

УДК 556.581

Канд. техн. наук В.Н. Архипов \*  
З.Н. Тынбаева \*\*

**ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «ГИДРО/EXPRESS TEST»**

*РАСЧЕТНЫЙ МОДУЛЬ, ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ МЕСТНОСТИ, ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ*

*Представлено описание современных требований к программным комплексам для расчета распространения загрязняющих веществ в водоемах. Описаны модули программного комплекса гидро/express test, для моделирования последствий залповых сбросов в водоем.*

Современные гидрологические модели можно, условно, разделить на несколько категорий, по кругу решаемых задач, это модели:

- для эффективного управления водными ресурсами;
- для расчета распределения загрязняющих веществ (ЗВ) в водоемах;
- для моделирования внутренних процессов распределения гидрологических и температурных характеристик;
- быстрого расчета простых параметров при принятии решений;
- прикладные.

Научные интересы авторов сводятся на реализации задач по моделированию растворения примесей в водоемах. При принятии решений о ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС) очень часто нет возможности привлечения традиционных моделей, так как они могут отсутствовать для конкретного водоема, иметь ограниченный доступ к использованию или не имеют возможности смоделировать сложившуюся ситуацию.

На сегодня имеется огромное количество математических моделей, которые, как правило, привязаны к определенному гидрологическому объекту, и соответственно имеют возможность рассчитывать комплексные параметры только для него. Такие модели рассчитывают распространение загрязнений не во всем русле реки, а только на ограниченном ее участке.

---

\* ТОО «Янтарь», г. Алматы

\*\* КазНАУ, г. Алматы

Программные комплексы должны позволять в течение 20...30 мин. ввести данные по аварии, рассчитать загрязнения и получить серию карт-схем, показывающих распределение пятна загрязнения в русле реки и его траекторию в назначенные моменты времени, на несколько дней. А также получить серию графиков, показывающих обстановку в населённых пунктах в различные моменты времени.

Обязательным атрибутом моделей является анимационный блок, который визуализирует результаты расчетов и позволяет просмотреть распространение грязевого пятна в динамике, на несколько часов и дней вперед.

Таким образом, программные комплексы должны содержать следующие модули:

- цифровую модель рельефа местности – ложа русла реки (в декартовых координатах);
- цифровую модель рельефа местности в криволинейных координатах, специальных для данного участка реки;
- поля скоростей воды, рассчитанные для нескольких ступеней расхода воды;
- информацию для построения карт-схем на заданный участок реки. Слои карты представлены в открытом стандартном формате.
- Расчётный модуль 1 для полей распределения концентраций загрязняющих веществ.
- Расчётный модуль 2 для построения горизонталей концентрации загрязняющего вещества.
- Программную оболочку, осуществляющую сбор информации об аварии и автоматизированный запуск расчётных модулей 1 и 2 нужное число раз, с подачей им входных данных.
- Модуль, сохраняющий на каждом шагу рассчитанные данные и размещающий их в единую ленту данных.
- Визуализатор результатов расчётов. Создает анимированное изображение движения пятен загрязнения в реке.
- Графопостроитель. Позволяет просматривать динамические графики изменения максимальных для поперечного сечения концентраций загрязняющего вещества.

Река – живая система. Она, в отличие от канала, не может сохранять свой профиль неизменным, ни по горизонтали, ни по вертикали. Могут меняться глубины, река меандрирует. Это приводит, со временем, к тому, что цифровая модель перестаёт отражать реалии на некоторых участках, но в ре-

зультате ошибка сказывается на конечном результате. В этом случае комплексы должны иметь возможность за счёт разделения программного кода и данных позволять сохранять актуальность модели объекта. Как правило, для этого достаточно лишь сделать обновлённую цифровую модель местности и пересчитать поля скоростей на новую геометрию объекта.

Одним из недостатков, традиционного способа расчёта движения загрязняющего вещества в русле реки является переход к одномерной задаче. Обычно рассматривается движение загрязнения вдоль русла. Однако, такие модели не всегда учитывают, что при определенных русловых условиях традиционные подходы недостаточны. Ширина русла может значительно повлиять на расчеты. Поэтому необходимо рассматривать распространение загрязнения не только вдоль русла, но и поперёк. Таким образом, нужно решить двумерную задачу распространения загрязнений.

Перечисленные требования отражают не все запросы пользователей, особенно это касается узко-профильных задач или задач по ликвидации ЧС. Здесь, как правило, необходимо иметь возможность быстро (часто на месте), смоделировать ситуацию при визуальной оценке происшествия, дать прогноз и принять меры по ликвидации ЧС. Модель должна быть гибкой и работать с множеством гидрологических объектов. Соответственно, такая модель может и не иметь некоторых модулей традиционных программных комплексов, но в то же время при ограниченном наборе данных должна выдавать требуемый результат.

Представляемый программный комплекс «ГИДРО/EXPRESS TEST», разрабатываемый в ТОО «Янтарь», является таким инструментом и может, помимо основной задачи – оперативных расчётов, помочь выполнять иные, расширенные функции. Соответственно перед программным комплексом стоит задача оперативного расчёта двумерного распространения загрязнений по руслу реки.

