

*В.Ю. Чанцев*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕЧЕНИЙ НА РАСТЕКАНИЕ НЕФТЯНОГО ПЯТНА В МОРЕ**

*V.Yu. Chantsev*

### **IMPACT OF CURRENTS ON SPREADING OF OIL IN THE SEA**

*На основе анализа сил, воздействующих на динамику нефтяных разливов, предлагается новый подход в расчете процесса растекания нефти от непрерывно действующего источника в течение некоторого времени. В процессе расчета производится оценка площади и толщины нефтяного пятна как сплошной нефтяной массы. Формирование нефтяного пятна описывается уравнением растекания, включающим основные силы, действующие на распространяющуюся по поверхности моря нефть в условиях отсутствия и наличия поверхностных течений. На основе разработанной модели рассматривается зависимость характера растекания нефти от различной интенсивности источника и скорости течения.*

*On the basis of the analysis of forces influencing the oil spill dynamics, a new approach to calculation of oil spread process from a continuously acting source during some time is offered. An estimation of the oil slick area and oil slick thickness as continuous oil mass is made during the calculation. The formation of oil slick is described by the spread equation, including the basic forces, acting on oil extending on the sea surface in conditions of the absence and presence of superficial currents. On the basis of developed model the dependence of oil spread character on various source intensity and current speed is considered.*

### **Введение**

Интенсивное техногенное развитие за последнее столетие привело к повышению энергопотребления. Нефть и нефтепродукты становятся одним из основных энергетических ресурсов, что привело к значительному увеличению содержания нефтяных углеводородов в морских водах [Симонов, 1984]. Мировой океан не в состоянии сегодня осуществлять естественное самоочищение от нефтяного загрязнения [Benggio, 1995]. Ухудшение экологической обстановки в районах, находящихся под нефтяным прессингом, сказывается на разрушении природных систем этих районов и на снижении их экономической привлекательности.

Сегодня значительные усилия направлены на разработку различных аппаратных и технических средств [Galt, 1996] для осуществления мероприятий мониторинга аварийных разливов нефти в море и уменьшения их негативных последствий. Наряду с мониторинговыми мероприятиями по контролю загрязнений морской среды немаловажную роль играет прогноз поведения и распределения нефтяного разлива под действием природных процессов, протекающих в окружающей среде.

Сложность физико-химических преобразований, происходящих в сырой нефти (или ее продуктах) в первые часы разлива, не позволяет сегодня разрабатывать точные методы расчета последствий нефтяного загрязнения. Существующие методы анализа и прогноза разливов нефти основаны на приближенных и вероятностных моделях. В таких моделях используются большие масштабы осреднения во времени, что позволяет исключать из рассмотрения процесс самого аварийного разлива и считать площадь пятна нефти уже сформировавшейся [HAZMAT modeling..., 2002].

Изучение данных об аварийных разливах нефти [Oil Spill..., 1992] свидетельствует, что в период разлива (до 1–2 суток) форма пятна нефти зависит как от динамики морской поверхности и приводного пограничного слоя атмосферы, так и от интенсивности источника загрязнения. Для упрощения расчета процесса растекания некоторые исследователи используют аппроксимации, описывающие последовательное влияние отдельных сил (например, [Fay, 1971; MacKay, 1979]) и позволяющие получить достаточно приблизительную оценку площади разлива.

Представленная работа описывает модель, включающую новый подход, заключающийся в рассмотрении объединенного влияния действующих сил и поверхностных течений на процесс растекания нефти от непрерывно действующего источника.

### **Описание модели**

Существующие расчеты процесса растекания нефти можно считать удовлетворительными, если источник загрязнения является мгновенным. При этом расчет площади нефтяного пятна производится отдельно для каждой фазы процесса после достижения толщины пленки некоторой критической величины, что в принципе является достаточно сильным приближением.

Как и в большинстве работ, полагаем, что растекание нефти от непрерывно действующего источника происходит под взаимным действием основных сил: инерционной, гравитационной, трения и поверхностного натяжения. При этом фазы растекания, определенные в [Журбас, 1978], можно выделять только условно.

