

*Алышанов Г.Н., адъюнкт, НУГЗУ,
Тарасенко А.А., д-р техн. наук, вед. науч. сотр., НУГЗУ*

МОДЕЛЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ БОНОВЫМИ ЗАГРАЖДЕНИЯМИ РАЗЛИВА НЕФТИ НА АКВАТОРИИ МОРЯ

Предложена модель прокладки курса аварийно-спасательным судном, осуществляющим локализацию боновыми заграждениями дрейфующего и растекающегося на акватории моря нефтяного разлива в условиях пространственно-неоднородного поля приповерхностных течений

Ключевые слова: разлив нефтепродуктов, локализация, боны, минимальная выпуклая оболочка, курс судна

Постановка проблемы. Планы ликвидации аварийных разливов нефти (АРН) предусматривают локализацию и перемещение нефтяного пятна (особенно на начальной стадии растекания, когда размер загрязненной области относительно невелик) с помощью боновых заграждений. Поскольку конфигурация нефтяного загрязнения индивидуальна и динамична, а суммарная длина бонов ограничена и, как правило, соизмерима с характерным размером загрязнения, актуальным является решение задачи отыскания оптимального способа локализации разлива. В связи с этим требует решения задача построения математической модели локализации нефтяного разлива на акватории моря боновыми заграждениями, постановка которых осуществляется с аварийных судов.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1-7] рассматриваются общие вопросы тактики борьбы с АРН. В качестве базового параметра при этом выступает площадь разлива, а форма полагается эллиптической, что является модельным допущением.

При этом отсутствуют работы, посвященные вопросам борьбы с конкретным разливом, которые учитывают динамику конфигурации разлива и в которых анализируется целесообразность использования тех или иных тактических приемов борьбы с АРН.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является получение математической модели курса аварийно-

спасательного судна при постановке им боновых заграждений, локализирующих дрейфующий и растекающийся в неоднородном векторном поле приповерхностных течений разлив нефтепродукта для получения в дальнейшем оптимальных параметров тактики его локализации.

Пусть в глобальной системе координат параметрически задан континуальный прогноз динамики выпуклой оболочки (ВО) [8] группы пятен в виде $L(m,t) = \begin{cases} X(m,t); \\ Y(m,t) \end{cases}$ [9]. Движение

аварийного судна, осуществляющего постановку боновых заграждений при проведении им локализации разлива, осуществляется в направлении касательной к динамическому контуру ВО $L(m;t)$ [10].

За время Δt точка $A(m;t)$ контура ВО $L(m,t)$ переместится на расстояние AB (рис. 1)

$$\Delta S = \sqrt{(X(m;t + \Delta t) - X(m;t))^2 + (Y(m;t + \Delta t) - Y(m;t))^2}. \quad (1)$$

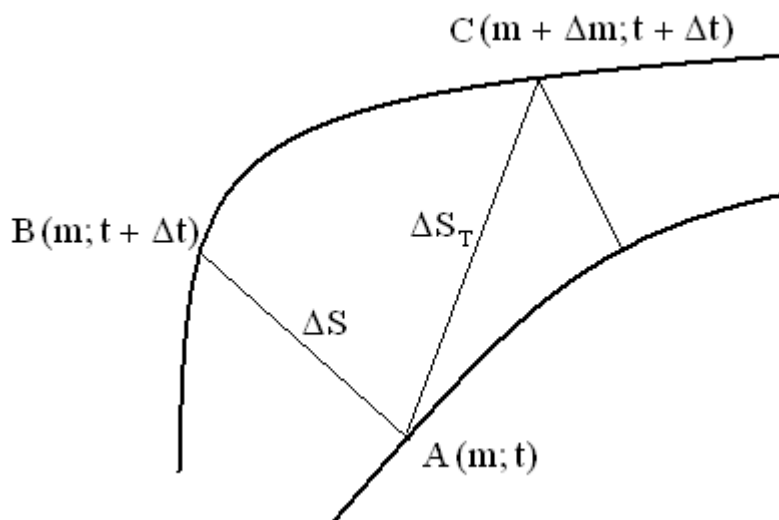


Рис. 1 – Нахождение курса движения аварийного судна при локализации разлива

При этом судно, двигаясь со скоростью $V_l(x, y)$

$$V_l(x, y) = V_s + V_f(x, y), \quad (2)$$

где V_s - собственная скорость судна; $\vec{V}_f(V_{fx}(x, y); V_{fy}(x, y))$ - векторное поле скорости приповерхностных течений, за время Δt переместится на расстояние AC

$$\Delta S_T = \sqrt{(X(m + \Delta m; t + \Delta t) - X(m; t))^2 + (Y(m + \Delta m; t + \Delta t) - Y(m; t))^2}. \quad (3)$$

В силу того, что

$$f(m + \Delta m; t) \approx f(m; t) + \frac{\partial f(m; t)}{\partial m} \Delta m; \quad (4)$$

$$f(m + \Delta m; t + \Delta t) \approx f(m; t) + \frac{\partial f(m; t)}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial f(m; t)}{\partial m} \Delta m, \quad (5)$$

