ISSN 1680-080X

Қазақ бас
сәулет-құрылыс
академиясы

Казахская головная
архитектурно-строительная
академия

ХАБАРШЫ

ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

1(55)

АЛМАТЫ - 2015

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛЫ

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ЭКОЛОГИЯ

ГУМАНИТАРНЫЕ И ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

7. *Колесниченко А.В., Марченко А.И., Побежимова Т.П., Зыкова В.В. Процессы биодеградации в нефтезагрязненных почвах. – М.: «Промэкобезопасность», 2004. – 194 с.*
8. *Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Сахаров Г.Н. Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение. – 2003. – № 9. – С. 1132-1140.*
9. *Мусина У.Ш. Васичкин А.С. Обзор способов утилизации нефтеотходов и технологий их утилизации // Вестник КазНТУ. – № 5. – 12 с.*
10. *Логинов О.Н., Силишев Н.Н., Бойко Т.Ф., Галимзянова Н.Ф. Биотехнологические методы очистки окружающей среды от техногенных загрязнений – Уфа: Гос. изд. научно-тех. лит. «Реактив», 2000. – 100 с.*
11. *Казиева А.А., Мелякина Э.И. Сравнительная оценка различных доз биопрепарата для очистки нефтезагрязненных почв // Вестник АГТУ. – 2014. – №2. – 54-58 с.*

УДК 626.3.626.312
Молдамуратов Ж.Н., PhD докторант ТарГУ им. М.Х. Дулати, г. Тараз

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАНОСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Изучение динамических свойств наносных отложений малых, твердых или жидких частиц в форме аэро- и гидрозолей, суспензий или взвесей, имеет на оросительных каналах большое значение. Экспериментальные и теоретические исследования такой задачи сопряжены с большими трудностями, тем не менее, с такого рода условиями очень часто приходится сталкиваться при эксплуатации гидротехнических сооружений.
Ключевые слова: *модель, каналы, заиление, наносы, турбулентность.*

Суландыру каналдарындағы аэро- және қоспалы сұйықтықтар, суспензия және ілеспе заттар түріндегі шағын, қатты немесе сұйық бөлшекті тасындылық шөгінділердің динамикалық қасиеттерін зерттеудің маңызы жоғары. Мұндай мәселелердегі тәжірибелік және теориялық зерттеулер үлкен қиыншылықтарымен күрделенеді, сонда да, осыған ұқсас жағдайлармен гидротехникалық құрылымдарды пайдалану кезінде жиі кездесуге тура келеді.
Түйін сөздер: *модель, каналдар, лай басу, тасындылар, турбуленттілік.*

The study of the dynamic properties of alluvial deposits of small, solid or liquid particles in the form of aerial and hydrosols, suspensions or slurries, has on irrigation canals of great importance. Experimental and theoretical studies of this problem involves great difficulties, however, with this kind of conditions often encountered in the operation of hydraulic structures.
Keywords: *model, channels, siltation, sediment, turbulence.*

Изучение поведения наносов при вполне развитой турбулентности очень важно для рассмотрения движения наносов в каналах, представляющих собой взвеси ила и песка разной дисперсности.

В реальных потоках на оросительных каналах, когда равновесие на уровне z, поддерживается плотностью наносов равной своему среднему значению q, их движение описывается [1, 2] полуэмпирическим уравнением турбулентной диффузии, полученное осреднением уравнений молекулярной диффузии с учетом гравитации потоков массы наносов:

$$Lq = \frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i q}{\partial x_i} - \nu_м \Delta q + \frac{1}{\rho}\frac{\partial Q_k}{\partial z} = Q(t), \tag{1}$$

где q – концентрация наносов в воде, г/л; x_i=(x, y, z) – координаты (абсцисса, ордината, аппликата); $\bar{u} = (u, v, w)$ – вектор скоростей в направлении x, y, z соответственно (м/с); ρ – плотность (г/м^3); $Q_к$ – поток массы наносов под действием гравитации; $Q(t)$ – интенсивность наносов (м^3/сек); $\nu_м$ – молекулярная вязкость. Лапласиан определяется следующим выражением:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \tag{2}$$

