

ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 51.001.57

Метод и средства компьютерного моделирования гидравлических процессов в открытых потоках

М.И.АБУ-ХАЛАВА, И.В.МАКСИМЕЙ, Т.В.ПРИЩЕПОВА

1. Принципы реализации метода компьютерного моделирования гидравлических процессов

При проектном моделировании гидравлических процессов обычно используются аналитические и численные модели на основе множества модификаций системы дифференциальных уравнений (ДУ) Сен-Веннана [1, 2]. Большинство известных моделей [2, 3] и расчетных программ не обладают необходимым уровнем организации моделирования и не обеспечивают требуемой степени адекватности математической модели (ММ) реальной ситуации. Это обстоятельство определило актуальность разработки нового метода и средств компьютерного моделирования гидравлических процессов (ГИДРПР). В основу метода положены следующие принципы изучения потоков в открытых руслах:

- деление русла на элементарные участки ($ЭЛУ_j$), в пределах которых можно считать постоянными уклон дна (θ) и живое сечение (ω_x), а структуру берегов (STR_j) линеализированной;
- для каждого $ЭЛУ_j$ задается ограниченный набор параметров в виде технологических карт (TK_j);
- геометрия участков русла представляет собой сочетание четырех типов сечений (прямоугольник, треугольник, парабола, трапеция), пяти форм (STR_j) (расширяющаяся и сужающаяся трапеция, призма, повороты берегов влево и вправо), трех типов уклона ($\theta_j > 0$; $\theta_j = 0$; $\theta_j < 0$);
- переход к частным случаям решений общей системы ДУ Сен-Веннана при вычислении уравнений движения свободной поверхности потока (h_x) и определении скорости потока (V_x);
- отдельный расчет параметров установившегося и неустойчившегося движения с помощью модифицированной системы ДУ Сен-Веннана;
- использование идеи «детского конструктора» при расчете параметров потока на основе параметризованных ММ, реализующих процедуры численного интегрирования;
- переходные процессы на $ЭЛУ_j$ представляются набором имитационных моделей (ИМ), каждая из которых описывается соответствующей активностью поведения во времени гидравлического процесса на микроэлементарных участках постоянной длины (ΔX);
- активности в совокупности реализуют алгоритм поведения ГИДРПР вдоль координаты движения потока \bar{X} .

2. Математическая основа компьютерного моделирования гидравлических процессов

Новым в расчетах является учет в уравнении энергий системы ДУ Сен-Веннана влияние на поток сил гидравлического давления (P_{xt}) и бокового давления R_{xt} в случаях непрямоугольного характера русла. Ранее исследователи рассматривали лишь призматические русла и поэтому силами P_{xt} и R_{xt} пренебрегали [4]. Таким образом, для общего случая (неустановившегося движения) при расчетах параметров ГИДРПР_j для j-го ЭЛУ система ДУ Сен-Веннана приобретает следующий вид:

$$\frac{\partial \omega_{xtj}}{\partial x} V_{xtj} + \frac{\partial V_{xtj}}{\partial x} \omega_{xtj} + \frac{\partial \omega_{xtj}}{\partial x} = q_j(x_1 t); \quad (1)$$

$$\omega_{xtj} \frac{\partial V_{xtj}}{\partial x} + \frac{\partial P_{xtj}}{\partial x} + V_{xtj} \frac{\partial \omega_{xtj}}{\partial t} + 2\omega_{xtj} \frac{\partial V_{xtj}}{\partial x} V_{xtj} + V_{xtj} \frac{2\partial \omega_{xtj}}{\partial x} = g\omega_{xtj} \left(\sin \theta_j - \frac{V_{xtj}^2}{C^2 R} \right) + R_{xtj};$$

где для ЭЛУ_j потока:

– задаются угол уклона дна (θ_j), гидравлический радиус сечения (R) и коэффициент Шези (C), величина паводкового притока $q_j(x_1 t)$;

– вычисляются площадь русла (ω_{xtj}) и скорость водного потока (V_{xtj}).

В общем случае P_{xt} и R_{xt} вычисляются с помощью выражений:

$$P_{xt} = g \cos \theta \int_0^{h_{xt}} (h_{xt} - \xi) B(x_1 t, \xi) d\xi; \quad (2)$$

$$R_{xt} = g \cos \theta \int_0^{h_{xt}} (h_{xt} - \xi) \frac{\partial B(x_1 t, \xi)}{\partial x} d\xi;$$

где h_{xt} – высота жидкости в потоке вдоль координат x и t ;

$B(x_1 t, \xi)$ – значение линеализованной функции ширины потока на высоте ξ вдоль координаты x и t ;

$\frac{\partial B(x_1 t, \xi)}{\partial x}$ – частная производная функции $B(x_1 t, \xi)$;

ξ – текущее значение интегрируемой переменной высоты потока жидкости вдоль координаты.

В случае установившегося движения система (1) приобретает следующий вид:

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} \omega_x = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_x}{\partial x} + 2\omega_x \frac{\partial V_x}{\partial x} V_x + V_x^2 \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial x} \omega_x = g\omega_x \left(\sin \theta - \frac{V_x^2}{C^2 R} \right) + R_x;$$

Для интегрирования системы (3) используется метод конечных разностей. Всего было получено 20 частных решений системы (3) для различных типов ЭЛУ_j. Реализация алгоритмов численных моделей частных случаев уравнения (3) позволила создать библиотеку типовых расчетных моделей (БИБ.ГИДР1) для нахождения h_x и V_x на всех ЭЛУ_j потока.

