Математическое моделирование распространение вещества на поверхности воды

А.А. Исахов
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан
e-mail: *aliisahov@mail.ru*

Аннотация

В настоящей работе построена и реализована математическая модель переноса нефтяной пленки на поверхности моря. Метеорологические прогнозы ветра над акваторией Каспийского моря и объем разлившейся нефти, используя методы математического моделирования, возможно, оценить ареал распространения нефтяного пятна, и принять эффективные меры по ликвидации нефти и нефтепродуктов в море.

При прогнозировании возможных изменений режима моря и их экологических систем под влиянием антропогенных воздействий, в последнее время успешно используются методы математического моделирования. Однако до настоящего времени нет обобщающих работ, в которых достаточно подробно освещались бы, как особенности динамических процессов в морях, так и используемые для их описаний математические модели.

Транспортный процесс, как и любой вид производственной деятельности, сопряжен с опасностью, как для человека, так и для окружающей среды. Воздействие морских судов, по сравнению с другими видами транспорта, на окружающую среду минимально, так как в море при их нормальной эксплуатации попадает минимальное количество загрязнителей в пересчете на тонну перевозимых грузов. В то же время при авариях этот вид транспорта (рис. 1) наносит человеку и окружающей среде ущерб, несопоставимый по размерам с последствиями аварий на других видах транспорта. Человечество принесло в жертву морю большое число жизней и огромные материальные ценности.

Рис. 1: Танкер

Рис. 2: Танкер Престиж

В настоящей работе рассматривается математическое моделирование переноса нефтяной пленки на поверхности моря, мониторинг этого процесса и численная оценка масштабов загрязнения моря. Наиболее известными катастрофами такого рода являются аварии с танкером Престиж. Потерпевший бедствие у северо-западного побережья Испании танкер Престиж (рис. 2) затонул. Судно ушло под воду примерно в 270 км от побережья испанской автономной области Галисия. Океанские глубины в акватории, где затонул "Престиж достигают 4 км. По свидетельству ряда испанских специалистов, если танкер ляжет на дно на такой глубине, дизельное топливо, находящееся в его резервуарах, затвердеет от низких температур и крупномасштабной экологической катастрофы удастся избежать. Другие эксперты настроены более пессимистично и называют затонувший танкер экологической бомбой замедленного действия.

Наличие на поверхности жидкости пленки абсорбированного ею вещества может существенно изменить гидродинамические свойства свободной поверхности жидкости. Дело в том, что при изменении формы поверхности, сопровождающем движение жидкости, происходит растяжение или сжатие пленки, т.е. изменение поверхностной концентрации абсорбированного вещества. Эти изменения приводят к появлению дополнительных сил, которые должны быть учтены в граничных условиях, имеющих место на свободной поверхности жидкости. Ограничимся рассмотрением абсорбированных пленок веществ, которые можно считать нерастворимыми в самой жидкости. Это значит, что вещество находится только у поверхности и не проникает вглубь жидкости. Если же поверхностно-активное вещество обладает также и некоторой заметной растворимостью, то необходимо было бы принять во внимание процессы диффузии этого вещества между поверхностной пленкой и объемом жидкости, возникающие при изменении концентрации пленки.

Уравнения, описывающие, динамику течения и тепломассоперенос в море в приближении теории мелкой воды и гидростатического распределения давления по вертикали имеют следующий вид [1]:

$$\frac{\partial U_i}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\eta + \frac{1}{\rho_0}\int_{x_3}^{H} \rho dx_3\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\overline{u_i u_j}\right),$$
$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0, \quad \rho = \rho_0\left[1 - \beta\left(T-4\right)^2 + \alpha S\right], \tag{1}$$
$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\overline{t u_j}\right), \tag{2}$$
$$\frac{\partial S}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial S}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\overline{s u_j}\right). \tag{3}$$

Здесь U_i – составляющие компонентов вектора скорости, T – температура, S – концентрация примеси.