Для расчета прогноза загрязнения водного объекта необходимы следующие параметры: расход реки, расход загрязнения, ширина реки, средняя глубина реки, концентрация загрязняющего вещества в месте попадания в воду. Также для расчета коэффициента турбулентной диффузии необходим уклон водной поверхности.

Модель изначально ориентирована на расчет загрязнения при ЧС, на базе портативных компьютеров. В основу ее легли лёгкость использования, и высокая скорость расчётов. При применении модели возможно проводить множественные численные эксперименты, выяснять некоторые

закономерности распределения загрязнений. В частности, используя этот инструмент, пользователь может решать следующие задачи:

- Получать карты распределения загрязнений после аварий.
- Определять распределения концентраций загрязнений, вследствие «постоянно действующих» источников загрязнений. Случай установившегося распределения.
- Определять «тихие заводи» – места в русле, куда попадает меньше всего грязи. (Это может быть особенно важно для выбора мест водозабора).
- Решением обратной задачи, при численных экспериментах, можно пытаться выявлять скрытые источники загрязнений.

Результаты расчетов по экспресс-методу могут довольно сильно различаться с практикой. Это можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, вполне вероятно ошибка в исходных данных, которые используют минимум измерительных средств, во-вторых, довольно большую погрешность может давать разница величин расхода реки. Поле концентрации строится по длине и ширине реки, не учитывая глубину. Может быть, еще одной причиной является то, что все-таки это называется экспресс-методом, т.е. он позволяет быстро определить концентрацию вещества на любом расстоянии, не учитывая многих параметров.

К сожалению, проверить точность расчетов можно только калибровкой модели на нескольких гидрологических объектах, с разной скоростью и прочими характеристиками. Такая задача перед авторами стоит в будущем.

Поступила 31.10.2013

Техн. ғылымд. канд. В.Н. Архипов  
З.Н. Тынбаева

#### **«ГИДРО/EXPRESS TEST» ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ МОДЕЛІ**

*Су бөгендердегі ластаушы заттардың таралуын есептеуге арналған бағдарламалар кешендеріне қойылатын қазіргі заманғы талаптардың сипаттамалары келтірілген. Су бөгендерге бірден түскен лақтырмалар салдарларын моделдейтін гидро/express test бағдарламалық кешенінің модулі суреттелген.*

УДК 551.515:532.5.18

Канд. техн. наук И.Г. Гуршев\*

**О ВЕРТИКАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЧАСТИЦ ПЕСКА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ***ПЕСЧАНАЯ БУРЯ, РАЗМЕР ЧАСТИЦ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ВЫСОТЕ*

*Анализ полученных ранее формул, описывающих вертикальное распределение концентрации частиц с высотой переноса во время бурь, показал преобладание мелких частиц песка над более крупными частицами на верхней границе приземного слоя атмосферы.*

Во время песчаной бури, в случае безразличной стратификации атмосферы, концентрация песка  $c(z)$  в приземном слое ветропесчаного потока описывается функцией

$$c(z) = c_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^{-\beta} \quad (\text{а}), \quad \text{или} \quad c^* = \frac{1}{z^{*\beta}} \quad (\text{б}), \quad (1)$$

где  $c_1$  – концентрация песка на высоте  $z_1 = 1$  м,  $z$  – величина вертикальной координаты по оси  $OZ$ , начало которой находится на поверхности верхнего слоя частиц,  $z^* = z/z_1$  – безразмерное значение координаты  $z$ ,  $c^* = c/c_1$  – безразмерная величина концентрации песка,  $\beta$  – экспериментально определяемая величина [1, 2, 3, 4, 8].

Как показано в работах [1, 2, 3, 8], величина  $\beta$  является функцией отношения  $w_g/u_*$ . Прандтль в работе [3] получил показатель степени  $\beta$  в следующем виде

$$\beta = \frac{w_g}{bu_*} = \lambda w_g, \quad \lambda = \frac{1}{bu_*}, \quad (2)$$

где  $u_*$  – динамическая скорость потока,  $w_g$  – скорость свободного гравитационного падения частиц песка,  $b$  – безразмерная постоянная. По оценке Прандтля постоянная  $b$  имеет значения  $b = 0,55 \dots 0,65$  [3].

Для развитых пыльных бурь в условиях стационарного во времени и однородного в пространстве потока с мелкими взвешенными монодисперсными частицами пыли размером порядка мкм Баренблатт и Голицын [1, 2, 8] теоретически получили следующее выражение для профиля объемной концентрации

\* АО Жасыл Даму МОСВР РК, г. Алматы

$$s(z) = s_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{-\frac{w_g}{\alpha_0 \cdot \kappa \cdot u_*}}, \quad (3)$$

здесь  $\alpha_0 = k_m / k_\tau$  – отношение коэффициентов обмена массы и импульса,  $\kappa = 0,4$  – постоянная Кармана.

