

УДК: 551.465-032.32

**РАСЧЕТ РАСТЕКАНИЯ НЕФТИ ПО ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ ОТ  
ИСТОЧНИКА ПЕРЕМЕННОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ****Чанцев Валерий Юрьевич**

кандидат географических наук, доцент

ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», г.  
Санкт-Петербург[chantsev@hotmail.com](mailto:chantsev@hotmail.com)**Аннотация**

Предложен новый подход в расчете процесса распространения нефти из источника, действующий в течение некоторого промежутка времени при аварийном разливе нефти. Расчет предполагает мощность источника, обеспечивающего продолжительность разлива от нескольких часов до 1-2 суток. Оценка площади нефтяного пятна и толщины нефтяного пятна в виде непрерывной массы нефти производится во время расчета. Образование нефтяного пятна описывается уравнением растекания, включающим основные силы (инерционные, гравитационные, трение и поверхностное натяжение), действующие на нефть, распространяющуюся на поверхности моря. Аналитическое решение для уравнения модели находится для небольшого конечного интервала времени. На основе разработанной модели рассмотрена зависимость характера распространения нефти от источника различной интенсивности.

**Ключевые слова:** Растекание нефти, нефтяное пятно, моделирование эволюции нефтяного пятна, аварийный разлив нефти.

**CALCULATION OF OIL SPREAD ON THE SEA SURFACE FROM A SOURCE  
WITH VARIOUS EFFLUENCE TIME****Valery Yu. Chantsev**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg

**ABSTRACT**

The new approach in calculation of oil spread process from a source, acting during some interval of time at accidental oil spill is offered. The calculation assumes capacity of a source, ensuring spill duration from several hours till 1-2 days. An estimation of the oil slick area and oil slick thickness as continuous oil mass is made during account. The formation of a oil slick is described by the spread equation, including the basic forces (inertia, gravitation, friction and superficial tension), acting to oil extending on the sea surface. The analytical decision for the

equation of model is find for a small final interval of time. On the basis of developed model, the dependence of oil spread character from various intensity of a source is considered.

**Keywords:** Oil spreading, oil slick, modeling of oil slick evolution, emergency oil spill.

### Введение

Анализ большинства данных об аварийных разливах нефти [1] свидетельствует, что в период разлива (от часа до нескольких десятков часов) форма пятна нефти зависит как от термодинамических характеристик морской поверхности и приводного пограничного слоя атмосферы, так и от интенсивности источника загрязнения. В свою очередь, дальнейшая трансформация нефтяного разлива и характер его распространения теснейшим образом связан с формой и площадью пятна, образовавшегося в процессе действия источника нефти.

Основная сложность заключается в выявлении и правильном описании всех сил, действующих на растекающуюся по поверхности моря нефть. Существующие методы расчета растекания нефти, учитывающие известные физические механизмы (например, [2-4]), пока не позволяют рассматривать процесс растекания от непрерывно действующего источника, как процесс взвешенного совместного воздействия вынуждающих сил. Разработанные аналитические и численные модели выделяют условия и продолжительность действия различных механизмов, подразделяя растекание нефти на отдельные этапы.

Настоящая работа посвящена разработке модели, описывающей новый подход, заключающийся в рассмотрении объединенного воздействия основных (выделенных в [5]) сил на процесс растекания нефти от непрерывно действующего источника, а также сравнению результатов численных экспериментов с обобщенными выводами, сделанными в [6]. Все исходные данные позаимствованы из работы [7].

### Описание модели

В работах [6] и [7] процесс растекания нефти от мгновенного источника разделен на три фазы: инерционную, гравитационно-вязкую и фазу поверхностного натяжения. Расчет площади нефтяного пятна производится отдельно для каждой фазы процесса после достижения толщины пленки некоторой критической величины. Растекание нефти от непрерывно действующего источника происходит под взаимным действием основных сил: инерционной, гравитационной, трения и поверхностного натяжения. При этом фазы растекания, определенные в [7], выделяются только условно.

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

$$\rho_0 U_0 \frac{\partial U_0}{\partial n} = \frac{\partial P_0}{\partial n} - \frac{\partial \tau_r}{\partial z} + \frac{\partial f_N}{\partial n}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  ~ плотность нефти;  $U_0$  - скорость растекания нефтяного пятна;  $n$  - нормаль к границе пятна;  $\tau_r$  - касательное напряжение на границе между двумя средами в направлении растекания;  $f_N$  - поверхностное натяжение  $\sigma$ , отнесенное к толщине нефтяной пленки  $h_0$  ( $f_N = \sigma/h_0$ );  $P_0$  - давление столба нефти единичной площади,  $h_0$  - толщина пленки.

