

МЕТОДЫ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
НА УЧАСТКАХ РЕКTHE METHOD OF EVALUATION OF CHANNEL DEFORMATIONS
ON RIVER REACHES

В статье предпринята попытка оптимальной оценки существующих методов расчета русловых переформирований, в том числе расхода влекомых и взвешенных наносов. Представлено современное состояние задачи численного моделирования русловых деформаций.

The attempt of the optimal assessment of existing account methods of channel deformations including bed load and suspended sediment discharges is made in paper. The current state of channel deformations numeral modeling is presented.

Ключевые слова: русловые деформации, математическое моделирование, вязкость потока, транспорт наносов.

Key words: bed deformations, mathematical modeling, flow viscosity, sediment transport.

РЕШЕНИЕ задачи расчета русловых деформаций речных потоков является чрезвычайно сложной по своему физическому содержанию. Решение включает расчет скоростного поля потока и собственно русловых деформаций. Одним из перспективных направлений решения задачи русловых переформирований является численное моделирование этих процессов.

Анализ обширной литературы позволил выявить достаточное количество появившихся к 1990-м гг. численных методов решения исследуемой задачи. Однако проблемным для всех этих методов оставался вопрос о способе учета в исходных уравнениях наличия турбулентности потока. Существуют различные подходы при постановке задачи моделирования водных потоков [1].

Одномерная задача. Уравнения одномерного движения жидкости в гидравлике могут быть записаны в двух видах: в виде закона сохранения энергии и в виде закона изменения количества движения. Для замыкания системы уравнений одномерной модели используется дополнительное уравнение баланса массы наносов.

Двухмерная задача. Двухмерная модель описывает плановое движение воды в открытом русле. При этом средние характеристики

потока (скорости) рассматриваются в проекции на горизонтальную координатную плоскость, на которую проектируется по вертикальному направлению область течения.

Трехмерная задача. Исходными системами уравнений являются уравнения движения вязкой жидкости Навье–Стокса или Рейнольдса в трехмерной сетке в виде системы гидродинамических уравнений [1]:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}, \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt}. \end{aligned} \quad (1)$$

Важным этапом является задание плотностных характеристик речного потока и в первую очередь его вязкости. Согласно современным представлениям о природе турбулентных процессов эффективная вязкость ν является алгебраической суммой кинематической μ_k и турбулентной μ_T вязкости. Сложность заключается в определении турбулентной вязкости. Анализ имеющегося опыта моделиро-

вания по литературным источникам показал, что на практике чаще всего встречаются два пути ее определения:

— упрощенный — когда все турбулентные характеристики задаются исследователем и принимаются равными некоторой величине;

— путем замены турбулентной вязкости коэффициентом турбулентного обмена, который по величине должен быть значительно больше, чем вязкость потока.

Многочисленные исследования турбулентной структуры потока показывают, что наиболее доступным способом определения характеристик турбулентности является использование классической $k-\varepsilon$ модели для высоких (турбулентных) чисел Рейнольдса, которая включает уравнения переноса для энергии турбулентности k и ее величины диссипации ε [1].

Другим важным моментом является необходимость учета пристеночных шероховатых областей, где молекулярные эффекты и эффекты турбулентности становятся соизмеримыми. В этом случае обязательным является дополнение имеющейся модели турбулентности специальным алгебраическим выражением, называемым пристеночной функцией. Последняя описывает изменение скорости и турбулентной энергии в пограничном пристеночном слое.

При решении задачи деформации русла, кроме решения системы гидродинамических уравнений, необходимо разработать модель размыва и транспорта наносов.

Для «отслеживания» частицы грунта, влекомой по дну реки, наиболее эффективен метод объемного слежения статической сетки VOF-скаляра [1]. Согласно ей отдельные частицы слежения используются в каждой ячейке расчетной области. Расчетная же область разбивается на некоторое число непересекающихся контрольных объемов таким образом, чтобы каждая узловая точка содержалась в одном контрольном объеме. Основным фактором поступления VOF-скаляра в расчетную область при решении задачи размыва русла может быть изменение размывающих и донных скоростей течения потока.