Можно считать, что скорость растекания нефти ( $U_0$ ) постоянна на некотором небольшом интервале времени  $\Delta t$ . Тогда процесс растекания описывается стационарным уравнением движения растекающейся нефти, записанным для границы нефтяного пятна:

$$\rho_0 U_0 \frac{\partial U_0}{\partial r} = \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{\partial \tau_r}{\partial z} + \frac{\partial f_N}{\partial r}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – плотность нефти;  $U_0$  – скорость растекания нефтяного пятна;  $r$  – нормаль к границе пятна;  $\tau_r$  – касательное напряжение между двумя средами;  $f_N$  – поверхностное натяжение  $\sigma$ , отнесенное к толщине нефтяной пленки  $h_0$ .

На границе нефть – воздух задается условие равенства потоков импульса с учетом движения нефти и воды:

$$\frac{\tau_r^h}{\rho_0} = \frac{\nu_0 \rho_w \nu_w}{\rho_w \nu_w h_0 + \rho_0 \nu_0 \delta_w} (U_0 - U_w^r), \quad (2)$$

где  $\nu_w$ ,  $\nu_0$  – коэффициенты кинематической вязкости воды и нефти;  $\delta_w$  – толщина вязкого подслоя в воде;  $\rho_w$  – плотность воды;  $\tau_r^h$  – касательное напряжение на границе между водой и нефтью в направлении растекания;  $U_w^r$  – нормальная к границе пятна составляющая скорости течения.

Скорость изменения площади нефтяного разлива ( $S_0$ ) неразрывно связана с интенсивностью источника ( $\nu_0$ ):

$$\frac{dS_0}{dt} = \frac{\nu_0}{h_0} - \frac{V_0}{h_0^2} \frac{dh_0}{dt}, \quad (3)$$

где  $V_0$  – объем вылившейся нефти.

В этом уравнении толщина пленки определяется из уравнения неразрывности, проинтегрированного по контуру нефтяного пятна:

$$h_0 = \frac{\nu_0}{U_0 L} + \frac{V_0}{\delta_r L}, \quad (4)$$

где  $L$  – длина контура пятна нефти;  $\delta_r$  – смещение границы пятна нефти по нормали  $r$  за интервал времени  $\Delta t$ , на котором  $U_0$  принимается постоянной.

Однозначное и непрерывное решение уравнения (1) получается при интегрировании его по толщине нефтяной пленки с учетом (2) и (4):

$$U_0^2 \left( \frac{\nu_0}{U_0 L} + \frac{V_0}{\delta_r L} \right) = 2\beta \left( \frac{\nu_0}{U_0 L} + \frac{V_0}{\delta_r L} \right)^2 - 2\delta_r \gamma U_0 + 2\delta_r \gamma U_w^r + \frac{2}{\rho_0} \sigma, \quad (5)$$

где 
$$\beta = g \frac{(\rho_w - \rho_0)}{\rho_0}; \quad \gamma = \frac{\nu_0 \rho_w V_w}{\rho_w \nu_w h_0 + \rho_0 \nu_0 \delta_w}.$$

Увеличение площади нефтяного пятна и изменение его формы определяется величиной смещения кромки пятна в направлении внешней нормали ( $\delta_r$ ).

Приняв скорость потока постоянной на некотором интервале времени, можно сказать, что толщина вязкого подслоя ( $\delta_w$ ) из условия размерности будет определяться как и в работах [Ландау, 1988] и [Монин, 1992]:

$$\delta_w = 1,72(\nu_w t)^{1/2}.$$

При попадании нефти на поверхность воды на боковой границе нефтяного пятна будет формироваться баланс сил поверхностного натяжения: вода – воздух ( $\sigma_{wa}$ ), вода – нефть ( $\sigma_{wo}$ ) и нефть – воздух ( $\sigma_{ao}$ ). Причем сила поверхност-

ного натяжения вода – воздух на границе пятна нефти всегда направлена в сторону внешней нормали к этой границе, а силы поверхностного натяжения вода – нефть и нефть – воздух – в противоположную [Кикоин, 1963].