Сделаем некоторое упрощение в уравнении (2) по смыслу постановки задачи:

пренебрежем членами $v\frac{\partial q}{\partial x}$, $w\frac{\partial q}{\partial z}$ в силу того, что поперечное сечение мало, а вертикальное течение отсутствует;

в силу того, что молекулярная вязкость очень мала, тогда $\nu_м \Delta q \approx 0$; поток наносов определим с помощью аппроксимации градиентного типа, т.е.

$$\overline{U_i' q_i'} = K\frac{\partial q}{\partial x_i}, \tag{3}$$

после этих упрощений уравнение седиментации наносов имеет вид:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u\frac{\partial q}{\partial x} - w_g \frac{\partial q}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial Q_k}{\partial z} = Q(t). \tag{4}$$

Интенсивность I осаждения наносов на дно канала, и накопленная масса определяется по формуле:

$$I = \pi \rho q_0 R, \; F = \int_0^t I(t')dt', \tag{5}$$

где $w_g(R)$ – скорость седиментации наносов со средним размером R, мкм; q_0 – концентрация наносов на дне канала; R и ρ – ее радиус и плотность соответственно; δ и η – плотность и вязкость воды.

$$w_g(R) = \frac{g(\rho - \delta)R^2}{9\eta}. \tag{6}$$

Принимая наносы во взвешенном состоянии (для малого времени), как вязкость наносов, будет иметь следующий вид:

$$\eta = \eta_0 (1 + \gamma q), \tag{7}$$

где γ=2,5; η_0 – вязкость воды без наносов.

Рассмотрим наносы с объемной концентрацией q_1, достаточно малой, чтобы поток воды с частицами можно было считать однородной жидкостью в том смысле, что при добавлении малой концентрации частиц q_2 можно пользоваться формулой (7). Затем для приращения вязкости dη, запишем следующее выражение

$$\eta + d\eta = \eta(1 + 2{,}5q_2)\,. \tag{8}$$

Повторяя этот процесс до конечной величины концентрации, находим

$$\frac{d\eta}{dq} = \frac{2{,}5\eta}{1-q}\,. \tag{9}$$

Решение уравнения (9) имеет вид:

$$\eta = \eta_0(1-q)^{-2,5}\,, \tag{10}$$

которое для сильно разряженных наносов приводится к формуле (7).

Объем потока наносов приближенно можно определить по формуле:

$$Q_k = -\frac{4}{3}\pi\rho_k N\int_0^{+\infty} r^3 f(r,z,t)\cdot v(r)dr\,, \tag{11}$$

где $v(r)$ – скорость выпадения частиц радиусом r; $f(r,z,t)$ – функция распределения частиц по крупности (общее число в 1 см^3).

Для разной дисперсности функция распределения условно описывается следующей зависимостью:

$$f(r,z,t) = \frac{\alpha r^2}{r_m(z,t)} l^{-\frac{2r}{r_m(z,t)}}\,, \tag{12}$$

где $0{,}3 \le \alpha \le 0{,}65$, r_m – модальный радиус; N – число частиц в единице объема.

Краевые условия для уравнения (4) в общем случае имеют вид:

- на уровне шероховатости z_0 (м) примем

$$\kappa_q\frac{\partial q}{\partial n} + w_g Sin\varphi = \beta q\,, \tag{13}$$

где κ_q – коэффициент турбулентности на уровне z_0; w_g – скорость седиментации, м/с; β – коэффициент поглощения, c^{-1}; φ – уклон канала;

- на поверхности воды задаются следующие условия:

$$q = q_0(x, o) \text{ или (при } z = -z_T), \tag{14}$$

где q_0 – частицы, транспортируемые к каналу;

- по x зададим свободные условия:

$$\left.\frac{\partial q}{\partial x}\right|_{x=-X} = 0, \quad \left.\frac{\partial q}{\partial x}\right|_{x=+X} = 0, \tag{15}$$

$\pm X$ – начало и конец канала, (м);

- начальное условие имеет вид:

$$q = q_н\,(o, x),$$

где $q_н$ – известная функция (измерения).

