

# ГИС-МОДЕЛЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕФТЯНОГО РАЗЛИВА НА МОРСКОЙ АКВАТОРИИ

Г.Н. АЛЫШАНОВ, А.А. ТАРАСЕНКО

Получена модель курса движения судна-бонопостановщика при локализации им динамического нефтяного разлива на морской акватории в неоднородных гидро- и метеорологических условиях. Модель является элементом автоматизированной системы составления ПЛАРН.

**Ключевые слова:** нефтяной разлив, локализация, боны, курс движения судна, тактика локализации, электронные карты, ГИС.

**Введение.** Совершенствование специализированных средств борьбы с нефтяными разливами на морской акватории и дальнейшее внедрение электронных карт и географических информационных систем (ГИС) как инструмента морской навигации позволяют в значительной мере автоматизировать процесс принятия решений при выборе оптимальных параметров тактики локализации разлива, уменьшить при этом субъективную составляющую и тем самым повысить эффективность принимаемых мер в условиях ограниченности временных, трудовых и материальных ресурсов [1].

Выбор оптимальных параметров тактики локализации затруднен уникальностью каждого конкретного случая, а именно, гидрологических и метеорологических условий в зоне разлива, конфигурации самого нефтяного пятна, а также арсеналом доступных сил и средств для борьбы с загрязнением [2, 3].

Планы локализации аварийных разливов нефти (ПЛАРН) базируются на интегральных характеристиках разлива (в первую очередь его объеме) и не учитывают вышеперечисленные факторы [4]. Поэтому расчет необходимого количества сил и средств носит сугубо оценочный характер, что зачастую приводит к перерасходу материальных ресурсов либо, наоборот – к росту прямого и непрямого ущерба от разлива в виду недостаточности принимаемых мер.

Ограниченность длины боновых заграждений наряду с ограниченностью интервала времени, в течение которого возможна локализация разлива (особенно при приближении его к береговой линии или объектам морской инфраструктуры), делает задачу выработки оптимальных параметров тактики локализации нетривиальной. Улучшить ситуацию призваны специализированные программные продукты, позволяющие рассчитать динамику пространственных параметров разлива, что позволяет принимать более взвешенные решения относительно количества и арсенала привлекаемых сил и средств для ликвидации загрязнения. В тоже время отсутствуют специализированные программные продукты, позволяющие выработать оптимальные параметры тактики локализации загрязнения [5, 6].

Созданию таких программных продуктов предваряет построение комплекса математических моделей и алгоритмов, позволяющих на основе исходных данных специфичных для ГИС осуществлять необходимые расчеты (математическим аппаратом при этом преимущественно являются методы вычислительной геометрии). Математические модели, описывающие процесс локализации нефтяного разлива боновыми заграждениями отсутствуют, что, соответственно, не позволяет оптимизировать

параметры тактики локализации [7, 8].

**Постановка задачи.** Задачей данной работы является построение математической модели, описывающей курс движения судна при постановки им бонов для локализации динамического нефтяного разлива на морской акватории в реальных гидро- и метеоусловиях.

**Основной материал.** Зададим на акватории моря неподвижную глобальную декартову систему координат, у которой оси будут направлены по сторонам света. На практике удобно данную систему координат связать с системой координат электронной карты местности (береговой линии, карты течений, стационарных объектов морской инфраструктуры и т.д.)

**Входными данными модели** являются:

- метеорологические и гидрологические условия - континуальные векторные поля приповерхностных течений  $\vec{V}_f(v_{fx}(x; y); v_{fy}(x; y))$  и приповерхностного ветра  $\vec{V}_w(v_{wx}(x; y); v_{wy}(x; y))$ , задаваемые в глобальной системе координат, а также степень  $\lambda$  волнения водной поверхности (полагаем ее постоянной для всей зоны разлива) [6].

Направление ветра или течения в глобальной системе координат определяется выражением

$$\theta_{f,w}(x; y) = \arctan(v_{fy,wy}(x; y), v_{fx,wx}(x; y)). \quad (1)$$

Скорость ветра и течения в глобальной системе координат определяется как

$$V_{f,w}(x; y) = \sqrt{v_{fx,wx}^2(x; y) + v_{fy,wy}^2(x; y)}. \quad (2)$$

Информация о течениях может быть получена из специализированных электронных карт акваторий, хранящих информацию о береговой линии и рельефе дна. Также поле течений может быть получено путем использования специализированных программных продуктов-солверов, в основе которых лежат гидродинамические модели.

Поле ветра, как правило, пространственно гораздо более однородно (особенно в открытом море) [3] и поэтому внутри габаритов малого разлива может считаться однородным.

- прогноз динамики в  $i$ -ые ( $i = 0, 1, 2, \dots, I$ ) дискретные моменты времени с шагом  $\Delta t$  каждого  $j$ -ого ( $j = 1, 2, \dots, J_i$ ) контура  $\bar{\Theta}_{ij} = \bar{\Theta}_j(t_i)$  разлива. Данный прогноз задается в глобальной системе координат в векторизованном виде набором координат вершин аппроксимирующих ломаных, описывающих контуры отдельных нефтяных пятен. Прогнозная информация может быть получена с использованием специализированных программных продуктов [9-12] на основе оперативных данных дистанционного мониторинга водной поверхности [13] с использованием метеорологической и гидрологической информации.