Уравнения (1) в силу присутствия турбулентных напряжений в правой части незамкнуты и для замыкания требуются дополнительные уравнения для рейнольдсовых напряжений [2], а также граничные и начальные условия:

В начальный момент времени $\tau = 0$ задается условие покоя, т.е. все скорости равны нулю, примесь в море отсутствует, температура постоянная.

Граничные условия: на боковых стенках выполнялись условия прилипания $U_i = 0$, $x_i \in z_n$,на водосбросе ставились следующие условия: $U_i = f_s\left(x_i, \tau\right)$, $T = T_0$, $S = S_0$, $x_i \in z_s$, скорость считалась постоянной и определялась из условия сохранения массы, производная температуры по нормали к сечению водозабора считалась равной нулю так, что ее значение определялось в результате численного счета:

$$U_i = f_b\left(x_i, \tau\right), \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial n} = 0, \quad x_i \in z_b.$$

На дне водоема принималось условие скольжения для горизонтальных компонент скоростей, равенство нулю вертикальной компоненты и условие адиабатичности для температуры:

$$U_3 = 0, \quad \nu_T \frac{\partial U_i}{\partial x_3} = -k_b\left|U_i\right| U_i, \quad \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial x_3} = 0.$$

На поверхности задавалось уравнение колебания уровня водной поверхности, условие равенства касательных напряжений и уравнение теплоотдачи:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = U_3, \quad \nu_T \frac{\partial U_1}{\partial x_3} = \frac{\tau_{\omega 1}}{\rho_0}, \quad \nu_T \frac{\partial U_2}{\partial x_3} = \frac{\tau_{\omega 2}}{\rho_0}, \quad \nu_S \frac{\partial T}{\partial x_3} = -k_e \left(T - T_e\right),$$

где k_b и k_e – эмпирические константы, τ_w – напряжения трения ветра на поверхности воды, T_e – равновесная температура окружающей среды.

Для определения движения нефтяной пленки надо добавить к уравнениям гидродинамики моря с начальными и граничными условиями еще одно уравнение соответственно тому, что мы имеем теперь на одну неизвестную величину (количество нефти S на единицу площади поверхности) больше. Этим дополнительным уравнением является уравнение непрерывности, выражающее собой неизменность общего количества нефтяной пленки. Тогда уравнение нефтяной пленки на поверхности воды имеет вид:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial \left(U_1 S\right)}{\partial x_1} + \frac{\partial \left(U_2 S\right)}{\partial x_2} = 0,$$

где все величины берутся на поверхности воды.

Наличие на поверхности моря пленки нефти может существенно изменить гидродинамические характеристики свободной поверхности моря. Дело в том, что при изменении формы поверхности, сопровождающем движение жидкости, происходит растяжение или сжатие пленки, т.е. изменение поверхностной концентрации вещества. Эти изменения приводят к появлению дополнительных сил, которые и должны быть учтены в граничных условиях, имеющих место на свободной поверхности жидкости. Граничные условия имеет следующий вид

$$\frac{\partial S}{\partial n} = 0, \quad n \in z_b,$$

где z_b – береговой контур моря.

Для решения поставленной задачи используются самые современные методы вычислительной гидродинамики: статистическое моделирование турбулентности на основе усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье - Стокса и прямое численное моделирование. Для решения уравнения движения применяется метод расщепления по физическим параметрам. На первом этапе находятся компоненты скорости методом дробных шагов [6], а уравнение колебания свободной поверхности и уравнение для переноса нефтяного пятна решается матричной прогонкой [3, 4, 5, 7].

Для моделирования разлива нефти и переноса нефти необходимо задание источников и количества вылившегося нефти в открытое море. При этом рассматривался две прогнозные задачи.

В работе рассматривается разлив нефти с нестационарного источника, т.е. с танкера, получившего пробоину, выливается нефть в открытое море. Задавался наихудший сценарий события, пробоина значительная и не имеется возможность заделать пробоину. Водоизмещение танкера 50 тысяч тонн.