Смещение нефтяного пятна, как и его границы, от источника разлива будет определяться скоростью смещения, выраженной как сумма скорости растекания ( $U_0$ ) и скорости дрейфа ( $U_d$ ):

$$U = U_0 + U_d. \quad (6)$$

Дрейф больших объемов нефти, взаимодействующих только с водой, можно описать уравнениями экмановского переноса:

$$\begin{aligned} -v_d f &= -\frac{\tau_x^h}{\rho_0 h_0}, \\ u_d f &= -\frac{\tau_y^h}{\rho_0 h_0}. \end{aligned} \quad (7)$$

Полагая, что скорость движения воды в молекулярном вязком подслое отличается от скорости течения в верхнем слое моря, можно учесть этот момент при описании динамического взаимодействия нефти и воды. Тогда для скорости дрейфового движения нефти запишем:

$$U_d = (2 - \beta_1) + U_w \beta_2, \quad (8)$$

где 
$$\beta_1 = 1 + \frac{\rho_0 v_0 \delta_w}{\rho_w v_w h_0 + \rho_0 v_0 \delta_w}; \beta_2 = 1 - \frac{\rho_0 v_0 \delta_w}{\rho_w v_w h_0 + \rho_0 v_0 \delta_w}.$$

Подставив выражения (2) и (8) в систему экмановских уравнений (7) и проведя небольшие преобразования, получим окончательные выражения для дрейфовых компонент скорости переноса нефтяного пятна:

$$\begin{aligned} u_d \left[ 1 + \left( \frac{2\gamma}{fh_0\beta_1} \right)^2 \right] &= \left[ \left( \frac{2\gamma}{fh_0\beta_1} \right)^2 - \frac{\beta_2}{\beta_1} \right] u_w + \frac{2\gamma}{fh_0\beta_1} \left( \frac{\beta_2}{\beta_1} + 1 \right) v_w, \\ v_d \left[ 1 + \left( \frac{2\gamma}{fh_0\beta_1} \right)^2 \right] &= \left[ \left( \frac{2\gamma}{fh_0\beta_1} \right)^2 - \frac{\beta_2}{\beta_1} \right] v_w - \frac{2\gamma}{fh_0\beta_1} \left( \frac{\beta_2}{\beta_1} + 1 \right) u_w. \end{aligned} \quad (9)$$

### **Результаты вычислительных экспериментов**

В вычислительных экспериментах источник задавался большой мощности ( $10^4$  т) для того, чтобы была возможность сравнивать результаты расчетов растекания нефти с имеющимися экспериментальными исследованиями [Журбас, 1978] и [Озмидов, 1986]. В отличие от указанных работ источник задавался не точным, а имел конечные размеры. Для выявления особенностей растекания

нефти от непрерывно действующего источника расчеты проводились при различных расходах источника (0,1; 0,5 и 1,0 м<sup>3</sup>/с) и различных скоростях течения (0,5 и 1,0 м/с).

Уравнение (6), представляющее обобщенное влияние действующих сил в отличие от схемы, предложенной в [Журбас, 1978], позволяет вычислять площадь и толщину нефтяного пятна в неоднородных условиях окружающей среды. С помощью такого подхода можно более точно оценить роль основных механизмов, влияющих на скорость и направление распространения нефти.

Все основные силы имеют разный масштаб воздействия на растекание в зависимости от толщины нефтяной пленки, но несмотря на это они действуют непрерывно с самого начала растекания. Причем роль каждой из сил на разных этапах растекания зависит от интенсивности действующего источника. Исходя из этого можно предположить, что при практических расчетах более целесообразно использовать уравнение (6), что влечет за собой некоторые изменения в представлении о временной структуре процесса растекания нефти.

Чисто физически крупных мгновенно действующих источников разлива нефти не существует, поэтому необходимо рассматривать растекание нефтяного пятна от источника, действующего в течение некоторого интервала времени, который может иметь продолжительность до нескольких десятков часов. Величина расхода источника ( $v_0$ ) сильно влияет на характер и время растекания нефти. При  $v_0 = 0,1$  м<sup>3</sup>/с наблюдается линейный характер зависимости изменения площади нефтяного пятна (рис. 1а) и его толщины (рис. 1б) от времени. Причем продолжительность растекания, в зависимости от величины расхода и продолжительности действия источника, меняется от  $4 \cdot 10^4$  до  $1 \cdot 10^5$  с. Небольшое сокращение общей продолжительности растекания по сравнению с [Озмидов, 1986] связано с одновременным, а не последовательным действием основных вынуждающих сил.

Существующие течения в поверхностном слое воды вытягивают пятно разливающейся нефти от источника в направлении действия течения. Степень вытягивания зависит как от скорости течения, так и от интенсивности действия источника (рис. 2). При интенсивности источника в 0,1 м<sup>3</sup>/с и скорости течения 0,5 м/с форма пятна практически остается круглой. При увеличении скорости течения или уменьшении интенсивности источника форма пятна приобретает более вытянутый вид.