Массив (3) задает контуры всех пятен в  $i$ -ый момент времени

$$A_{\bar{\Theta}_i} = \begin{bmatrix} A_{\bar{\Theta}_{i1}} \\ A_{\bar{\Theta}_{i2}} \\ \dots \\ A_{\bar{\Theta}_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [(x_{i11}; y_{i11}), \dots, (x_{i1K_{i1}-1}; y_{i1K_{i1}-1}), (x_{i1K_{i1}}; y_{i1K_{i1}})] \\ [(x_{i21}; y_{i21}), \dots, (x_{i2K_{i2}-1}; y_{i2K_{i2}-1}), (x_{i2K_{i2}}; y_{i2K_{i2}})] \\ \dots \dots \dots \dots \\ [(x_{ij1}; y_{ij1}), \dots, (x_{ijK_{ij}-1}; y_{ijK_{ij}-1}), (x_{ijK_{ij}}; y_{ijK_{ij}})] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $(x_{ijk}; y_{ijk})$  - координата  $k$ -ой вершины ( $k = 1, 2, \dots, K_{ij}$ )  $j$ -ого контура в  $i$ -ый момент времени;  $K_{ij}$  - количество вершин  $j$ -ого контура в  $i$ -ый момент времени. В силу замкнутости границы первая и последняя точки каждого контура в каждый момент времени совпадают, т.е.  $(x_{ij1}; y_{ij1}) = (x_{ijK_{ij}}; y_{ijK_{ij}}) \forall i = 0 \dots I$  и  $j = 1 \dots J_i$ . Как явствует из зависимости  $J$  от  $i$ , количество пятен в различные моменты времени может быть разным.

Данные вершины позволяют [14] получить уравнение каждого из отрезков-сторон многоугольника, линейно аппроксимирующего контур разлива, и параметрически (с параметром  $m$ ) задать контур  $\bar{\Theta}_{ij}$  каждого  $j$ -ого пятна в каждый  $i$ -ый дискретный момент времени в виде единого выражения

$$\bar{\Theta}_{ij}(m) = \begin{cases} \bar{\Theta}_{ijx} = \sum_{k=1}^{K_{ij}-1} [x_{ijk} + (x_{ijk+1} - x_{ijk})(m - k)] \cdot [\eta(m - k) - \eta(m - (k + 1))]; \\ \bar{\Theta}_{ijy} = \sum_{k=1}^{K_{ij}-1} [y_{ijk} + (y_{ijk+1} - y_{ijk})(m - k)] \cdot [\eta(m - k) - \eta(m - (k + 1))], \end{cases} \quad (4)$$

где  $\eta(m)$  - функция Хэвисайда;  $k$  - номер вершины;  $m$  - непрерывный параметр,  $m \in [1; K_{ij}]$ .

Полученный таким образом контур каждого из пятен представляет собой невыпуклый многоугольник.

Каждое из пятен, ограниченное контуром  $\bar{\Theta}_{ij}$ , занимает область двумерного

пространства  $\Theta_{ij}$ . Вся область разлива  $\Theta_i = \bigcup_{j=1}^{J_i} \Theta_{ij}$ .

На рис. 1 представлен пример прогноза двухчасовой динамики загрязнения, изображение которого приведено в [13] в условиях модельного поля течений. Загрязнение представлено шестью разрозненными пятнами с начальной площадью от 0,007 до 2,7 га. При моделировании дрейфа в модельном неоднородном векторном поле скорости приповерхностных течений использован метод [9], в качестве моделируемых частиц выступали вершины оцифрованных контуров пятен.

- несвязная, в общем случае, зона  $\Phi$  запрета для плавания, граница  $\bar{\Phi}$  которой также задается ломаными линиями. Зоны запрета оговорены в лоциях и в электронных картах – территория суши, отмели, запретные районы, а также надводные и стационарные объекты морской инфраструктуры и акватории над важными подводными объектами. В терминологии ГИС данные зоны задаются как полигоны [15].