то из (1) и (3) получим

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} \Delta t\right)^2}, \quad (6)$$

$$\Delta S_T = \left(\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial X(m; t)}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial^2 X(m; t)}{\partial t \partial m} \Delta t \Delta m \right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial^2 Y(m; t)}{\partial t \partial m} \Delta t \Delta m \right)^2 \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Перемещение точки ВО $A(m; t) \rightarrow B(m; t + \Delta t)$ осуществляется со скоростью

$$V(m; t) = \sqrt{\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial t}\right)^2}, \quad (8)$$

а перемещение судна $A(m; t) \rightarrow C(m + \Delta m; t + \Delta t)$ осуществляется вдоль направления χ со скоростью, определяемой (2). Направление χ при этом задается выражением

$$\chi = \arctg(Y(m + \Delta m; t + \Delta t) - Y(m; t), X(m + \Delta m; t + \Delta t) - X(m; t)). \quad (9)$$

Поделив (6) и (7) на Δt и осуществив предельный переход $\Delta t \rightarrow 0$, влекущий за собой $\Delta m \rightarrow 0$ (ввиду неразрывности $X(m; t)$ и $Y(m; t)$), получим

$$\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial t}\right)^2 = V^2, \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} + \frac{\partial X(m; t)}{\partial m} \frac{\partial m}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} + \frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \frac{\partial m}{\partial t}\right)^2 = V_l^2. \quad (11)$$

Объединяя (10) и (11) в одно уравнение, получим уравнение

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)^2 \left[\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial m}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial m}\right)^2\right] + \\ & + \frac{\partial m}{\partial t} \left(2 \frac{\partial X(m; t)}{\partial t} \frac{\partial X(m; t)}{\partial m} + 2 \frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} \frac{\partial Y(m; t)}{\partial m}\right) + \\ & + (V^2 - V_l^2) = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

решая которое относительно $\frac{\partial m}{\partial t}$, получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial m}{\partial t} = & \left(\pm \left[\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} \frac{\partial X(m; t)}{\partial m} + \frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} \frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \right)^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left[\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial m} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \right)^2 \right] \right] \times \right. \\ & \left. \times (V_l^2(X(m; t), Y(m; t), \chi, t) - V^2(X(m; t), Y(m; t))) \right]^{1/2} - \\ & - \left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} \frac{\partial X(m; t)}{\partial m} + \frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} \frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \right) \times \end{aligned}$$

$$\times \left(\left(\frac{\partial X(m;t)}{\partial m} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m;t)}{\partial m} \right)^2 \right)^{-1}, \quad (13)$$

где знак перед корнем определяет положительное либо отрицательное направления обхода ВО.

При этом направление движения, в виду (4), (5) и (9), задается в виде

$$\chi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\partial Y(m,t)}{\partial t} + \frac{\partial Y(m,t)}{\partial m} \frac{\partial m}{\partial t}, \frac{\partial X(m,t)}{\partial t} + \frac{\partial X(m,t)}{\partial m} \frac{\partial m}{\partial t} \right). \quad (14)$$

Подстановка данного выражения в предыдущее позволяет свести (13) к алгебраическому относительно $\frac{\partial m}{\partial t}$ уравнению четвертого порядка.

Поскольку сложность описаний динамики ВО и скорости локализации исключают в общем случае аналитическое построение маршрута движения судна, то данный маршрут целесообразно строить, используя разностную схему.

Рассмотрим решение данной задачи на одном (первом) шаге, для этого зададим начальные условия – время начала локализации, начальное местоположение судна вблизи ВО и направление D обхода ВО при движении судна (отрицательное $D = -1$, положительное - $D = 1$). Начальные условия выделяют конкретную траекторию движения из возможного семейства.

Начальное местоположение зададим точкой $O_0(x_0; y_0)$ начала локализации. Данной точке соответствует точка $(m_0; t_0)$ семейства контуров $L(m;t)$, которую можно найти из решения системы уравнений

$$\begin{cases} X(m_0; t_0) = x_0; \\ Y(m_0; t_0) = y_0. \end{cases} \quad (15)$$

Зададим конечный шаг по времени Δt . За это время контур $L(m; t_0)$ перейдет в контур $L(m; t_0 + \Delta t)$, а судно в произвольном направлении могло бы переместиться на расстояние $V_i(X(m_0; t_0); Y(m_0; t_0); \phi; t_0) \cdot \Delta t$, но поскольку при этом оно

движется вместе с ВО, то направление его движения ϕ_1 не является произвольным. Поэтому точка $O(m_0; t_0)$ может перейти в одну из двух возможных точек - $O_1^+(m_1^+; t_0 + \Delta t)$ или $O_1^-(m_1^-; t_0 + \Delta t)$, соответствующих $D = 1$ или $D = -1$.

Отрезки, заданные координатами начала и конца

$$L_{T_1}^+ = \left[(X(m_0; t_0); Y(m_0; t_0)); (X(m_1^+; t_0 + \Delta t); Y(m_1^+; t_0 + \Delta t)) \right], \quad (16)$$

$$L_{T_1}^- = \left[(X(m_0; t_0); Y(m_0; t_0)); (X(m_1^-; t_0 + \Delta t); Y(m_1^-; t_0 + \Delta t)) \right] \quad (17)$$

представляют собой маршрут перемещения судна при локализации разлива за время Δt при обходе контура в положительном и отрицательном направлениях, соответственно.