При проведении различных численных экспериментов была обнаружена интересная особенность. В процессе вытягивания нефтяного пятна от источника загрязнения под действием течения отношение его максимальных размеров вдоль течения и поперек течения остается постоянным ( $X:Y \approx 1,73:1$ ) не только в период действия источника, но и после его окончания (рис. 3). Это означает, что скорость течения оказывает вытягивающее воздействие только в период действия источника, а при прекращении его действия постоянное и одностороннее поле течения только переносит пятно и не влияет на его форму.

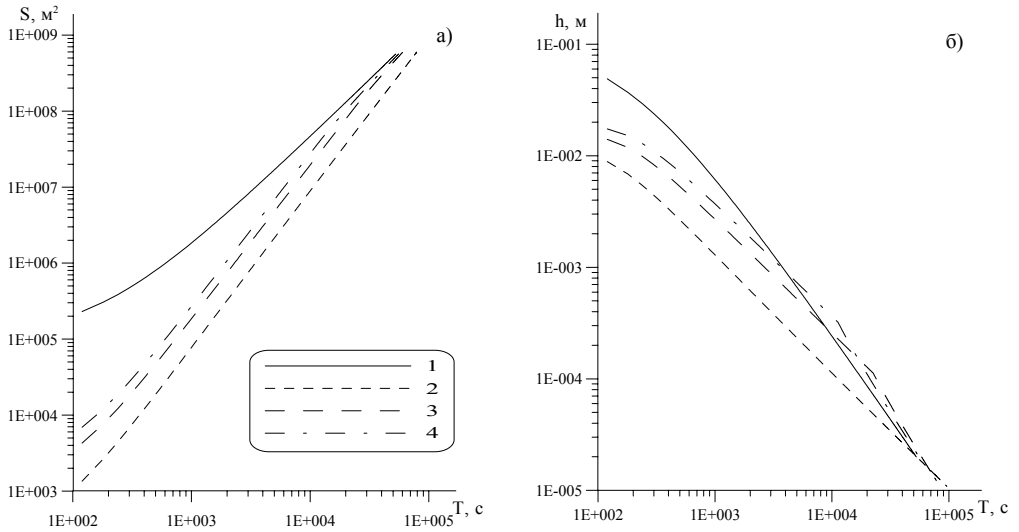


Рис. 1. Изменение во времени площади нефтяного пятна (а) и его толщины (б) при различных интенсивностях источника: 1 – мгновенно действующий источник; 2 – при  $v_0 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 – при  $v_0 = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 4 – при  $v_0 = 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$ .

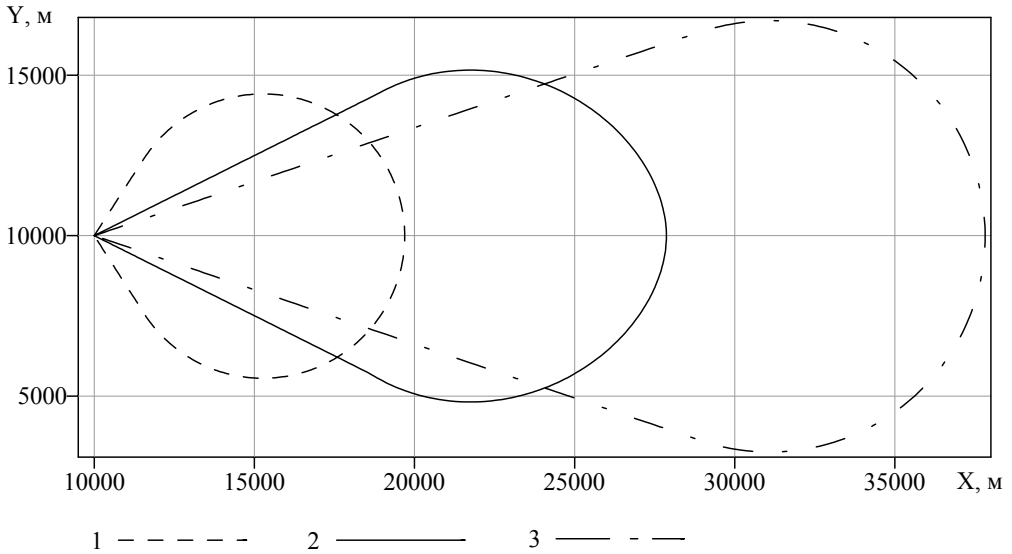


Рис. 2. Интенсивность растекания нефти от непрерывно действующего источника при различной интенсивности вытекания ( $v_0$ ) и скорости течения: 1 –  $v_0 = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $u_w = 0,5 \text{ м/с}$ ; 2 –  $v_0 = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $u_w = 0,5 \text{ м/с}$ ; 3 –  $v_0 = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $u_w = 1 \text{ м/с}$ .