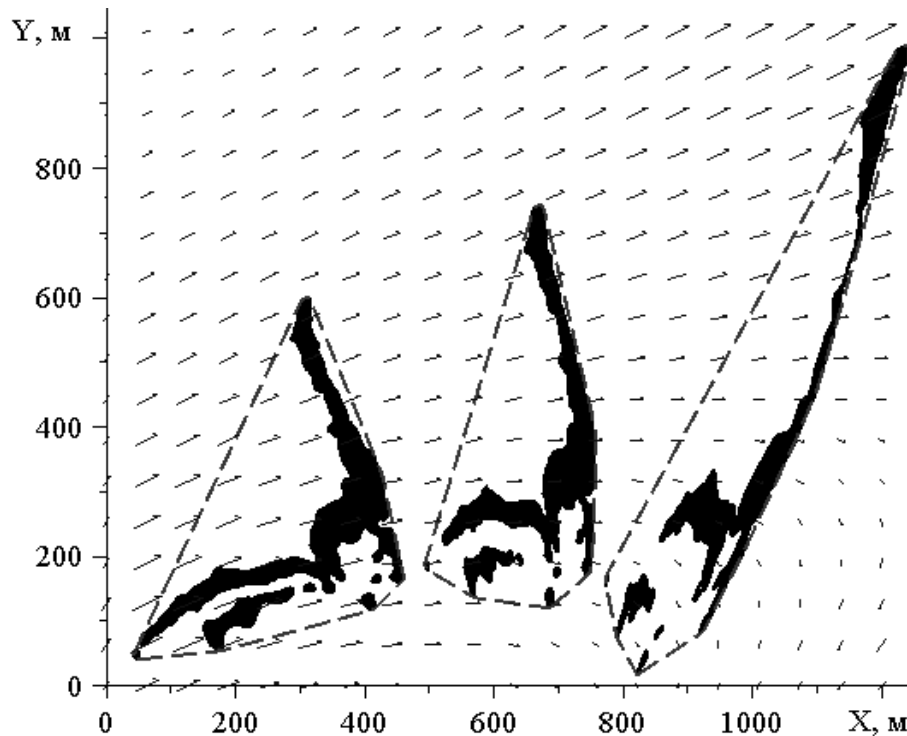


Рис. 1. Моделирование динамики группы нефтяных пятен и ее выпуклой оболочки в неоднородном модельном поле приповерхностных течений для  $T = 0; 60; 120$  мин

Принадлежность или непринадлежность произвольной точки  $(x; y)$  области  $\Phi$  определяется методами вычислительной геометрии [16, 17].

- тактико-технические данные судна-постановщика боновых заграждений - длина  $R_{LB}$  заграждений, запас и расход топлива, собственная скорость движения судна  $V$  при постановке им бонов, зависящая от степени волнения  $\lambda$ .

Последний параметр совместно с гидро- и метеоусловиями позволяет в локальной системе координат, связанной с самим судном, получить поле индикатрис  $GV^* = f(V(\lambda); \vec{V}_f(x; y); \vec{V}_w(x; y))$  скорости движения судна при постановке им бонов в условиях воздействия ветра, течения и волнения, т.е. определить в каждой точке области зависимость скорости движения судна от полярного угла  $\varphi$  (задаваемого в системе координат, связанной с движущимся судном) направления его движения в неоднородном поле  $\vec{V}_f(v_{fx}; v_{fy})$  течений и  $\vec{V}_w(v_{wx}; v_{wy})$  ветров, а также волнения  $\lambda$ .

Вид зависимости  $GV^*(\lambda)$  определяется мощностными, гидро- и аэродинамическими характеристиками судов и является уникальным для каждого из их типов. Данное выражение может быть получено на основании обработки соответствующих экспериментальных данных.

Индикатриса скорости в локальной системе координат, связанной с самим судном, изотропна по полярному углу, т.е. одинакова во всех направлениях движения.

В глобальной же системе координат в условиях неоднородного поля приповерхностных течений, оказывающих влияние на скорость перемещения судна,

индикатриса будет представлять собой векторную сумму собственной скорости движения судна, скорости течения и эффективной скорости ветрового воздействия

$$GV^*(\lambda, \varphi, x, y) = \begin{cases} V(\lambda) \cos \varphi + v_{fx}(x, y) + k_w(\theta_w - \varphi)v_{wx}; \\ V(\lambda) \sin \varphi + v_{fy}(x, y) + k_w(\theta_w - \varphi)v_{wy}, \end{cases}$$

где  $k_w(\theta_w - \varphi)$  - коэффициент влияния скорости ветра, определяемый парусностью судна, которая в свою очередь зависит от разности  $\theta_w - \varphi$  направления скорости ветра  $\theta_w$  и румба движения судна  $\varphi$ , и который является уникальным для каждого типа судов. Определение вида зависимостей  $k_w(\theta_w - \varphi)$  и  $V(\lambda)$  возможно путем аппроксимации соответствующих экспериментальных данных.