Данные отрезки за время Δt проходятся со скоростью, определяемой скоростью локализации $V_i(x, y)$.

Параметрически заданные координаты концов $(m_1^+; t_0 + \Delta t)$ и $(m_1^-; t_0 + \Delta t)$ отрезков могут быть найдены решением системы уравнений

$$\begin{cases} \left(X(m_1^\pm; t_0 + \Delta t) - X(m_0; t_0) \right)^2 + \left(Y(m_1^\pm; t_0 + \Delta t) - Y(m_0; t_0) \right)^2 = \\ = (V_i(x(m_0; t_0); y(m_0; t_0)) \cdot \Delta t)^2; \\ \phi_1^\pm = \arctg \left(Y(m_1^\pm; t_0 + \Delta t) - Y(m_0; t_0); X(m_1^\pm; t_0 + \Delta t) - X(m_0; t_0) \right). \end{cases} \quad (18)$$

Итерационное повторение данной процедуры позволяет найти координаты точек – вершин ломаной – маршрута движения судна в следующие дискретные моменты времени $t_i = t_0 + i \cdot \Delta t$.

При этом для получения вершин данной линии при обходе ВО в положительном или отрицательном направлениях, необходимо для каждого i -ого цикла из двух возможных решений системы (18) все время выбирать либо m_i^+ , либо m_i^- , соответственно.

Таким образом, задание прогноза динамики ВО, векторного поля скорости течений, собственной скорости судна при постановке им бонов, начальных условий и временного шага в

качестве входных параметров данной модели позволяет проложить курс судна при локализации разлива в виде ломаных линий с координатами вершин, задаваемых множеством $\{(x_i; y_i)\}_{i=1..M}$. При этом, задавая время локализации $T_T \geq \Delta t$, можно, циклически повторяя описанную процедуру, получить уравнение $L_l^+(m; t)$ маршрута судна за $M = \lceil T_T / \Delta t \rceil$ шагов в виде параметрической линейной сплайн-интерполяции множества полученных вершин.

Выводы. Предложена математическая модель постановки с аварийно-спасательного судна боновых заграждений, локализирующих распространяющийся в неоднородном векторном поле приповерхностных течений разлив нефтепродукта. Модель может быть в дальнейшем использована для получения оптимальных параметров тактики локализации разлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асадов С.Б. Закономерности распространения нефтяного загрязнения в Каспийском море: Автореф. дис....к-та географ. наук. СПб, 2003. – 20 с.
2. Мамедов Р.М. Изменчивость гидрофизических полей и распространение загрязнителей в Каспийском море. Р.М. Мамедов. - Баку: Елм, 2000. - 184с.
3. Караблин У.С. Методы ликвидации и предупреждения аварийных ситуаций при освоении месторождений углеводородного сырья. – Алма-Аты, 2008. – 185 с.
4. Воробьев Ю.Л. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. Ю.Л. Воробьев, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов. - М.: Ин-октаво, 2005. - 368 с.
5. Березин И.К. Оптимизация природоохранних мероприятий при ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов (на примере акватории Санкт-Петербурга): Автореф. дис....к-та техн. наук. СПб, 2005. – 28 с.
6. Атнабаев А.Ф. Информационная поддержка принятия решений при аварийных разливах нефти по водным объектам на основе ГИС-технологий: Автореф. дис....к-та техн. наук. Уфа, 2007. – 19 с.
7. Тескер И.М. Снижение геоэкологических последствий загрязнения земной поверхности при разливах углеводородного сырья и прогноз необходимых сил и средств для их

- ликвидации : Автореф. дис....к-та техн. наук. М., 2005. – 28 с.
8. Препарата Ф. Вычислительная геометрия: Введение / Ф. Препарата, М. Шеймос. - М.: Мир, 1989. - 478 с.
 9. Алышанов Г.Н. Принятие решения о возможности локализации разливов нефтепродуктов на акватории моря / Г.Н. Алышанов, А.А. Тарасенко // Проблемы надзвичайних ситуацій. – 2013. –Вип. 17. С. 11-
 10. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко – Харьков: НУГЗУ, 2011. – 927 с.

Алышанов Г.Н., Тарасенко О.А.

Модель локалізації боновими загородженнями розливів нафти на акваторії моря

Запропоновано модель прокладки курсу аварійно-рятувальним судном, що проводить локалізацію боновими загородженнями нафтового розливу, який дрейфує і поширюється на акваторії моря в умовах просторово-неоднорідного поля при поверхневих течіях

Ключові слова: розлив нафтопродуктів, локалізація, бони, опукла оболонка, курс судна

Alyshanov G.N., Tarasenko A.A.

Model of localization oil spill on the sea area by containment booms

A model of laying path for rescue ship carrying localization extending out and drifting oil spill on the sea area by containment booms in terms of the spatially inhomogeneous field of surface flows is present

Key words: oil spill, localization, containment booms, minimum convex cover, vessel course