Показатель степени  $\beta$  имеет следующий вид  $\beta = w_g / \alpha_0 \kappa u_*$ . Значит, величина  $c^*$  является также функцией скорости падения частиц песка  $w_g$ , а не только функцией переменной  $z^*$ .

Согласно работам [6, 7], величина  $w_g$  связана со средним геометрическим размером  $x_0$  песчаных частиц. Используя эмпирическую зависимость между  $w_g$  и  $x_0$ , полученную Шаповым [7], можно определить средний геометрический размер частиц  $x_0$ . Таким образом, величина концентрации песка на произвольно заданной высоте  $z = h$  также определяется значением  $x_0$ .

Равенство (1б) можно представить таким образом

$$c^* = \frac{1}{h_1^{\lambda w_g}}, \quad h_1 = \frac{h}{z_1}. \quad (4)$$

В работе [5] показано, что на высоте  $h = 16$  м функция распределения частиц по размерам имеет максимум при значении переменной  $x_0 = 50$  мкм, т.е. на этой высоте частицы песка с такими размерами преобладают над частицами других размеров. Ниже приводится возможное объяснение такому положению. Используя равенство (1б), получим следующие соотношения для концентрации частиц песка с произвольными скоростями падения  $w_{g1}$  и  $w_{g2}$  ( $w_{g1} \neq w_{g2}$ ) на произвольной высоте  $h_2$

$$c_{11}^* = h_2^{-\beta_1} \quad (\text{а}), \quad \text{и} \quad c_{22}^* = h_2^{-\beta_2} \quad (\text{б}), \quad (5)$$

где  $c_{11}^*$ ,  $c_{22}^*$  – соответственно безразмерные концентрации песка со скоростями  $w_{g1}$  и  $w_{g2}$ . Предположим, для определенности, что  $w_{g1} > w_{g2}$ , т.е. выполняется неравенство  $\beta_1 > \beta_2$ . Поделив равенство (5б) на равенство (5а), получим

$$\frac{c_{22}^*}{c_{11}^*} = \frac{h_2^{-\beta_2}}{h_2^{-\beta_1}} = h_2^{-\beta_2 - (-\beta_1)} = h_2^{\beta_1 - \beta_2}. \quad (6)$$

Так как  $\beta_1 > \beta_2$ , то  $\beta_3 = \beta_1 - \beta_2 > 0$ . Поэтому функция  $c_{22}^* = c_{11}^* h_2^{\beta_3}$  является возрастающей функцией, и  $c_{22}^* > c_{11}^*$ . Последнее неравенство показыва-

ет, что частиц песка размером  $x_{02}$  больше, чем частиц с размером  $x_{01}$ , так как величина  $w_g$  зависит от величины  $x_0$  [6, 7]. Если принять  $h_2$  равной величине высоты приземного слоя атмосферы, то в этом случае получаем, что на верхней границе приземного слоя преобладают частицы песка с небольшими размерами. Такие частицы легко проникают в пограничный слой атмосферы и увеличивают его загрязнение твердым аэрозолем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баренблатт Г.И., Голицын Г.С. Локальная структура развитых пыльных бурь. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 44 с.
2. Баренблатт Г.И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке // Прикладная математика и механика. – 1953. – Т. 17, Вып. 3 – С. 261-274.
3. Прандтль Л. Гидроаэромеханика /Пер. с нем. – 2-ое изд. – М.: Изд-во иностр. лит., 1951 – 575 с.
4. Семёнов О.Е. О массовой концентрации частиц в пограничном слое ветропесчаного потока // Гидрометеорология и экология. – 2009. – № 2. – С. 7–27.
5. Семёнов О.Е. Об ускорении потока во время сильных песчаных и пылевых бурь // Гидрометеорология и экология. – 2000. – № 3-4. – С. 23 – 48.
6. Семёнов О.Е. О физическом содержании параметров профилей массовой концентрации частиц в пограничном слое ветропесчаного потока // Гидрометеорология и экология. – 2010 – №1. – С. 11-21.
7. Шапов А.П. Определение гидродинамической крупности частиц реального песка // Гидрометеорологические проблемы Приаралья. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – С. 154-157.
8. Barenblatt G.I., Golitsyn G.S., Local structure of Mature Dust Storms // Journal of the Atmospheric Sciences, – 1974. – V. 31, No 7, – P. 1917-1933.

Поступила 4.09.2013

Техн. ғылымд. канд. И.Г. Гуршев

#### **АТМОСФЕРАНЫҢ ЖЕР БЕТІ ҚАБАТЫНДА ҚҰМ БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ТІГІНЕН ТАРАЛУЫ**

*Дауыл уақытындағы бөлшектер концентрациясының тасымалдануын тігінен таралуын суреттейтін, бұрын алынған формулалар талдау барысында атмосфераның, ауаның жер беті қабатының жоғарғы шекарасындағы құм бөлшектерінің майдасы ірі бөлшектерден көп болатынын көрсетті.*