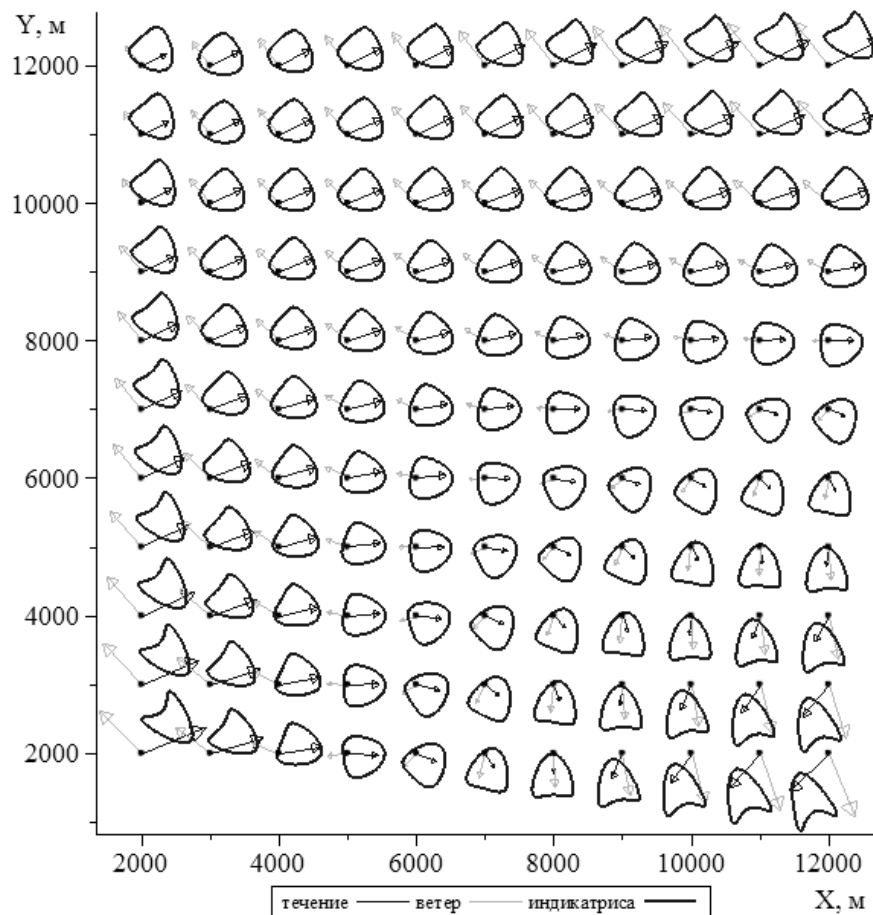


Рис. 2. Пример неоднородного поля ЛГТД для модельных полей ветра и течений

При этом уравнение линии границы транспортной достижимости (ЛГТД) за время  $T$  будет иметь вид

$$GP(\lambda, \varphi, x, y) = \begin{cases} x + T \cdot (V(\lambda) \cos \varphi + v_{fx}(x, y) + k_w(\theta_w)v_{wx}); \\ y + T \cdot (V(\lambda) \sin \varphi + v_{fy}(x, y) + k_w(\theta_w)v_{wy}). \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 2 приведен пример неоднородного поля ЛГТД для модельных полей ветра и течений в узлах квадратной решетки.

- время суток. В общем случае скорость локализации является функцией времени суток. Поскольку в темное время суток  $T_d = [t_1; t_2]$  (где  $t_1(T_e)$  - время вечерних сумерек;  $t_2(T_e)$  - рассветное время;  $T_e$  - время года) аварийные работы не проводятся, то годограф скорости локализации будет иметь вид

$$GV(\varphi; x; y; t) = \begin{cases} GV^*(\varphi; x; y), & t \notin T_d(T_e) \wedge (x; y) \subset \Phi; \\ 0, & t \in T_d(T_e) \vee (x; y) \not\subset \Phi. \end{cases} \quad (6)$$

**Модель локализации нефтяного разлива в открытом море.** В [13] описаны возможности авиационного детектирования нефтяных загрязнений на акватории моря. Преимуществом авиационных методов является их оперативность и высокая разрешающая способность. Изображение контуров группы пятен, полученное авиационным методом, может быть векторизовано, т.е. в локальной системе координат с известным масштабом контур загрязнения может быть задан массивом  $A$  вершин ломаных, аппроксимирующих контуры отдельных сликов (нефтяных пятен) в виде (3).

Располагая данной информацией, руководитель ликвидации АРН должен принять решение о тактике локализации группы пятен одним боновым заграждением известной длины  $P_{LB}$ .

Чтобы принять или отвергнуть данное решение, руководитель должен соотнести тактические возможности имеющихся в его распоряжении сил и средств с масштабом задачи. Такая оценка должна базироваться на соответствующих расчетах. В частности, необходимо выяснить, достаточна ли длина наличных боновых заграждений для осуществления локализации.

Очевидно, что в открытом море нет смысла повторять все изгибы невыпуклого пятна (группы пятен) при локализации их боновыми заграждениями, тем самым увеличивая необходимую длину бонов. Достаточно ограничить движение выпуклой области  $\Omega_i$ , включающей в себя область разлива  $\Theta_i$ , линией  $\bar{\Omega}_i$  минимальной длины.

Данную задачу можно формализовать в следующей постановке

$$\bar{\Omega}_i \rightarrow \min \mid \Theta_i \subseteq \Omega_i. \quad (7)$$

Решением задачи (7) при наличии информации в виде (3) о пространственных параметрах АРН является выпуклая оболочка (ВО) [16], охватывающая все точки массива  $A_{\bar{\Theta}_i}$  ломаной линией – выпуклым многоугольником.

Расчет ВО возможен с помощью алгоритмов [16]. Программная реализация алгоритма «Заворачивания подарка» осуществлена в работе [18]. Пример ВО для группы пятен проиллюстрирован выше на рис. 1.

Использование данного алгоритма позволяет задать ВО массивом координат ее вершин

$$A_{\bar{\Omega}_i} = [(x_{i1}; y_{i1}), (x_{i2}; y_{i2}), \dots, (x_{iN_i-1}; y_{iN_i-1}), (x_{iN_i}; y_{iN_i})], \quad (8)$$

где  $N_i$  - количество вершин ВО в  $i$ -ый момент времени.

