

А. В. Клинов, А. Г. Мухаметзянова, К. А. Алексеев

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН ОСАЖДЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ВЗВЕСИ В МАЛЫХ ВОДОТОКАХ

Ключевые слова: численное моделирование, полидисперсная взвесь, малый водоток.

В статье рассматривается возможность применения вычислительного комплекса ANSYS Fluent для моделирования зон осаждения полидисперсной взвеси в малых водотоках. Приводится сравнение результатов численного эксперимента распространения поля мутности с данными расчета по методике Государственного гидрологического института. Изучается устойчивость получаемого решения в зависимости от характеристик сеточной модели.

Keywords: numerical modeling, polydisperse suspension, small watercourse.

The possibility of the use of computing complex ANSYS Fluent modeling polydisperse suspension deposition zones in small watersheds. The comparison of numerical results with field propagation turbidity data by the method of calculation of the State Hydrological Institute. The stability of the obtained solution, depending on the characteristics of the network model.

Одной из основных задач при проведении дноуглубительных работ, дампинге грунта, сбросах сточных вод, буровых отходов, или аварийных разливах нефти является количественная оценка факторов их воздействия на водную среду и её обитателей. Чаще всего эта оценка производится нахождением границ зон осаждения взвеси загрязняющих веществ, и может осуществляться как упрощенными инженерными методами, рекомендуемыми нормативно-методическими документами, например [1, 2], так и научно-обоснованными моделями, описывающими перенос, диффузию, осаждение и др. процессы поведения загрязняющих веществ в водной среде.

Первый подход разработан для проведения предварительных оценок, для расчетов зон воздействия в случае локализованных источников или пассивной примеси и основывается на упрощенном описании гидрологического режима, что ограничивает условия его применения рядом типовых задач. Для более точных оценок с учетом большого комплекса факторов воздействия примесей на водную среду наиболее приемлемым становится применение численного моделирования [3, 4].

До недавнего времени решение подобных задач численными методами сводилось к рассмотрению только двумерных (усредненные по глубине) моделей [5, 6], которые не давали полного представления о распространении поля мутности. Сейчас же в связи с ужесточением требований предъявляемых к расчетам и ростом вычислительных мощностей все большее внимание стало уделяться более точным и ресурсоемким трехмерным моделям. Уже существуют как отечественные [5-10], так и зарубежные [11] разработки специализированных программных комплексов предназначенных для моделирования распространения загрязняющих веществ в водной среде. Однако в большинстве своем такие комплексы предназначены для расчетов в условиях океанического шельфа и имеют ограничения по применению на других типах водных объектов

(большие и малые водотоки и водоемы), в то время как тип водного объекта определяет основные факторы распространения и трансформации поля мутности от источника загрязнения.

В настоящей работе рассматривается возможность применения универсального многоцелевого вычислительного комплекса ANSYS Fluent для моделирования зон осаждения полидисперсной взвеси в малых водотоках. При расчетах распространения поля мутности моделировалось поведение полидисперсной взвеси твердых частиц, образующихся в источнике загрязнения, распределенных в фазе-носителе (воде). Источник загрязнения рассматривался осредненным по всему поперечному сечению потока.

Для проведения численного эксперимента были использованы типовые для данного класса задач исходные данные [6], а именно:

- гидрометеорологические данные, включая расчетные расход и уровень воды, морфометрические характеристики русла и скорость течения;
- геологические данные (осредненный гранулометрический состав разрабатываемых грунтов и донных отложений);
- данные об источнике загрязнения, о его положении и мощности.

Была создана сеточная модель части малого водотока, представляющая собой длинный канал прямоугольного сечения. На стенки и нижнюю границу канала (поверхность контакта «вода—дно») были наложены условия прилипания для основной фазы и сцепления для взвешенных частиц, на верхней границе («вода-воздух») - условия проскальзывания и отражения, соответственно. На выходе потока задавались давление и мягкие граничные условия на параметры турбулентности.

Предварительным этапом вычислений является получение поля скорости в моделируемом канале, соответствующего заданному гидрологическому режиму, для чего на входе потока задавались скорость течения (осредненная по

площади входного сечения) и начальные параметры турбулентности.

Для моделирования течения несжимаемой вязкой ньютоновской жидкости программный комплекс Fluent использует численное решение дифференциального уравнения переноса импульса в частных производных, выражающего закон сохранения и уравнение неразрывности с полуэмпирическими моделями турбулентности. На данном этапе использовалась k-ε Realizable модель турбулентности, как наиболее предпочтительная для моделирования широкого диапазона турбулентных течений [12].

Решение разностных уравнений проводилось с помощью решателя segregated, для расчета поля течения использовался алгоритм Simple.

После окончания расчета с выходного сечения снимались профиль скорости и параметры турбулентности, которые переносились на вход потока. Далее по известному полю скорости моделировалось распространение взвеси загрязняющих веществ, для чего на входе потока дополнительно задавался её дисперсный состав и массовый расход.

