

УДК 628.5

Колотило В.Д., Нетюхайло А.П., Исакиева О.Г.

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ОТКРЫТЫХ ШИРОКИХ КАНАЛОВ, ЗАРОСШИХ ГИБКОЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

Разработка методов гидравлических расчетов не утратила своей актуальности. В последние годы доказано, что каналы, заросшие водной растительностью, могут очищать воду при движении воды в слое растительности. В связи с этим необходимо провести исследования пропускной способности при движении воды над растительным слоем, а также в растительном слое.

Проведенные гидравлические исследования [1] показали, что пропускная способность растительного слоя значительно ниже, чем в потоке воды над растительным слоем. Рассмотрим систему уравнений движения, сплошности и переноса кинетической энергии турбулентности

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'^2} - \overline{w'^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$U \frac{\partial b}{\partial x} + W \frac{\partial b}{\partial z} = -\alpha_a \nu_t \frac{\partial b}{\partial z} + K_v \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial z} \right) - C_1 \frac{b^2}{\nu_t}, \quad (3)$$

где U, W – горизонтальные и вертикальные компоненты осредненных скоростей; b – удельная кинетическая энергия турбулентности; C_1 – универсальная постоянная; ν_t – турбулентная вязкость; x, z – продольная и вертикальная компоненты координат.

Система уравнений (1)-(3) незамкнута. Воспользуемся гипотезой А.Н. Колмогорова [2,3]

$$\nu_t = C_1^{1/4} \sqrt{bL}, \quad (4)$$

где L – интегральный масштаб турбулентности, определяемый с помощью момента корреляции пульсации продольной скорости.

Схема турбулентного течения вблизи шероховатой стенки в виде растительного слоя представлена на рис.1.

Предположим, что область толщиной h имеет скорость, стремящуюся к нулю. Над границей h происходит рост осредненной продольной скорости. Будем предполагать, что растительный слой включает в себя придонный слой.

Напряжение трения представим в виде

$$\frac{\tau}{\rho} = u_*^2 \left(1 - \frac{z-h}{H-h} \right). \quad (5)$$

Напряжение трения $\frac{\tau}{\rho}$ в соответствии с гипотезой Буссинеска [2,3]

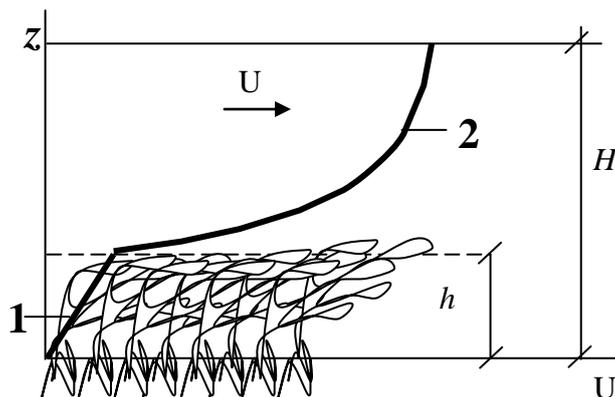


Рисунок 1 – Профили осредненной скорости в (1) и над (2) растительным слоем

$$\frac{\tau}{\rho} = (v + v_t) \frac{dU}{dz} \quad (6)$$

Профиль скорости может быть определен из зависимости

$$\frac{U}{u_*} = C + \int_0^{\infty} \left[\frac{d\bar{z}}{1 + \frac{v_t}{v}} - \frac{(\bar{z} - \bar{h})d\bar{z}}{\frac{H - \bar{h}}{\ell_*} \left(1 + \frac{v_t}{v}\right)} \right]. \quad (7)$$

Постоянная интегрирования:

$$C = -\frac{1}{\kappa} \ln \frac{\alpha_\ell}{z_0}, \quad (8)$$

где κ – постоянная Кармана; \bar{h} – толщина вытеснения; z_0 – параметр шероховатости; $\alpha_\ell = 30$ соответствует безразмерной скорости на верхней границе буферного слоя, т.е. $\frac{1}{\kappa} \ln 30 = 8,48$.

Решение имеет вид:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30\kappa(z-h)}{z_0} + 1 \right). \quad (9)$$

Проинтегрировав зависимость (9), получена формула для расхода Q и средне-расходной скорости U_m

$$Q = U_m (H - h) b = \frac{z_0 u_*}{30\kappa^2} \varphi(\ln \varphi - 1); \quad (10)$$

$$Q = \frac{z_0 u_*}{30\kappa^2 (H - h)} \varphi(\ln \varphi - 1). \quad (11)$$

Здесь $\varphi = \frac{30\kappa(z-h)}{z_0} + 1$ – функция безразмерного расхода.

Для линейного распределения скоростей в растительном слое (вязком подслое), как правило, используется зависимость вида [3]

$$\frac{U}{u_*} = \frac{u_* z}{\nu}, \quad (12)$$

т.е. скорость пропорциональна вертикальной координате z ($u \sim z$).

В данном случае, когда рассматривается поток в слое гибкой донной растительности, профиль осредненной скорости можно выразить следующим образом:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{z}{z_0}, \quad (13)$$

где z_0 – параметр шероховатости или динамическая шероховатость.

Для параметра шероховатости есть формула [2]

$$z_0 = b \frac{u_*^2}{g}, \quad (14)$$

где b – постоянная величина.

В соответствии с теорией размерности это дает основание использовать параметр шероховатости z_0 в качестве нормирующей длины (вместо динамической длины l_*) для получения линейной зависимости для профиля скорости в слое гибкой растительности (в вязком подслое).

Расход в слое гибкой растительности будет иметь вид:

$$Q_p = \int_0^{h_p} U(z) dz = \int_0^{h_p} \frac{z}{z_0} dz = \frac{u_* z^2}{2z_0}. \quad (15)$$

Подставив в полученную формулу соответствующие значения z , получаем незначительные значения расхода в слое растительности. При этом следует еще учесть тот факт, что водотоки, в основном, зарастают растительностью не полностью, а частично. Следовательно, при определении пропускной способности водотоков с гибкой донной растительностью расходом в растительном слое можно пренебречь. Такой вывод подтверждается многими работами. Затопленный растительный слой рассматривается как условное дно, скорость в растительном слое условно принимается равной нулю.

Литература

1. Боровков В.С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. – Л.: Гидрометиздат, 1989. – 286 с.
2. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Часть I. – М.: Изд-во «Наука», 1965– 640 с.
3. Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978.– 160 с.