Уравнение ВО может быть получено также как (4) из массива (8). В отличие от  $\bar{\Theta}_i$  многоугольник  $\bar{\Omega}_i$  является выпуклым, поэтому в дальнейшем удобно описывать ВО параметрически с параметром – полярным углом. Для этого необходимо определить координаты полюса в глобальной системе координат.

Для массива  $A_{\bar{\Omega}_i}$  в каждый дискретный  $i$ -ый момент времени можно найти координаты  $(x_{0i}; y_{0i})$  центраоида (центра масс полигона) в виде [17]

$$x_{0i} = \frac{\sum_{n=1}^{N_i} (y_{in+1} - y_n) (x_{in+1}^2 + x_{in}^2 + x_{in+1}x_{in})}{3 \sum_{n=1}^{N_i} (x_{in+1} - x_{in})(y_{in+1} + y_{in})};$$

$$y_{0i} = \frac{\sum_{n=1}^{N_i} (x_{in+1} - x_n) (y_{in+1}^2 + y_{in}^2 + y_{in+1}y_{in})}{3 \sum_{n=1}^{N_i} (y_{in+1} - y_{in})(x_{in+1} + x_{in})}.$$
(9)

Выпуклость ВО позволяет в полярной системе координат с полюсом в точке центраоида  $(x_{0i}; y_{0i})$  получить полярное уравнение отрезка - отдельного звена ломаной ВО в виде

$$\rho_{in}(\varphi) = \frac{y_{in}(x_{in+1} - x_{in}) - x_{in}(y_{in+1} - y_{in})}{\sin \varphi (x_{in+1} - x_{in}) - \cos \varphi (y_{in+1} - y_{in})},$$

$$\varphi \in [\arctg(y_{in}, x_{in}); \arctg(y_{in+1}, x_{in+1})].$$
(10)

Соответственно, вся ВО в  $i$ -ый момент времени в локальной полярной системе координат с центром в  $(x_{0i}; y_{0i})$  задается в виде выражения

$$\bar{\Omega}_i^0(\varphi) = \sum_{n=1}^{N_i-1} \rho_{in}(\varphi) \cdot [\eta(\varphi - \varphi_{in}) - \eta(\varphi - \varphi_{in+1})], \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \quad (11)$$

где  $\eta(\varphi)$  - функция Хэвисайда,  $\varphi_{in} = \arctg(y_{in}, x_{in})$ .

Соответственно, параметрическое уравнение ВО в декартовой системе координат в дискретные моменты времени примет вид

$$\bar{\Omega}_i(\varphi) = \begin{cases} \bar{\Omega}_{ix}(\varphi) = x_{0i} + \bar{\Omega}_i^0(\varphi) \cdot \cos \varphi; \\ \bar{\Omega}_{iy}(\varphi) = y_{0i} + \bar{\Omega}_i^0(\varphi) \cdot \sin \varphi. \end{cases} \quad (12)$$

Полученные контуры (12) могут быть линейно интерполированы по времени согласно процедуре [19], что позволяет получить континуальное уравнение  $\bar{\Omega}(\varphi, t)$  выпуклой оболочки в произвольный момент времени  $t \in [0; I \cdot \Delta t]$  в декартовых глобальных координатах в параметрическом виде

$$\bar{\Omega}(\varphi, t) = \begin{cases} \bar{\Omega}_x = \sum_{i=1}^I \left[ x_{0i} + \bar{\Omega}_i^0 \cdot \cos \varphi + \frac{(t - \Delta t \cdot i)(x_{0i+1} - x_{0i} + (\bar{\Omega}_{i+1}^0 - \bar{\Omega}_i^0) \cdot \cos \varphi)}{\Delta t} \right]; \\ \bar{\Omega}_y = \sum_{i=1}^I \left[ y_{0i} + \bar{\Omega}_i^0 \cdot \sin \varphi + \frac{(t - \Delta t \cdot i)(y_{0i+1} - y_{0i} + (\bar{\Omega}_{i+1}^0 - \bar{\Omega}_i^0) \cdot \sin \varphi)}{\Delta t} \right]. \end{cases} \quad (13)$$

Получив уравнение (13), можно перейти к модели локализации ВО разлива боновыми заграждениями.

В силу неоднородности векторного поля скорости приповерхностных течений, приводящей к анизотропии скорости движения судна в глобальной системе координат, невозможно осуществить построения в локальной системе, связанной с движущимся центроидом выпуклой оболочки. Поэтому данные построения необходимо осуществлять в неподвижной глобальной системе координат.

Пусть в момент времени  $t$  в глобальной системе координат задана в виде (13) ВО разлива. Зададим малый прирост времени  $\Delta \tilde{t}$ . За это время выпуклая оболочка  $\bar{\Omega}(\varphi, t)$  сместиться и трансформируется в  $\bar{\Omega}(\varphi, t + \Delta \tilde{t})$  (на рис. 3 данные изменения гипертрофированы).

Пусть в момент времени  $t$  из точки с координатами  $\bar{\Omega}(\varphi', t)$  начинается локализация разлива судном-бонопостановщиком со скоростью  $GV(\varphi; x; y; t)$  при условии, что

$$\begin{aligned} x &= \bar{\Omega}_x(\varphi', t); \\ y &= \bar{\Omega}_y(\varphi', t). \end{aligned} \quad (14)$$

в направлении движения  $\varphi = \alpha$ .