3. Особенность компьютерного моделирования гидравлических процессов

Для исследования неустановившегося движения в открытых потоках каждый ЭЛУ_j был разбит на последовательность микроэлементарных участков МЭУ_{кj} (к – номера МЭУ_{кj},

составляющих соответствующие ЭЛУ_j). Такой подход позволил считать ω_{xtj} , P_{xij} и R_{xij} постоянными относительно переменной x . Таким образом, система (1) в пределах МЭУ_{к_j} также может интегрироваться методом конечных разностей. Для каждого типа МЭУ_{к_j}, входящего в ЭЛУ_j, используется библиотека имитационных моделей (БИБ.ГИДР2) для нахождения h_{xt} и V_{xt} . Компонентами БИБ.ГИДР2 являются активности (АКТ_{к_j}), состоящие из алгоритма расчета параметров ГИДРПП и оператора модификации временной координаты активности ($t_{к_j}$) на переменный интервал модельного времени, зависящий от переменной скорости движения потока и вычисляемый из выражения:

$$\Delta t_{\hat{e}j} = \Delta x / V_{xt\hat{e}j}, \quad (5)$$

На вход каждой АКТ_{к_j} имитируется поступление паводкового притока интенсивности $\Delta q_{к_j}(x_1 t)$. Алгоритм АКТ_{к_j}, кроме численного расчета параметров потока $V_{xtк_{j}}}$ и $h_{xtк_{j}}}$ на интервале t при координате $x_{к_{j}}}$, имитирует на входе активности поступления паводкового притока для последующей активности ($\Delta q_{к+1}(x, t)$). Таким образом, множеству {МЭУ_{к_j}} соответствует множество {АКТ_{к_j}}. Поэтому в совокупности имитируют развитие ГИДРПП одновременно по двум координатам x и t . Результатом имитации являются формируемые АКТ_{к_j} двумерные таблицы значений параметров «волны прорыва»:

$$\xi_{xt\hat{e}j} = h_{xt\hat{e}j} - h_{x\hat{e}j};$$

$$\psi_{xt\hat{e}j} = V_{xt\hat{e}j} - V_{x\hat{e}j};$$

где $\xi_{xtк_{j}}}$ и $\psi_{xtк_{j}}}$ – соответственно толщина и скорость движения «волны прорыва» на МЭУ_{к_j}, формируемые под воздействием паводковых притоков или при имитации шлюзовых операций на любом участке открытого потока.

4. Технология имитационных экспериментов при исследовании гидравлических процессов

При реализации обе библиотеки упрощенных моделей гидравлических процессов были объединены в единый программно-технологический комплекс исследования (ПТКИ) ГИДРПП с помощью операционной среды системы моделирования MICIS [5]. Технология использования ПТКИ ГИДРПП для реализации предложенного метода исследования обоих режимов движения открытого потока жидкости реализуется следующей последовательностью этапов.

1. В диалоговом режиме задается структура потока и осуществляется его деление на ЭЛУ_j, а затем и на МЭУ_{к_j}. Устанавливаются геометрические характеристики ЭЛУ_j и начальные условия для компьютерного моделирования ГИДРПП_j.

2. Проводится предварительное численное интегрирование системы ДУ (3) и определяются параметры потока $h_{к_j}(x)$ и $V_{к_j}(x)$.

3. Задается структура паводковых притоков (места поступления $к_j$, их интенсивности $q_{к_j}(x_1 t)$ и интервал существования переходных процессов ($T_j, T_{к_{j}}}$)).

4. Задается структура шлюзовых операций на МЭУ_j – характер операций (открыть/закрыть), место установки шлюза ($к_j$), интенсивность притока в потоке из-за шлюзовой операции ($q_{0к_{j}}}$).

5. Поочередное имитационное моделирование множеством активностей {АКТ_{к_j}} переходных процессов (вначале от паводковых притоков, затем от каждой шлюзовой операции в отдельности).

6. Перевод результатов имитации, вычисленных при переменном шаге модельного времени изменения временных координат АКТ_{к_j} ($t_{к_{j}}}$) к постоянному шагу. Затем объединение

результатов имитации всех переходных процессов на $\{MЭУ_{kj}\}$ и оценка доли влияния каждого процесса на суммарные характеристики «волны прорыва» ($\xi_{\sum_{kjt_0}} \psi_{\sum_{kjt_0}}$).

Таким образом, с помощью ПТКИ реализуется двухступенчатая организация квазипараллелизма: вначале поочередно с помощью множества $\{AKT_{kj}\}$ имитируется каждый переходной процесс в потоке, а затем моделируется одновременное взаимодействие процессов на всем множестве $\{MЭУ_{kj}\}$ открытого потока.

Abstract

The authors considered the principles of realization of the method of computer modeling of hydraulic processes.

Литература

1. Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. М.: Стройиздат, 1972.
2. Абу-Халава М.И., Гладышев М.Т. Движение волны прорыва по руслу с плавно меняющимися параметрами, Весті НАН Беларусі, Сер. фіз.-тэхн. навук, 1 (2001), С. 109–114.
3. Христианович С.А. Неустановившееся движения в каналах и реках. Некоторые новые вопросы механики сплошной среды, М.: Из. АН СССР, 1938, С. 12–145.
4. Эббот М.Б. Вычислительная гидравлика открытого потока, Пер с англ. М.: Мир, 1983.
5. Максимей И.В., Левчук В.Д., Жогаль С.П. и др. Задачи и модели исследования операций, Часть 3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: Уч. пособие. Гомель: БелГУТ, 1999.

Поступило 3.05.2002

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф.СКОРИНЫ