

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. (1) (2) где p - давление, Па; ρ - среднemasсовая скорость смеси, м/с; ρ - плотность смеси, кг/м³; - источниковый член; - 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]. (3) (4) где $C_1\varepsilon$, $C_2\varepsilon$, sk , se - параметры k-ε модели турбулентности; G_k - скорость генерации энергии турбулентности, м²/с²; k - кинетическая энергия турбулентности, м²/с²; - эффективный коэффициент вязкости, н с/м²; - скорость диссипации

кинетической энергии турбулентности, м²/с³. Используемая 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 Φ (фактор формы): $\Phi = \frac{S}{S_0}$ где S – поверхность шара, имеющего тот же объем что и рассматриваемое тело поверхностью. 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 $\Phi = 0,75$
0,5-0,2	0,2	27,0	23,2	26,4	27,0
0,2-0,1	0,1	54,0	69,4	80,66	54,0
0,1-0,05	0,05	276,9	271,3	283,9	276,9
0,05-0,01	0,01	6923,1	6725,7	6789,3	6923,1

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 превышают 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 (~106 расчетных узлов), полиэдрическими (~3•106 расчетных узлов) и неплотными (~0,5•105 и 105 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.		