Данное направление может быть найдено на основе следующих построений. За малое время  $\Delta \tilde{t}$  судно-бонопостановщик переместиться из точки  $A(\bar{\Omega}_x(\varphi', t), \bar{\Omega}_y(\varphi', t))$  в точку  $B(\bar{\Omega}_x(\varphi' + \Delta \varphi, t + \Delta \tilde{t}), \bar{\Omega}_y(\varphi' + \Delta \varphi, t + \Delta \tilde{t}))$ , где  $\Delta \varphi$  - угол малого смещения вдоль динамического контура  $\bar{\Omega}(\varphi, t)$ . Соответственно, угол  $\alpha$  может быть определен как

$$\alpha = \arctg(\bar{\Omega}_y(\varphi' + \Delta \varphi, t + \Delta \tilde{t}) - \bar{\Omega}_y(\varphi', t); \bar{\Omega}_x(\varphi' + \Delta \varphi, t + \Delta \tilde{t}) - \bar{\Omega}_x(\varphi', t)). \quad (15)$$



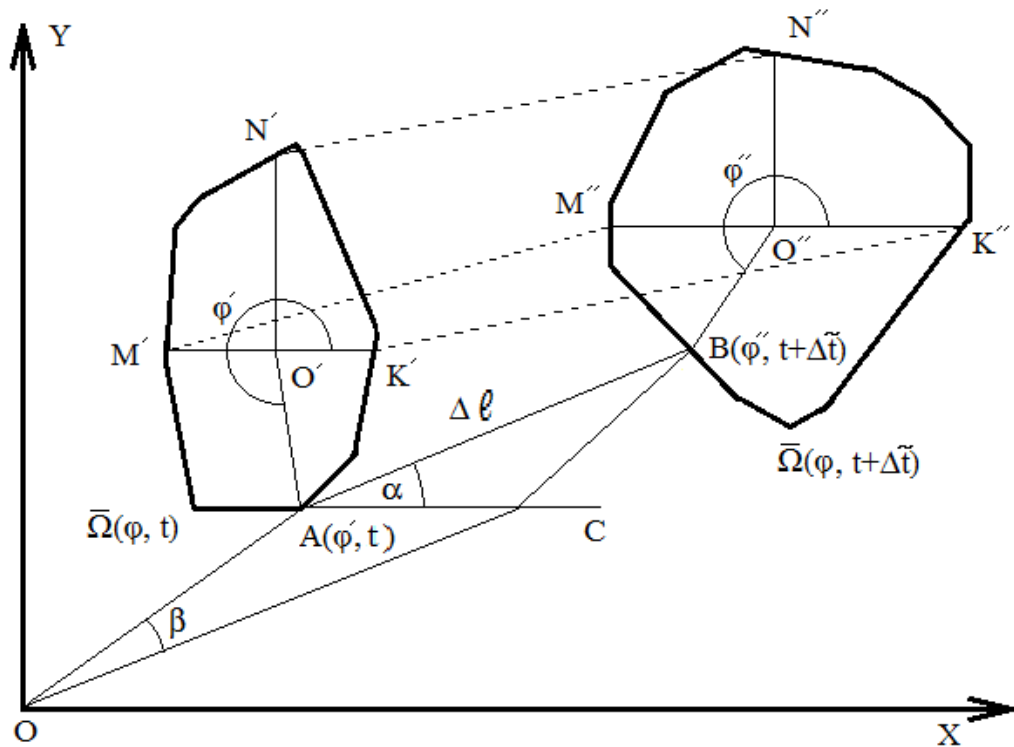


Рис. 3. Построение траектории движения судна

Раскладывая слагаемые  $\bar{\Omega}_{x,y}(\varphi' + \Delta\varphi, t + \Delta\tilde{t})$  в ряд Тейлора и ограничиваясь линейными членами разложения

$$\bar{\Omega}_{x,y}(\varphi + \Delta\varphi, t + \Delta\tilde{t}) \approx \bar{\Omega}_{x,y}(\varphi, t) + \frac{\partial \bar{\Omega}_{x,y}(\varphi, t)}{\partial \varphi} \Delta\varphi + \frac{\partial \bar{\Omega}_{x,y}(\varphi, t)}{\partial t} \Delta\tilde{t}, \quad (16)$$

после сокращения получим

$$\alpha = \text{arctg} \left( \frac{\frac{\partial \bar{\Omega}_y(\varphi, t)}{\partial \varphi} \Delta\varphi + \frac{\partial \bar{\Omega}_y(\varphi, t)}{\partial t} \Delta\tilde{t}}{\frac{\partial \bar{\Omega}_x(\varphi, t)}{\partial \varphi} \Delta\varphi + \frac{\partial \bar{\Omega}_x(\varphi, t)}{\partial t} \Delta\tilde{t}} \right). \quad (17)$$