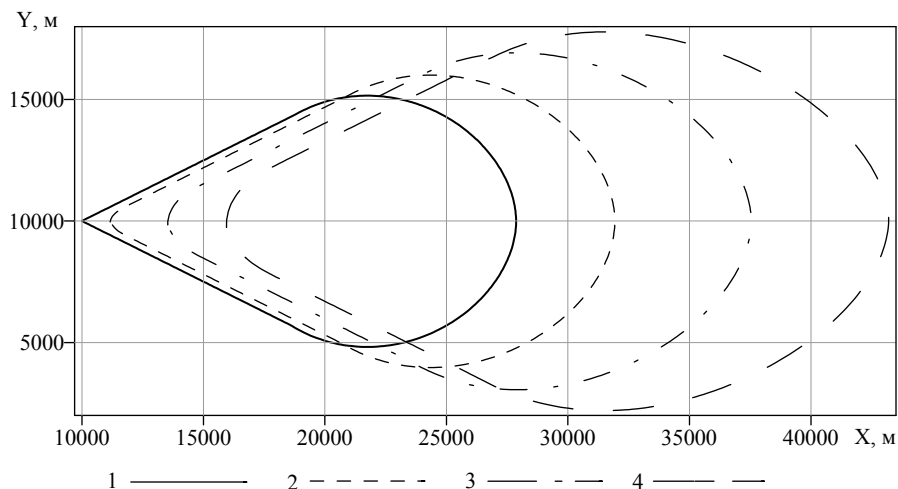


Рис. 3. Форма, размер и положение нефтяного пятна на разных этапах эволюции разлива при  $v_0 = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $u_w = 0,5 \text{ м/с}$ : 1 – через 10 ч; 2 – через 20 ч; 3 – через 40 ч; 4 – через 60 ч.

В заключение можно сказать, что разработанный метод расчета растекания нефти дает возможность производить расчет параметров нефтяного пятна с учетом не только переменной интенсивности источника, но и реально действующих течений.

### **Литература**

1. Журбас В.М. Основные механизмы распространения нефти в море. – Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа, 1978, т. 12, с. 144–159.
2. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1963. – 500 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика. Т. 4. – М.: Наука, 1988. – 736 с.
4. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Теория турбулентности. Т. 1. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 696 с.
5. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 280 с.
6. Симонов А.И., Назаров И.М., Грузинов В.М. и др. Баланс нефтяных углеводородов в Мировом океане (на примере Северной Атлантики). // Метеорология и гидрология, 1984, № 3, с. 64–72.
7. Benggio B., Charles Henry J., Jacqueline M., et al. Barge Morris J. Berman Spill. NOAA's Scientific Response. – HAZMAT Report 95–10, 1995, 63 p.
8. Fay J.A. The spread of oil slicks on a Calm Sea. – Oil on the sea / Ed. by D.P. Hoult, N.Y.: Plenum Press, 1969. P. 53–63.
9. Fay J.A. Physical processes in the spread of oil on a water surface. – Proc. 1971 Oil Spill Conference, American Petroleum Inst. Washington, 1971, P. 463–467.
10. Galt J.A., Payton D.L., Norris H., et al. Digital Distribution Standard for NOAA Trajectory Analysis Information. – HAZMAT Report 96–4, 1996, 49 p.
11. HAZMAT modeling products for spill response and planning. – NOAA Ocean Service OR&R, 2002, 43 p.
12. MacKay D., Bouist I., Mascarenhas R., et al. Oil spill processes and models. – Publication EE–88, Report for Fisheries and Environmental Canada, Ottawa, Ontario, 1979, 120 p.
13. Oil Spill 1967–1991. Case histories. Summaries of significant U.S. and international spills. – HMRAD Report No. 92–11, NOAA HMRAD, 1992, 224 p.