Моделирование распространения поля мутности производилось с помощью многофазной модели Эйлера для плотной дискретной фазы (Dense Discrete Phase Model - DDPM) [13] сочетающей в себе подходы Эйлера и Лагранжа. При этом движение вещества сплошной фазы рассчитывается собственной системой уравнений неразрывности (1) и переноса импульса (2) (подход Эйлера), а воздействие отдельных частиц на поток учитывается в виде источниковых членов уравнений. Модель же движения частиц дисперсной фазы использует подход Лагранжа, т.е. отдельные частицы взаимодействуют с потоком основной фазы и друг с другом дискретно.

$$\nabla(\rho \vec{v}) = S_{DPM} + S_{other}, \quad (1)$$

$$\nabla(\rho \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F}_{DPM} + \vec{F}_{other}, \quad (2)$$

где p – давление, Па; $\vec{v}$ – среднемассовая скорость смеси, м/с; ρ – плотность смеси, кг/м³; S – источниковый член; F – сила воздействия, н.

Для моделирования турбулентности в рассматриваемом многофазном потоке была использована модифицированная запись k-ε Realizable модели турбулентности для дисперсных систем (3), (4) – Dispersed [12].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla(\rho \vec{v} k) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_k - \rho \varepsilon + \rho P_k, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla(\rho \vec{v} \varepsilon) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) + \rho P_\varepsilon, \quad (4)$$

где P_k и P_ε характеризуют влияние распределенных фаз на основную и генерацию кинетической энергии турбулентности; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k , σ_ε – параметры k-ε модели турбулентности; G_k – скорость генерации энергии турбулентности, м²/с²; k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²; μ_t –

эффективный коэффициент вязкости, н с/м²; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, м²/с³.

Использованная здесь математическая модель для расчета распространения поля мутности, которая была реализована средствами Fluent, является наиболее требовательной к вычислительным ресурсам компьютера, как к размеру оперативной памяти, так и к быстродействию процессора. Но её применение при необходимости позволяет моделировать также тепло- и массообмен между дисперсными частицами и основным потоком, и учитывать воздействие на поток вещества основной фазы со стороны движущихся в нем дискретных частиц.

Для проверки адекватности выбранной методики было проведено сравнение результатов численного эксперимента распространения поля мутности в малых реках с данными расчета по методике Государственного гидрологического института (ГГИ), представленными в [14]. В связи с чем, была воссоздана указанная в [14] часть малой реки Большая Вени (остров Сахалин) в виде сеточной модели длиной 8000 м, шириной 21 м и высотой 2,7 м. После чего проведено численное моделирование осаждения полидисперсной взвеси твердых частиц песка одинаковой формы, состоящую из фракций: 0,5-0,2 мм, 0,2-0,1 мм, 0,1-0,05 мм, 0,05-0,01 мм. Чтобы получить возможность сравнения с данными по методу ГГИ, за расчетный диаметр фракций была принята нижняя граница крупности фракции частиц грунта. Но алгоритмы, реализованные во Fluent, позволяют разбивать каждую из рассматриваемых фракции и на большее (чем 1) число расчетных диаметров (задавая начальный, конечный диаметры фракции и шаг разбивки).

Характерной чертой выбранной математической модели является возможность производить поправку на форму частиц загрязняющего вещества, для чего в свойствах модели необходимо задать специальный параметр Ф (фактор формы):

$$\Phi = \frac{F_{ш}}{F}, \quad (5)$$

где $F_{ш}$ – поверхность шара, имеющего тот же объем что и рассматриваемое тело поверхностью F .

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Сравнение результатов численного эксперимента с данными расчета по методике ГГИ

Размер фракции частиц d – d, мм	Расчетный диаметр фракции, мм	Верхняя граница зоны осаждения фракций, м		
		указанная в [14]	расчетная для сферических частиц	расчетная для частиц с Φ = 0,75
0,5–0,2	0,2	27,0	23,2	26,4
0,2–0,1	0,1	54,0	69,4	80,66
0,1–0,05	0,05	276,9	271,3	283,9
0,05–0,01	0,01	6923,1	6725,7	6789,3

Анализ данных табл.1 показал, что алгоритм расчета, приведенный в настоящей работе, позволяет достаточно точно моделировать процессы распространения полидисперсной взвеси загрязняющих веществ в малых водотоках, что подтверждается совпадением верхней границы зон осаждения фракций с данными [14]. Расхождение для сферических частиц не превышает 15%, а при введении поправки на форму частиц - 5%. Из табл. 1 можно заметить сильное несоответствие расчетных данных для фракции 0,2 - 0,1 мм, что можно объяснить применением усредненных табличных значений гидравлической крупности частиц по методике ГГИ.