В силу малости временного интервала  $\Delta\tilde{t}$  скорость  $GV(\alpha, \bar{\Omega}_x(\varphi', t), \bar{\Omega}_y(\varphi', t), t)$  на малом участке АВ траектории движения судна можно считать постоянной. Поэтому длина  $\Delta l$  данного отрезка

$$\Delta l = GV(\alpha, \bar{\Omega}_x(\varphi', t), \bar{\Omega}_y(\varphi', t), t) \cdot \Delta\tilde{t}. \quad (18)$$

При этом согласно теореме косинусов (см. рис. 3)

$$\begin{aligned} & \overline{\Omega}^2(\varphi', t) + \overline{\Omega}^2(\varphi' + \Delta\varphi, t + \Delta\tilde{t}) - 2\overline{\Omega}(\varphi', t)\overline{\Omega}(\varphi' + \Delta\varphi, t + \Delta\tilde{t}) \cos \beta - \\ & - \left( \text{GV}(\alpha, \overline{\Omega}_x(\varphi', t), \overline{\Omega}_y(\varphi', t), t) \cdot \Delta\tilde{t} \right)^2 = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} \overline{\Omega}(\varphi', t) &= \sqrt{\overline{\Omega}_x^2(\varphi', t) + \overline{\Omega}_y^2(\varphi', t)}; \\ \overline{\Omega}(\varphi' + \Delta\varphi, t + \Delta\tilde{t}) &= \sqrt{\overline{\Omega}_x^2(\varphi' + \Delta\varphi, t + \Delta\tilde{t}) + \overline{\Omega}_y^2(\varphi' + \Delta\varphi, t + \Delta\tilde{t})}, \end{aligned} \quad (20)$$

а угол

$$\beta = \arctg(\overline{\Omega}_y(\varphi', t); \overline{\Omega}_x(\varphi', t)) - \arctg(\overline{\Omega}_y(\varphi' + \Delta\varphi, t + \Delta\tilde{t}); \overline{\Omega}_x(\varphi' + \Delta\varphi, t + \Delta\tilde{t})). \quad (21)$$

В силу того, что

$$\cos(\arctg(a; b) - \arctg(c; d)) = \frac{ac + bd}{\sqrt{a^2 + b^2} \sqrt{c^2 + d^2}}, \quad (22)$$

с учетом (21) получаем

$$\begin{aligned} \cos \beta &= \frac{1}{\sqrt{\overline{\Omega}_x^2(\varphi', t) + \overline{\Omega}_y^2(\varphi', t)}} \left( \overline{\Omega}_y(\varphi', t) \left[ \overline{\Omega}_y(\varphi', t) + \frac{\partial \overline{\Omega}_y(\varphi, t)}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi'} \Delta\varphi + \frac{\partial \overline{\Omega}_y(\varphi', t)}{\partial t} \Delta\tilde{t} \right] + \right. \\ &+ \overline{\Omega}_x(\varphi', t) \left[ \overline{\Omega}_x(\varphi', t) + \frac{\partial \overline{\Omega}_x(\varphi, t)}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi'} \Delta\varphi + \frac{\partial \overline{\Omega}_x(\varphi', t)}{\partial t} \Delta\tilde{t} \right] \Big) \times \\ &\times \left( \left[ \overline{\Omega}_y(\varphi', t) + \frac{\partial \overline{\Omega}_y(\varphi, t)}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi'} \Delta\varphi + \frac{\partial \overline{\Omega}_y(\varphi', t)}{\partial t} \Delta\tilde{t} \right]^2 + \right. \\ &\left. + \left[ \overline{\Omega}_x(\varphi', t) + \frac{\partial \overline{\Omega}_x(\varphi, t)}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi'} \Delta\varphi + \frac{\partial \overline{\Omega}_x(\varphi', t)}{\partial t} \Delta\tilde{t} \right]^2 \right)^{-1/2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Задавая конкретный вид (6), (13) и шаг по времени  $\Delta\tilde{t}$ , подставляя (21) в (22), а затем в (19), получим неявное уравнение, решая которое численно относительно  $\Delta\varphi$ , получим новые координаты местоположения судна-бонопостановщика за один временной шаг.

Повторяя итерационно данную процедуру, получим набор дискретных координат – вершин ломаной, аппроксимирующей траекторию движения судна при локализации им нефтяного разлива в виде линии, уравнение которой задается также как уравнение линии (4).

На рис. 4 приведены примеры рассчитанного курса движения судна при его

движении вдоль ВО разлива и постановке J-образного бонового заграждения. Очевидно, что выбор точки старта, а также направления движения (у уравнения (19) два действительных решения, соответствующих положительному и отрицательному направлению обхода динамической ВО) приводит к разным курсам, поэтому варьируя их, можно получить минимум длины курса (и минимум длины бонового заграждения), решив тем самым задачу нахождения оптимальных параметров тактики локализации разлива.