Проинтегрировав уравнение (1) по толщине нефтяной пленки с учетом гидростатического описания распределения давления ( $P_0$ ):

$$\frac{dP}{dz} - g(\rho_w - \rho_o) = 0 \Rightarrow \int_{P_o}^0 dP = g(\rho_w - \rho_o) \int_{h_o}^0 dz \Rightarrow P_o = g(\rho_w - \rho_o)h_o$$

и при условии отсутствия влияния ветра ( $\tau_r^0 = 0$ ) и течений ( $\tau_r^{h_o}$  зависит только от скорости растекания нефти  $U_o$  на поверхности неподвижной воды), можно записать.

$$0.5 \frac{\partial U_o^2}{\partial n} = \beta \frac{\partial h_o}{\partial n} - \frac{\tau_r^{h_o}}{\rho_o h_o} + \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial f_N}{\partial n}; \quad \beta = g \frac{(\rho_w - \rho_o)}{\rho_o}, \quad (2)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения;  $\rho_w$  - плотность воды;  $\tau_r^{h_o}$  - касательное напряжение на границе между водой и нефтью в направлении растекания.

Принимая скорость растекания  $U_o$  постоянной на интервале времени  $\Delta t$ , можно проинтегрировать уравнение (2) по величине смещения границы пятна в направлении внешней нормали:

$$U_o^2 = 2\beta h_o - \frac{2\tau_r^{h_o} r}{\rho_o h_o} + \frac{2\sigma}{\rho_o h_o}, \quad (3)$$

где  $r$  - величина смещение границы пятна нефти по нормали  $n$  за интервал времени  $\Delta t$ , на котором  $U_o$  принимается постоянной ( $r = U_o \cdot \Delta t$ ).

Согласно [6], взаимодействие нефтяной пленки с водной поверхностью описывается вязкими силами. Поэтому условие потока импульса между нефтью и поверхностью моря можно выразить через распределение скорости в вязком подслое в воде:

$$\frac{\tau_r^{h_o}}{\rho_w} = \nu_w \frac{\partial V}{\partial z} \approx \nu_w U_o \delta_w^{-1}, \quad (4)$$

где  $\nu_w$  - коэффициент кинематической вязкости воды;  $\delta_w$  - толщина вязкого подслоя в воде.

Для получения однозначного и непрерывного решения уравнения (3) необходимо неизвестную величину толщины нефтяной пленки ( $h_o$ ) выразить через заданные и вычисляемые параметры модели, такие как мощность источника ( $v_o$ ) и скорость растекания ( $U_o$ ). Такое преобразование возможно выполнить расписав закон сохранения массы или объема нефти. Условие сохранения массы при растекании нефти от непрерывно действующего источника выражается через изменение объема вылившейся нефти ( $V_o$ ) за единицу времени:

$$\frac{dV_o}{dt} = h_o \frac{dS_o}{dt} + S_o \frac{dh_o}{dt} = v_o, \quad (5)$$

где  $S_o$  - площадь пятна нефти.

Рассматривая  $S_o$ , как одну из искомым величин и понимая, что  $S_o = V_o/h_o$ , а интенсивность источника  $v_o = dV_o/dt$ , уравнение (5) примет вид:

$$\frac{dS_o}{dt} = \frac{v_o}{h_o} - \frac{V_o}{h_o^2} \frac{dh_o}{dt}, \quad (6)$$

С другой стороны закон сохранения массы для несжимаемой жидкости описывается уравнением неразрывности, что позволяет выразить скорость изменения толщины нефтяной пленки через скорость растекания нефти:

$$\frac{dh_o}{dt} = -h_o \frac{dU_o}{dn}, \quad (7)$$

Выражая увеличение площади пятна нефти через интеграл по контуру пятна от приращения  $r$ , скорость изменения площади пятна можно записать с помощью интеграла по контуру пятна от скорости растекания:

$$\frac{dS_o}{dt} = \oint_L \frac{\partial r}{\partial t} dl = \oint_L U_o dl. \quad (8)$$

Подставляя выражения (7) и (8) в уравнение (6), получаем соотношение, позволяющее связать толщину нефтяной пленки с мощностью источника и скоростью растекания нефти:

$$h_o = \frac{v_o}{U_o L} + \frac{V_o}{rL}, \quad (9)$$

где  $L$  – длина контура пятна нефти.

