Шабанов В.А., 2012