В процессе выполнения расчетов было замечено, что одним из неоспоримых достоинств выбранной методики моделирования является высокая устойчивость полученного решения применительно к типу сеточной модели и её плотности. Этот факт подтверждают данные представленные в табл. 2, для сеточной модели канала длиной 100 м, шириной 21 м и высотой 2,7 м

Таблица 2 - Влияние типа сеточной модели и её плотности на устойчивость решения ($\Phi = 0,75$)

Тип сеточной модели	Шаг сеточной модели, м	Количество узлов сетки	Верхняя граница зоны осаждения, м	
			фракции 0,5-0,2 мм	фракции 0,2-0,1 мм
Гексагональная (Hex)	0,2	796590	27,38	83,16
	0,35	157563	25,67	78,54
	0,5	51858	25,09	76,02
	Д - 2,5 Ш - 0,25 В - 0,025	379865	28,24	85,43
	Д - 1 Ш - 0,5 В - 0,1	121604	27,888	84,52
	Д - 5 Ш - 0,5 В - 0,1	22284	27,887	84,57
Полиэдрическая (Polyhedra)	0,25	2744025	27,87	84,48
	0,5	368281	27,18	82,61
	0,75	119266	26,59	80,34
Гибридная тетраэдрическая (Hyb/Tetr)	0,5	323529	26,72	82,18
	0,75	99009	26,03	79,78
Примечание. Обозначения «Д», «Ш», «В» применяются для анизотропных гексагональных сеточных моделей, где «Д» - шаг по длине, «Ш» - шаг по ширине, «В» - шаг по высоте модели.				

Как видно из табл. 2 численное моделирование распространения поля мутности с достаточной точностью может выполняться на сеточных моделях различного типа и плотности. Значение расхождения по верхней границе зоны осаждения фракций между плотными гексагональными ($\sim 10^6$ расчетных узлов), полиэдрическими ($\sim 3 \cdot 10^6$ расчетных узлов) и неплотными ($\sim 0,5 \cdot 10^5$ и 10^5 расчетных узлов соответственно) не превышает 9%. При этом приоритет стоит отдать анизотропным

гексагональным сеточным моделям, как наиболее простым, имеющим однотипную структуру и в то же время точным.

В результате проделанной работы было установлено, что программный комплекс ANSYS Fluent позволяет получать достаточно детальные, приемлемо точные и практически значимые результаты моделирования процесса осаждения полидисперсной взвеси загрязняющих веществ в малых водотоках. Также была выявлена существенная устойчивость получаемого решения независимо от качества сеточной модели. В дальнейшем планируется распространить полученный опыт и выбранную методику и на другие типы водных объектов с учетом особенностей распространения и трансформации пятна мутности в них.

Литература

1. Методика расчёта предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ в водные объекты со сточными водами. Харьков, 1990.
2. Методика по расчёту платы за загрязнение акваторий морей и поверхностных водоемов, являющихся федеральной собственностью Российской Федерации, при производстве работ, связанных с перемещением и изъятием донных грунтов, добычей нерудных материалов из подводных карьеров и захоронением грунтов в подводных отвалах. М., 1999.
3. А.Г. Мухаметзянова, Г.С. Дьяконов, Е.И. Кульментьева, Вестник Казанского технологического университета, 11, 201-204 (2005).
4. Я.С. Мухтаров, Р.Ш. Суфиянов, Н.И. Гданский, В.А. Лашков, Вестник Казанского технологического университета, 2, 164-172 (2012).
5. В.Н. Котеров, Ю.С. Юрезанская, Вестник МАИ, 16, 7, 125-131 (2009).
6. А.В. Игнатов, В.В. Кравченко, География и природные ресурсы, 144-150 (2008).
7. В.В. Алексеев, Н.И. Куракина, Е.В. Желтов, Информационные технологии моделирования и управления, 5, 765-769 (2005).
8. Б.В. Архипов, В.Н. Котеров, В.В. Солбаков, Модель АКС для прогноза распространения промышленных сбросов с морских буровых платформ. М.: ВЦ РАН, 2000. 71 с.
9. Б.В. Архипов, В.Н. Котеров, А.С. Кочерова, В.В. Солбаков, Г.М. Хубларян, Водные ресурсы, 31, 1, 1-9 (2004).
10. А.А. Богдановский, И.Е. Кочергин, Труды ДВНИГМИ, 89-102 (1998).
11. M.G. Brandsma, T.C. Sauer, Proceedings of MMS Workshop on An Evaluation of Effluent Dispersion and Fate Models for OCS Platforms, 58-84 (1983).
12. И.А. Белов, С.А. Исаев, Моделирование турбулентных течений. Учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.
13. ANSYS Fluent Theory Guide
14. СТО ФГБУ «ГТИ» 52.08.31-2012, Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. СПб.: Изд-во «Глобус», 2012. 140 с.