Тогда уравнение для скорости растекания (3) с учетом условия (4) и полученного соотношения (9) принимает следующий вид:

$$U_o^2 \left( \frac{v_o}{U_o L} + \frac{V_o}{rL} \right) = 2\beta \left( \frac{v_o}{U_o L} + \frac{V_o}{rL} \right)^2 - 2r \frac{\rho_w v_w}{\rho_o \delta_w} U_o + \frac{2\sigma}{\rho_o}, \quad (10)$$

Увеличение площади нефтяного пятна и изменение его формы определяется величиной смещения кромки пятна в направлении внешней нормали ( $r$ ). Скорость растекания нефти ( $U_o$ ) представляет собой изменение положения кромки нефтяного пятна в направлении внешней нормали ( $r$ ) за единицу времени и принимается постоянной на достаточно коротком отрезке времени  $\Delta t$ .

Толщина вязкого подслоя ( $\delta_w$ ) из условия размерности пропорциональна кинематической вязкости ( $\nu_w$ ), величине пробега и обратно пропорциональна скорости потока. Принимая скорость потока постоянной на протяжении пробега, можно сказать, что толщина вязкого подслоя ( $\delta_w$ ) определяется как

$$\delta_w = A \cdot (\nu_w t)^{0.5}$$

где  $A$  – числовой коэффициент.

В работе [8], на основании эмпирических данных этот коэффициент был определен как  $A = 5$ . Рассматривая вязкий подслоя как слой ламинарного движения, коэффициент  $A$  в работе [9] задавался равным 1.72. Предполагая, что скорость растекания нефти не приводит к образованию турбулентного погранслоя в воде, вязкий подслоя можно считать равным по величине ламинарному подслою и принять числовой коэффициент  $A = 1.72$ .

Поверхностное натяжение на границе раздела двух жидких сред направлено по касательной к поверхности раздела и в направлении нормали к боковой границе взаимодействующих жидкостей. Поверхностное натяжение приводит к уменьшению площади поверхности одной из жидкостей в зависимости от соотношения их плотностей. При попадании некоторого объема 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 поверхностного натяжения вода-воздух на границе пятна нефти всегда направлена в сторону внешней нормали к этой границы, а силы поверхностного натяжения вода-нефть и нефть-воздух – в противоположную [10].

$$\sigma = \sigma_{wa} - \sigma_{wo} - \sigma_{ao}.$$

Согласно работе [6] для нефти среднего качества суммарное поверхностное натяжение на боковой границе пятна ( $\sigma$ ) приблизительно равно 0.025 Н/м и направлено по направлению внешней нормали.

### Результаты вычислительных экспериментов

Уравнение расчета скорости растекания нефти  $U_0$  (10) включает в себя геометрические параметры пятна ( $r$ ,  $L$ ), зависящие от скорости  $U_0$ , относится к классу трансцендентных уравнений. В связи с этим оно решалось приближенным методом Ньютона, который обеспечивал быструю сходимость решения к единственному положительному корню уравнения. Для возможного сравнения результатов расчета растекания нефти на поверхности моря с имеющимися экспериментальными исследованиями, задавался источник большой мощности ( $10^4$  т) (по [6] и [7]). В отличие от указанных работ источник задавался не точечным, а имел диаметр 2 м. Это обеспечило задание точных начальных условий итерационного процесса при решении уравнения (10). При больших площадях разлива площадь сечения источника можно считать точечной, что позволяет сравнивать результаты расчета с имеющимися результатами экспериментальных исследований ([6]). Для выявления особенностей растекания нефти от непрерывно действующего источника расчеты проводились при различных расходах источника ( $0.1 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $0.5 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $1 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Использование обобщенного уравнения (10) для расчета растекания нефти на поверхности моря в отличие от схемы, предложенной в [7] позволяет вычислять площадь и толщину нефтяного пятна в неоднородных условиях окружающей среды и выявлять критерии перехода от одной фазы растекания к другой [6]. Такой подход позволяет более точно оценить роль основных механизмов, влияющих на скорость и направление растекания нефти.