Другим путем определения расхода наносов и тем самым решения задачи транспор-

та наносов может быть аналитический метод. При этом на практике обычно применяются эмпирические зависимости различных авторов, различающихся либо составом допущений, либо исходными предпосылками.

Полный транспорт наносов многими исследователями рекомендуется определять путем суммирования расходов взвешенных и влекомых наносов. Расход взвешенных наносов в общем случае вычисляется путем умножения средней мутности потока, отвечающей его транспортирующей способности (S_{mp}), на расход воды в расчетном створе. Для определения расхода влекомых наносов известно более 10 формул, широко применяемых в практике. Однако расчеты по ним приводят во многих случаях к большим количественным расхождениям. На практике наиболее часто применяются:

— формула ЛИВТа

$$q_T = 0,015 \cdot \left(\frac{V_{cp}}{V_0} \right)^3 \cdot d \cdot (V_{cp} - V_0); \quad (2)$$

— формула В. Н. Гончарова

$$q_T = 0,00121 \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 \cdot d \cdot (V - V_0) \cdot \left(\frac{d}{T} \right)^{0,1}; \quad (3)$$

— формула И. И. Леви

$$q_T = 755 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{V}{\sqrt{qg}} \right)^3 \cdot d \cdot (V - V_0) \cdot \left(\frac{d}{T} \right)^{0,25}; \quad (4)$$

— формула И. В. Егизарова

$$q_T = c \cdot \frac{(\lambda_T \cdot \lambda^2)}{(\lambda_T - \lambda)^2} \cdot \left[\frac{1 - 0,012(\lambda_T - \lambda) \cdot d}{c \cdot \lambda \cdot R \cdot I} \right]. \quad (5)$$

$$\cdot \frac{R \cdot I^{3/2} \cdot q}{d};$$

— первая формула Х. А. Эйнштейна

$$q_T = 2,15\omega \cdot d \cdot e^{\left(\frac{-0,391 \cdot d \cdot (\lambda_T - \lambda)}{T \cdot \lambda \cdot I} \right)}; \quad (6)$$

— вторая формула Х. А. Эйнштейна

$$q_T = \frac{2,15\omega \cdot d}{e^{\left(\frac{156,4 \cdot d^{2/3} T^{1/3}}{V^2} \right)} - 1}; \quad (7)$$

— формула Доу Го-Жень

$$q_T = 0,0081 \cdot \left(\frac{d}{T}\right)^{1/8} \cdot \left(1 + 1,33 \left(\frac{d}{T}\right)^{1/8}\right) \cdot d \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 \cdot (V - V_0); \quad (8)$$

— формула Г. И. Шамова

$$q_T = 358,5 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{d^{3/4}}{T^{1/4}}\right) \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 \cdot (V - V_0); \quad (9)$$

— первая формула НИИВТа

$$q_T = 37,73 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{d}{T}\right)^{3/4} \cdot \left(\frac{V}{\omega^{3/2}}\right) \cdot (V - V_0)^{2,5}; \quad (10)$$

— вторая формула НИИВТа

$$q_T = 354,7 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{d}{T}\right)^{3/4} \times$$

$$\times \left(\frac{V^{3,5}}{\omega^{3/2} \cdot V_0^2}\right) \cdot (V - V_0)^{1/2} \quad (11)$$

Исследование данных зависимостей было проведено на примере Ревякского и Георгиевского перекатов реки Волга. Сравнительный анализ показал значительное расхождение результатов расчетов при одних и тех же исходных данных. Фактические же расходы влекомых наносов были взяты из отчетов русловых партий за соответствующие годы. Результаты проведенной оценки дают возможность рассматривать формулы Леви и НИИВТа как наиболее полно отражающие качественную сторону явления движения влекомых наносов из крупнозернистого грунта.

Список литературы

1. *Липатов И. В.* Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений: методология исследований: моногр. — Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. — 96 с.
2. *Гришанин К. В.* Основы динамики русловых потоков. — М: Транспорт, 1990.
3. *Караушев А. В.* Теория и методы расчета речных наносов. — Л.: Гидрометеоздат, 1977. — 286 с.