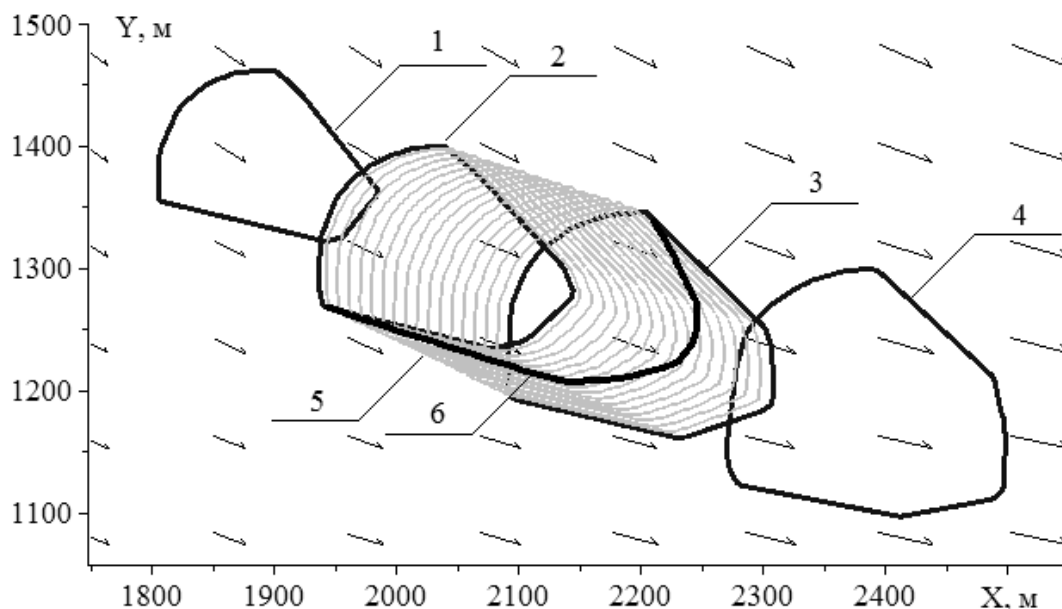


Рис. 4. Расчет курса движения судна при локализации разлива. Линии: 1 -  $\bar{\Omega}_{i-1}(\varphi)$ ; 2 -  $\bar{\Omega}_i(\varphi)$ ; 3 -  $\bar{\Omega}_{i+1}(\varphi)$ ; 4 -  $\bar{\Omega}_{i+2}(\varphi)$ ; 5 -  $\bar{\Omega}(\varphi; t_i + k \cdot \Delta \tilde{t})$ ; 6 – курс движения судна при постановке бонов

**Заключение.** Предложена ГИС модель локализации нефтяного загрязнения на акватории моря судном-бонопостановщиком. Модель может быть использована как элемент автоматизированной системы оперативного составления ПЛАРН.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мамедов А.К. Каспию быть чистым / А.К. Мамедов. – Баку: ОКА Офсет, 2004. – 415 с.
2. Асадов С.Б. Закономерности распространения нефтяного загрязнения в Каспийском море: Автореф. дис....к-та географ. наук. СПб, 2003. – 20 с.
3. Мамедов Р.М. Изменчивость гидрофизических полей и распространение загрязнителей в Каспийском море. Р.М. Мамедов. - Баку: Елм, 2000. - 184с.
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 природоохранных 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. Альхименко А.И. Аварийные разливы нефти в море и борьба с ними / А.И. Альхименко // СПб: ОМ-Пресс, 2004. - 113 с.
8. Карабулин У.С. Методы ликвидации и предупреждения аварийных ситуаций при освоении месторождений углеводородного сырья / У.С. Карабулин // Алматы: Эверо, 2008. - 185 с.
9. Moghaddam A.A. A 2-D hybrid particle tracking /Eulerian-lagrangian model for oil spill problems / A.A. Moghaddam, A.B Dabir // Indian journal of geo-marine sciences. 2013. Vol. 42(1), p. 42-49.
10. Ocean modelling for coastal management – Case studies with MOHID / M. Mateus and R. Neves (eds.) IST Press, 2013. - 276 p.
11. Lehr W.J. Review of modeling procedures for oil spill weathering behavior / W.J. Lehr // HAZMAT Division, 2010. – 40 p.
12. Reed M. Oil Spill Modeling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art / M. Reed // Spill Science & Technology Bulletin. 1999. Vol. 5, No. 1, p. 3-16.
13. Процессор распознавания нефтяных пятен. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=378>.
14. Альшанов Г.Н. Принятие решения о возможности локализации разливов нефтепродуктов на акватории моря / Г.Н. Альшанов, А.А. Тарасенко // Проблемы надзвичайних ситуацій. – 2013. – Вип. 17. С. 11-17.
15. Mazurek J. Oil Spill Models: A State of the Art of the Grid Map as a Function of Wind, Current and Oil Parameters / J. Mazurek, L. Smolarek // The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2013. Vol. 7, N 1, p. 19-23.
16. Препарата Ф. Вычислительная геометрия: Введение / Ф. Препарата, М. Шеймос. - М.: Мир, 1989. - 478 с.
17. Андреева Е.В. Вычислительная геометрия на плоскости / Е.В. Андреева, Ю.Е. Егоров // Информатика. – 2002. - №40. – С. 28-31.
18. Альшанов Г.Н. Модель локализация боновыми заграждениями разлива нефти на акватории моря / Г.Н. Альшанов, А.А. Тарасенко // Проблемы надзвичайних ситуацій. – 2013. – Вип. 18. С. 9-16.
19. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения. Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко – Харьков: НУГЗУ, 2011. – 927 с.