Вычисление растекания нефти от мгновенного источника мощностью  $10^4$  т с использованием уравнения (10) демонстрирует достаточно надежный метод определения скорости растекания и изменения площади нефтяного пятна во времени. Сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными возможно при анализе увеличения безразмерной площади разлива нефти в безразмерном времени. Согласно экспериментальным [7] и теоретическим [6] исследованиям изменение радиуса нефтяного пятна в инерционной фазе пропорционально  $t^{1/2}$ , в гравитационно-вязкой фазе  $\sim t^{1/4}$  и в фазе поверхностного натяжения  $\sim t^{3/4}$ . Рассматривая безразмерные соотношения изменения площади пятна можно сказать, что в инерционной фазе отношение логарифмов площади и времени растекания ( $\lg S_0 / \lg t_0$ ) должно быть пропорционально 1, в гравитационно-вязкой  $\lg S_0 / \lg t_0 \sim 1/2$  и в фазе поверхностного натяжения  $\lg S_0 / \lg t_0 \sim 3/2$ .

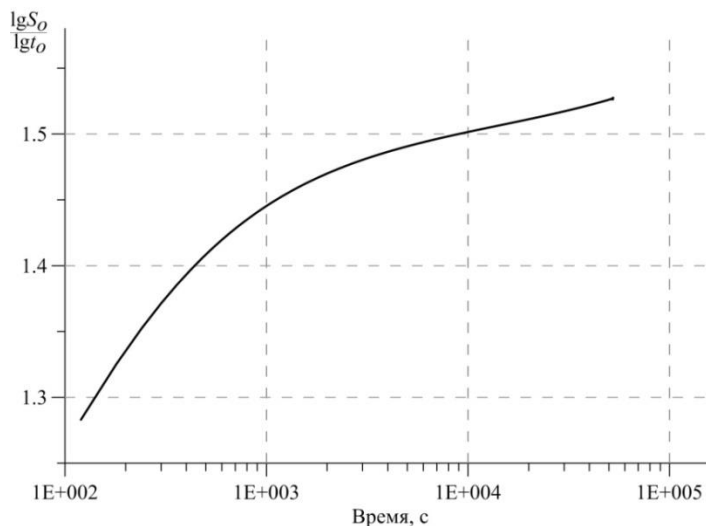
Несмотря на то, что все основные силы имеют разный масштаб воздействия на растекание в зависимости от толщины нефтяной пленки, они действуют непрерывно с самого начала растекания. Причем, роль каждой из сил на разных этапах растекания зависит от интенсивности действующего источника. Исходя из этого, можно предположить, что при практических расчетах более целесообразно использовать уравнение (10), что влечет за собой некоторые изменения в представлении о временной структуре процесса растекания нефти.

Если считать, что процесс растекания завершается тогда, когда скорость испарения с поверхности нефтяного пятна равна скорости молекулярной диффузии внутри пленки [6], масштаб площади разлива ( $S_*$ ) можно выразить через максимально возможную площадь, которая определяется количеством разлившейся нефти и ее свойствами:

$$S_* = \left( \frac{\sigma^2 V_0^6}{\rho_0^2 \nu_w \nu_0^3} \right)^{1/8} \quad (11)$$

Тогда характерный масштаб времени, с учетом действующих сил может быть получен из уравнения (10). Исходя из этого, можно рассчитать отношение десятичных логарифмов безразмерных площади пятна и времени растекания, которое будет характеризовать временную структуру растекания.