Таким образом, мы получили замкнутую модель. Уравнения [3] с краевыми условиями аналитически представляют очень трудную задачу. Поэтому на практике часто применяют численные методы. При численном моделировании к поведению наносов в каналах предъявляются дополнительные требования к конечно-разностным аппроксимациям и методам решения уравнения (4).

Поскольку концентрация наносов является неотрицательной величиной, целесообразно использовать так называемые «монотонные» схемы, позволяющие получать неотрицательные решения. Для построения вычислительного алгоритма решения воспользуемся методом расщепления по физическим процессам и на каждом малом интервале времени $[t_j, t_{j+1}]$ (j=0,1,…,J) рассмотрим схему, состоящую из трех этапов. При этом нас интересует распределение осредненных, по ячейкам сеточной области значений концентрации наносных отложений. Итак, согласно [4] рассмотрим схему расщепления:

перенос наносов по траекториям

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u\frac{\partial q}{\partial x} - w_g\frac{\partial q}{\partial z} = 0, \tag{16}$$

турбулентную диффузию наносных отложений

$$\frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial q}{\partial z} = 0, \tag{17}$$

локальные преобразования (наносов)

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial Q_k}{\partial z} = Q(t). \tag{18}$$

Такое представление модели распределения наносов упрощает ее реализацию с помощью програмного компьютерного обеспечения. Решение каждого предыдущего этапа в момент времени $t=t_j$ служит начальным условием для последующего этапа в момент $t=t_{j+1}$. Для решения уравнения (16) рассмотрим следующую схему Борис-Бука:

1. Расчет конвективных и диффузионных значений $\tilde{q}_i$ (на примере трехточечной явной схемы алгоритма SHASTA):

$$\tilde{q}_i = q_j^l - \frac{1}{2}\left[\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}(q_{i+1}^l + q_i^l) - \varepsilon_{i-\frac{1}{2}}(q_i^l + q_{i-1}^l\right] +$$

$$+\left[\upsilon_{i+\frac{1}{2}}(q_{i+1}^l + q_i^l) - \upsilon_{i-\frac{1}{2}}(q_i^l - q_{i-1}^l)\right], \tag{19}$$

где $\varepsilon_{i+\frac{1}{2}} \approx U_{i+\frac{1}{2}}\frac{\tau}{\Delta x}\upsilon\left(\upsilon_{i+\frac{1}{2}} \geq \frac{1}{2}\left|\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}\right|\right)$ – безразмерые коэффициенты переноса и диффузии, подлежащие оптимизации.

2. Вычисление грубых антидиффузионных потоков Φ:

$$\Phi_{i+\frac{1}{2}} = \mu_{i+\frac{1}{2}}(\tilde{q}_{i+1} - \tilde{q}_i). \tag{20}$$

3. Вычисление скорректированных потоков Ф из условия

$$\Phi_{i+\frac{1}{2}} = S_{\max}\left\{0, \min\left[S(\tilde{q}_{i+1} - \tilde{q}_{i+1}), \left|\Phi_{i+\frac{1}{2}}\right|, S(\tilde{q}_i - \tilde{q}_{i-1}\right]\right\}, \tag{21}$$

где $|S| = 1$, $\quad signS = sign(q_{i+1} - q_i)$.

4. Расчет нового значения q_i^{j+1} по определенной антидиффузии

$$q_i^{j+1} = \overline{q}_i - \Phi_{i+\frac{1}{2}} + \Phi_{i-\frac{1}{2}}. \tag{22}$$

Уравнение решается трехточечной неявной конечно-разностной схемой следующего вида:

$$\frac{q_i^{j+1} - q_i^j}{\tau} = \frac{K_{i+\frac{1}{2}}(q_{i+1}^{j+1} - q_i^{j+1}) - K_{i-\frac{1}{2}}(q_i^{j+1} - q_{i-1}^{j+1})}{\Delta x^2}. \tag{23}$$