При решении задачи расчетная область покрывалась сеткой 100x100x100. Рельеф дна была смоделирована методом фиктивных областей и подставлена в разностное уравнение для учета в процессе счета. В результате численного моделирования гидродинамики Каспийского моря получены следующие данные, распределение скоростей течения в горизонтальных плоскостях на поверхности моря. В результате численного моделирования гидродинамики Каспийского моря получены следующие данные. На рисунке 3 показано начальный момент разлива нефти с движущегося источника и поле скоростей при северо-восточном ветре. На рис. 4 показана динамика распространения нефтяного пятна в северо-восточном направлении на поверхности воды. Динамика переноса на этих рисунках соответствуют 10 часам после начала разлива нефти в открытое море.

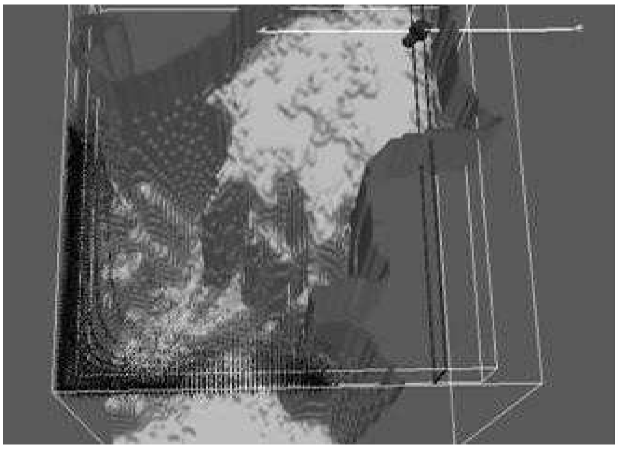

Рис. 3: Начальный момент разлива нефти с движущегося источника и поле скоростей при северо-восточном ветре

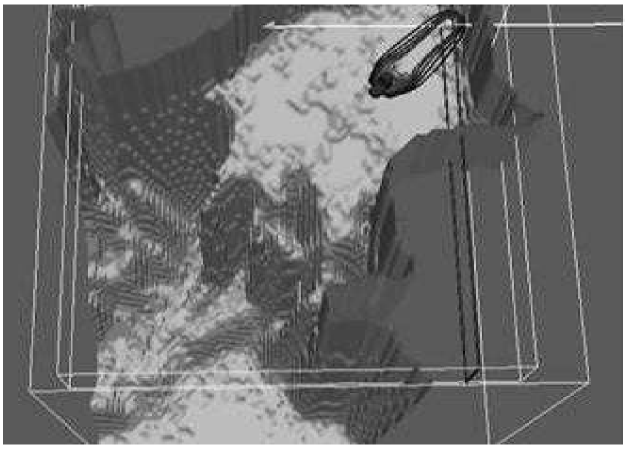

Рис. 4: Миграция нефтяного пятна с движущегося источника при северо-восточном ветре через 10 ч. после разлива

Таким образом, используя методы математического и компьютерного моделирования, и имея метеорологические прогнозы ветра над акваторией Каспийского моря, а также объем разлившейся нефти, возможно, оценить ареал распространения аварийного разлива нефти, и принять эффективные меры по ликвидации нефти и нефтепродуктов в море.

Список литературы

[1] *Филатов Н.Н.* Динамика озер. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 168 с.

[2] *Флетчер К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т.2. – М.: Мир, 1991. 552 с.

[3] *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1972. 612 с.

[4] *Толстых А.И.* Компактные разностные схемы и их применение в задачах аэрогидродинамики. – М.: Наука, 1990. 230 с.

[5] *Пейре Р., Тейлор Т.* Вычислительные методы в задачах механики жидкости. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 352 с.

[6] *Яненко Н.Н.* Методы дробных шагов решения многомерных задач математической физике. – Н: Наука, 1967. 197 с.

[7] *Самарский А.А., Гулин А.В.* Численные методы. – М.: Наука, 1989. 432 с.