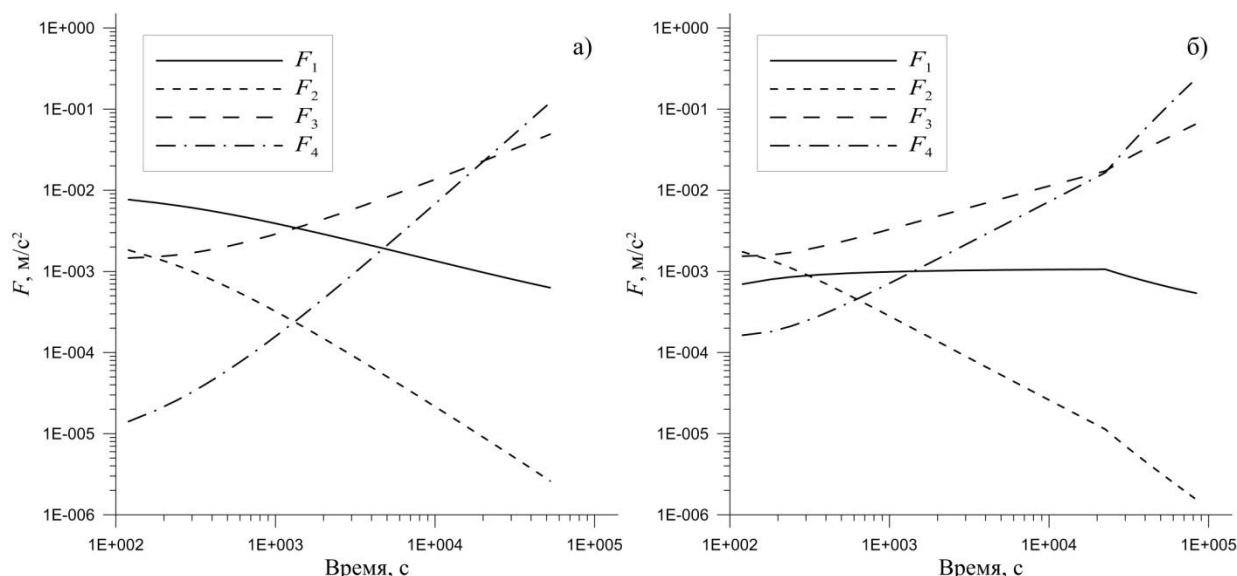
Из рисунка 1 видно, что в начальной стадии растекания нефти от мгновенно действующего источника отношение  $\lg S_0 / \lg t_0$  чуть больше 1. Это незначительное завышение в фазе максимального влияния инерционных сил свидетельствует лишь о существовании дополнительной силы, которая увеличивает скорость растекания. При этом на завершающей стадии растекания мы видим, что площадь нефтяного разлива пропорциональна  $\sim t^{1.5}$ . Эта величина соответствует действию силы поверхностного натяжения.



*Рисунок 1. Изменение во времени отношения десятичных логарифмов от безразмерных значений площади нефтяного пятна и времени*

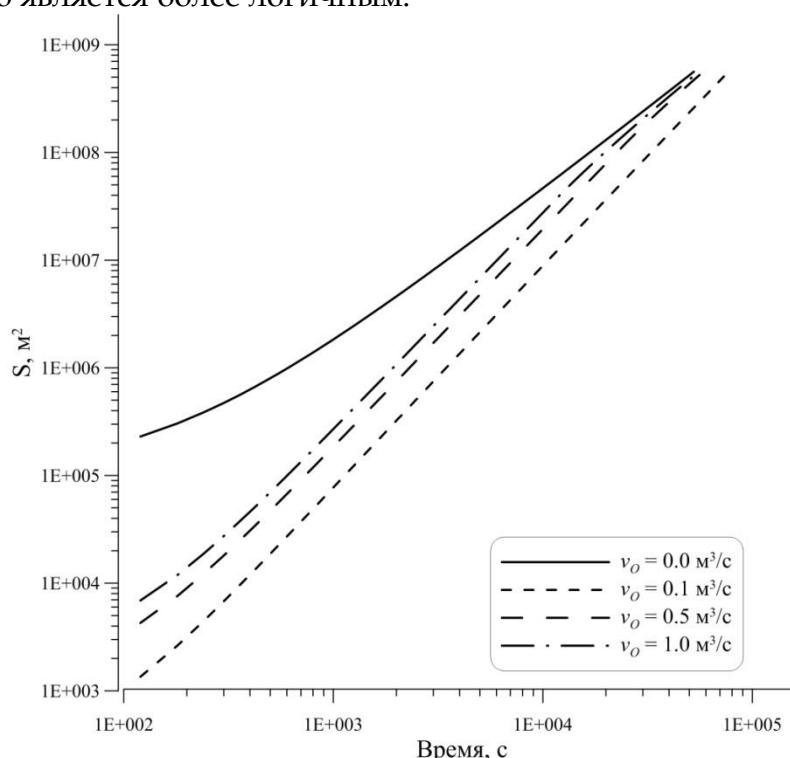
Гравитационно-вязкая фаза в данной постановке не может быть выделена в чистом виде, т.к. гравитационные силы становятся меньше сил поверхностного натяжения. Силы вязкости при мгновенном разливе нефти действуют на протяжении всего периода растекания (рис. 2а) и с ростом сил поверхностного натяжения увеличивают свою величину примерно на порядок. Период гравитационно-вязкой фазы можно принять за переходный период от гравитационно-инерционного растекания к растеканию под действием сил поверхностного натяжения. Начальному моменту этого периода соответствует равенство гравитационных сил силам поверхностного натяжения ( $t \sim 2 \times 10^3$  с), что совпадает с концом инерционной фазы в [6], а завершающему моменту соответствует равенство сил поверхностного натяжения силам вязкости при  $t \sim 3 \times 10^4$  с (рис. 2а).

