

ПУЛЬСАЦИОННАЯ СТРУКТУРА ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В ИСКРИВЛЕННЫХ КАНАЛАХ

Турбулентным моделям переноса концентрации потоке посвящены множество работ. Известные модели учитывают только силы плавучести и их применения в практических целях ограничены. Это касается турбулентных русловых течений рек, где реки имеют поворотные зоны и изгибы. В настоящее время такое детальное исследование имеет практически интерес для правильного понимания и расчета оседания концентраций вещества не только за счет архимедовых сил, но и за счет центробежных сил, появляющихся на поворотах и изгибах русловых потоков. Первая попытка учесть влияния кривизны канала на структуру пульсации примеси была предпринята, где были сформулированы и получены алгебраические уравнения для моментов второго порядка. При этом учитывается кривизна потока, где радиус – вектор совпадает с направлением силы тяжести. Это несколько упрощает задачу, так как общие взаимодействия силы тяжести и центробежной силы, вызванные кривизной канала выглядит так

$$f = \left(g \pm \frac{U^2}{R} \right) \frac{\rho' q}{\rho}$$

Но такой учет кривизны применим только для прямого канала с буграми и ямами на дне канала. Практический интерес представляет течения в реках с поворотными зонами, где центробежная сила действует в горизонтальной плоскости, а сила тяжести в вертикальной плоскости. Уравнения для моментов второго порядка переноса примеси в искривленных русловых потоках, записанные для

полностью развитого турбулентного сдвигового течения, с учетом центробежной силы и сил плавучести имеют вид

$$\overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + k \frac{\sqrt{E}}{l} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} E \right) + \frac{2}{3} c \delta_{ij} \frac{E^{3/2}}{l} + \quad (1)$$

$$+ \frac{U_1}{R} \delta_{3i} \overline{u_1 u_j} - \frac{U_1}{R} \delta_{1i} \overline{u_3 u_j} + \alpha g (\delta_{2i} \overline{q u_j} + \delta_{2j} \overline{q u_i}) = 0$$

$$\overline{u_k q} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_k} + \overline{u_i u_k} \frac{\partial Q}{\partial x_k} + k_q \frac{\sqrt{E}}{l} \overline{u_i q} + g \delta_{3i} \alpha \overline{q^2} = 0$$

$$\overline{u_k q} \frac{\partial Q}{\partial x_k} + c_q \frac{q^2 \sqrt{E}}{l} = 0$$

Решение уравнений (1) представляется в виде двух сомножителей, первый из которых совпадает с выражением соответствующей величины в однородной среде, а второй учитывает влияние центробежных сил и сил плавучести одновременно, связанных с кривизной потока и наличием архимедовых сил

$$u_2^2 = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{c}{k} \right) \frac{1}{c^{2/3}} l^2 \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right)^2 \cdot \Omega_1$$

$$\Omega_1 = \frac{\psi^2 \left(\psi^2 - \alpha \cdot \frac{k}{c_q} \cdot Rq \right)}{\left(\psi^2 - \alpha \cdot \frac{k}{c_q} \cdot Rq - 2\alpha \cdot Rq \right)} \quad (2)$$

$$-u_1 u_3 = l^2 \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right)^2 \cdot \Omega_2 \quad \quad \Omega_2 = \frac{\psi^3 (1 + De)}{(\psi^2 - 6\alpha \cdot De + 4\alpha \cdot De^2)}$$

$$u_3^2 = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{c}{k} \right) \frac{1}{c^{2/3}} l^2 \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right)^2 \cdot \Omega_3$$

$$\Omega_3 = \frac{\psi^2 (\psi^2 - 4\alpha \cdot De + 6\alpha \cdot De^2)}{(\psi^2 - 6\alpha \cdot De + 4\alpha \cdot De^2)}$$

$$u_1^2 = \frac{2}{3} \left(1 + 2 \frac{c}{k} \right) \frac{1}{c^{2/3}} l^2 \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right)^2 \cdot \Omega_4$$

$$\Omega_4 = \frac{\psi^2 \left[\frac{2}{3} \left(1 + 2 \frac{c}{k} \right) \cdot \psi^2 - \frac{4}{3} \left(4 + 5 \frac{c}{k} \right) \cdot \alpha \cdot De + \frac{4}{3} \left(1 + 5 \frac{c}{k} \right) \cdot \alpha \cdot De^2 \right]}{\frac{2}{3} \left(1 + 2 \frac{c}{k} \right) \cdot (\psi^2 - 6\alpha \cdot De + 4\alpha \cdot De^2)}$$

$$-u_2 q = l^2 \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x_2} \right) \cdot \Omega_5 \quad \Omega_5 = \frac{\psi^3}{\left(\psi^2 - \alpha \cdot \frac{k}{c_q} \cdot Rq - 2\alpha \cdot Rq \right)}$$

$$-u_1 q = \sqrt{\alpha} \cdot l^2 \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x_2} \right) \cdot \Omega_6 \quad \quad q^2 = \sqrt{\alpha} \cdot \frac{k}{c_q} \cdot l^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x_2} \right)^2 \cdot \Omega_7$$

$$\Omega_6 = \Omega_7 = \frac{\psi^2}{\left(\psi^2 - \alpha \cdot \frac{k}{c_q} \cdot Rq - 2\alpha \cdot Rq\right)}$$

$$E = \frac{1}{c^{2/3}} l^2 \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right)^2 \cdot \psi^2 \quad \quad \psi = \sqrt{\left(\frac{\Phi}{2} \right)^2 - \Theta} - \frac{\Phi}{2}$$

$$\Phi = -1 - \left(\frac{3}{2} + 6\alpha \right) \cdot De + \left(4\alpha - \frac{1}{2} \right) \cdot De^2 - \left(\alpha \cdot \frac{k}{c_q} + 2\alpha + 1 \right) \cdot Rq$$

$$\Theta = \left(1 + \frac{3}{2} De + \frac{1}{2} De^2 - 4\alpha \cdot De^2 + 6\alpha \cdot De \right) \left(\alpha \cdot \frac{k}{c_q} + 2\alpha \right) \cdot Rq - Rq(4\alpha \cdot De^2 - 6\alpha \cdot De)$$

безразмерный локальный параметр кривизны

$$De = \frac{U_1 / R}{\left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right)}$$

безразмерное число Ричардсона

$$Rq = \frac{\alpha g \frac{\partial Q}{\partial x_3}}{\left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right)^2}$$

$$k = \sqrt{\frac{c}{k}} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{k}{c} - 1 \right) \right]^{3/4}, \quad c = \left(\frac{c}{k} \right)^{3/2} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{k}{c} - 1 \right) \right]^{3/4}$$

$$\sqrt{\alpha} = \frac{1}{k^2} \frac{2}{3} \left(1 - \frac{c}{k} \right)$$

Полученная модель турбулентности позволяет замкнуть основные уравнения для движения и рассчитать приближенно пульсационные характеристики течения с примесью в слабо искривленных каналах. Как видно из (2) для модели не требуется дополнительной информации и эмпирических констант.