Для решения конечно-разностной схемы применяется общеизвестный метод прогонки, алгоритм которого записывается в следующем виде:

$$\alpha_{i+1} = \frac{b_i}{c_i - a_i\alpha_i}; \quad \rightarrow \quad \beta_{i+1} = \frac{a_i\beta_i - f_i}{c_i - \alpha_i a_i}; \quad \rightarrow \quad i = 1, \hat{N} - 1; \alpha_1 = \chi_1,$$

$$q_N = \frac{\mu_2 + \chi_2\beta_N}{1 - \alpha_N\chi_2}; \rightarrow \quad q_i = \alpha_{i+1}q_{i+1} + \beta_{i+1}; \quad \rightarrow \quad \overline{i = N-1, \ 0},$$

Изучение поведения наносов при вполне развитой турбулентности очень важно при рассмотрении движения водных потоков, представляющих собой взвеси ила и песка.

Если рассмотреть [5] участок канала, где течение турбулентное, то каждая фракция (по размеру) распределяется в канале по экспоненциальному закону увеличения концентрации по глубине. В реальных потоках, равновесие на уровне *y*, на котором движение поддерживается плотностью наносов, равной своему среднему значению $\overline{q}$, справедливо следующее соотношение:

$$B\overline{q} + A\frac{d\overline{q}}{dy} = 0, \tag{24}$$

где *B* – скорость свободного падения частиц, *A* – коэффициент турбулентного обмена или вихревая вязкость $\left(\nu = l^2\left|\frac{du}{dy}\right|\right)$,

Если выполняется экспоненциальный закон, то

$$Ln\frac{n_0}{n} = \frac{B}{A}y, \tag{25}$$

где *n* – число единиц фракций.

Практические результаты этих экспериментов будут представлены в следующих статьях в виде зависимости $Ln(n_0/n)$ от глубины *h* для средних размеров частиц различных фракций. Тот факт, что теоретические исследования подтверждаются с достаточной для этих экспериментов точностью, доказывает пропорциональность оседания величин *n*.

Рассмотрение переноса наноса, состоящих из сферических зерен одинакового размера и удельного веса, образующих неплотно уложенное дно канала, течение в котором может быть ламинарным или турбулентным в зависимости от числа Рейнольдса (*Re*).

Таким образом, в данном эксперименте градиент скорости на дне был основной переменной величиной. Эксперименты проводились в канале с поперечным сечением 1,5; 2,8; 3,5 м, длина рабочей части составляла от 10 до 25 м. При самой маленькой скорости заметного отрыва частиц не происходило; при промежуточной скорости начинался перенос осадка, хотя течение воды было еще ламинарным; при самой большой скорости появилась общая турбулентность, и осадки быстро перемещались. Численные эксперименты с перемещениями наносных отложений по глубине канала вполне адекватны эффекту Магнуса, так как они лежат в области, где благодаря градиенту давления в пограничном слое, скорости (u) в нижних слоях меньше, чем в верхних.

Самые маленькие частицы удерживаются непрерывно во взвешенном состоянии за счет турбулентного движения, а большие, поднимаясь над зоной, где определяющим фактором является градиент скорости, падают вниз и поднимаются снова. Пути «зерен» наносов в этой «зоне прыжков» являются циклоидальными и представляют собой последовательность скачков.

В практике эксплуатации оросительных каналов, такой подход теоретического и практического исследования, позволит с достаточно большой точностью устанавливать расчетные режимы работы сети и объемы очистных работ, а также прогнозировать межочистной период.

Литература:

1. *Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 1986.*
2. *Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 317 с.*
3. *Huggenberger, P., and Regli, C., A sedimentological model to characterize braided river deposits for hydrogeological applications, in Braided rivers: process, deposits, ecology and management, Sambrook Smith, G.H., Best, J.L., Bristow, Ch.S., and Petts, G.E., Eds., Blackwell Publishing, 2006, no. 36, pp. 51–74.*
4. *Pozdniakov, S.P., and Tsang, C.F., A self-consistent approach for calculating the effective hydraulic conductivity of a binary, heterogeneous medium, Water Resour. Res., 2004, vol. 40, W05105, doi: 10.1029/2003WR002617.*
5. *Agterberg, F.P., 1974, Geomathematics: Elsevier Scientific Publ. Co., Amsterdam and New York, 596 p.*