Мощных мгновенно действующих источников аварийного 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. Так при  $v_0 = 1.0$  м<sup>3</sup>/с сила инерции на порядок меньше, чем при мгновенно действующем источнике (рис. 2б). В то же время наблюдается увеличение силы поверхностного натяжения на начальной стадии растекания. При  $v_0 = 1.0$  м<sup>3</sup>/с мы видим, что  $F_4 = 2 \times 10^{-3}$  м/с<sup>2</sup> (рис. 2б), а при мгновенно действующем источнике  $F_4 = 1.5 \times 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup> (рис. 2а). Также при снижении интенсивности источника до 0.1 м<sup>3</sup>/с происходит сокращение начальной стадии растекания и смещение переходного периода на момент времени  $t \sim 3 \times 10^2$  с.



**Рисунок 2.** Изменение во времени основных сил, влияющих на растекание нефти и отнесенных к единичной массе: а) при мгновенно действующем источнике, б) при  $v_0 = 1.0 \text{ м}^3/\text{с}$ , где  $F_1$  – инерционная сила,  $F_2$  – гравитационная сила,  $F_3$  – абсолютная величина вязкой силы,  $F_4$  – сила поверхностного натяжения

Различная интенсивность вытекания нефти влияет и на изменение скорости растекания. При  $v_0 = 0.1 \text{ м}^3/\text{с}$  наблюдается линейный характер зависимости изменения площади нефтяного пятна (рис. 3) от времени. Причем продолжительность растекания, в зависимости от величины расхода и продолжительности действия источника меняется от  $4 \times 10^4 \text{ с}$  до  $1 \times 10^5 \text{ с}$ . Небольшое сокращение общей продолжительности растекания по сравнению с [6] связано с одновременным, а не последовательным действием основных вынуждающих сил, что является более логичным.



**Рисунок 3.** Изменение во времени площади нефтяного пятна при различных интенсивностях источника

### Заключение

Численные эксперименты с разработанной моделью показывают, что данный подход, по сравнению с используемыми сегодня, пока можно считать уникальным и более универсальным. Он позволяет точно описывать положение границ и скорость нефтяного разлива в результате его распространения как в открытом море, так и в прибрежных зонах, оценивая время достижения пятном того или иного района, и более точную оценку площадей загрязнения.

Таким образом, можно заключить, что развитие данного способа расчета растекания нефтяного пятна на более общие ситуации аварийных разливов позволит более широко использовать этот метод на практике.

### Список литературы

1. Oil Spill 1967-1991. Case histories. Summaries of significant U.S. and international spills // HMRAD Report. No. 92-11. NOAA HMRAD. 1992. 224 pp.
2. 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.
3. HAZMAT modeling products for spill response and planning. NOAA Ocean Service OR&R. 2002. 43 pp.
4. 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 pp.
5. 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.
6. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
7. Журбас В.М. Основные механизмы распространения нефти в море // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. 1978. Т. 12, С. 144-159.
8. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Теория турбулентности. Т. 1. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 696 с.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. Т. 6. – М.: Наука, 1988. 736 с.
10. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1963. 500 с.

### References

1. Oil Spill 1967-1991. Case histories. Summaries of significant U.S. and international spills // HMRAD Report. No. 92-11. NOAA HMRAD. 1992. 224 pp.
2. 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.
3. HAZMAT modeling products for spill response and planning. NOAA Ocean Service OR&R. 2002. 43 pp.
4. 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 pp.
5. 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.
6. Ozmidov R.V. Diffusion of contaminations in the ocean. – L.: Hydrometeoizdat, 1986. 280 pp. [in Russian].
7. Zhurbas V.M. The basic mechanisms of the spread of oil in the sea. // Results of science and technology. Mechanics of fluid and gas. 1978. Vol. 12, P. 144-159. [in Russian]
8. Monin A.S., Yaglom A.M. Statistical hydromechanics. Theory of turbulence. Vol. 1. – St.Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992. 696 pp. [in Russian].



9. Landau L.D., Lifshits E.M. Theoretical physics. Hydrodynamics. Vol. 6. – Moscow: Science, 1988. 736 pp. [in Russian].
10. Kikoin I.K., Kikoin A.K. Molecular physics. – Moscow: Science, 1963. 500 pp. [in Russian].