

С.П.Любарцева, Ю.Н.Рябцев

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА
НЕФТЯНЫМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ**

Для условий Керченского пролива разработана адаптированная модель переноса и трансформации нефти. Учитываются транспорт мономолекулярной пленки под воздействием течений, ветра и турбулентной диффузии, а также сток массы нефти в ходе испарения и адгезии на береговой черте. Поле течений рассчитывается в рамках трехмерной баротропной модели. Предложена специальная процедура для корректного описания фронта разрыва поля концентрации. Проведенные численные эксперименты для ветров южных румбов дают реалистичные траекторию пятна и компоненты баланса массы. Модель может использоваться для планирования неотложных мер с целью минимизации последствий аварийных разливов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *модель переноса и трансформации нефтепродуктов, течение, ветер, турбулентная диффузия, Керченский пролив.*

Угрожающий рост частоты и объемов аварийных выбросов нефти в море стимулирует разработку превентивных мер по минимизации их пагубного воздействия на окружающую среду. В частности, для обеспечения быстрого принятия решений с целью уменьшения экологического риска широко применяется математическое моделирование переноса и трансформации нефтепродуктов.

Чрезвычайная сложность объекта исследования и среды, в которой он распространяется, породила целый класс нетривиальных моделей, например [1, 2], которые, несмотря на всю полноту охвата физических, химических и биологических механизмов эволюции и транспорта нефти, дают порой далекие от действительности результаты. В стремлении к универсальности модели продолжают наращиваться как за счет добавления новых процессов, так и за счет пополнения базы данных нефтепродуктов. Наиболее развитые версии моделей включают в себя растекание нефтяного пятна в движущейся жидкости, перенос под действием ветра, течений, турбулентности, приливов, волн. Учитывается трансформация нефти за счет испарения [3 – 5], эмульгирования, диспергирования, коалесценции, флокуляции, седиментации, растворения, а также, окисления – химического фото- и микробиологического. База данных таких моделей насчитывает несколько сот различных типов нефтяных углеводородов. Подобно моделям морских экосистем, нефтяные транспортные модели оказываются перегруженными большим числом полуэмпирических параметров, что порождает высокую степень неопределенности получаемых решений, ровно как известные трудности при анализе и интерпретации результатов.

Исключительно сложной представляется также верификация моделей, которая по существу сводится к сравнению расчетной и получаемой со спутников формы и траектории пятна. Во-первых, из-за того, что отслеживание нефтяного загрязнения из космоса не является окончательно решенной зада-

© С.П.Любарцева, Ю.Н.Рябцев, 2010

чей. Во-вторых, по причине недостатка реальных данных о степени загрязнения водной толщи и донных осадков, вызываемых аварийным разливом.

На основе изучения предыдущего опыта расчетов в рамках универсальных моделей, в данной статье предлагается альтернативный подход, базирующийся на разработке упрощенной региональной модели переноса и трансформации нефти в Керченском проливе. В модели описывается перенос нефти течениями и турбулентностью с учетом испарения и адгезии на береговой черте. В нашем случае основной задачей моделирования является ответ на вопрос, куда и как быстро будет двигаться нефтяное пятно, а также, сколько нефти может выпасть на подверженный риску участок побережья. Стадия растекания нефтяного пятна не рассматривается. Объем выброса пересчитывается в концентрацию с помощью классических формул [6], описывающих растекание нефтяных углеводородов в неподвижной жидкости. Полагается, что на синоптических масштабах перенос мономолекулярной пленки нефти осуществляется адвекцией и турбулентной диффузией, в то время, как доминирующими механизмами стока нефтяных углеводородов являются испарение и адгезия на береговой черте. Считается также, что на интересующих нас масштабах можно пренебречь изменчивостью физико-химических свойств самой нефти. Для решения этой задачи уравнение, описывающее изменение во времени концентрации нефти $C(x, y, z, t)$ в виде

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{V}(Cu_{dr}) + w \frac{\partial C}{\partial z} - \bar{\nabla}(\bar{D}\bar{\nabla}C) = -R_{ev}, \quad (1)$$

где $u_{dr} = (u + kU_w, v + kV_w)$ описывает горизонтальный дрейф нефти под воздействием течения с горизонтальной скоростью (u, v) и ветра со скоростью (U_w, V_w) , k – показатель парусности, w – вертикальная компонента скорости течения, $\bar{D} = (D_x, D_y, D_z)$ – коэффициент турбулентной диффузии нефти, $\bar{\nabla} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, $\bar{\nabla} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$. R_{ev} описывает потерю нефти в процессе испарения, интегрируется в поверхностном слое при условии отсутствия потоков вещества на верхней и нижней его границах:

$$wC = D_z \frac{\partial C}{\partial z} \text{ при } z = 0, h. \quad (2)$$

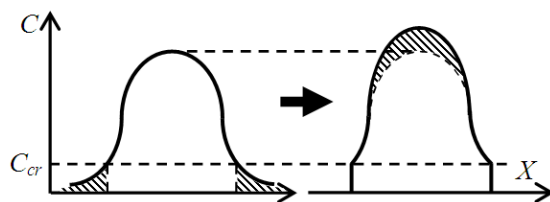
Здесь h – толщина поверхностного слоя.

На твердой границе расчетной области Γ ставится условие адгезии с соответствующим коэффициентом q

$$\left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_{\Gamma} = qC, \quad (3)$$

где $\vec{n}$ – внешняя нормаль к Γ . На жидкой границе принимается условие излучения.

Строго говоря [7], применение линейного параболического уравнения (1) для описания переноса нефтяного пятна не является корректным. С одной стороны закон Фика как элемент классической теории переноса вещества является выражением линейного закона неравновесной термодинамики о пропорциональности термодинамических сил термодинамическим потокам. С другой стороны, он содержит в себе парадокс бесконечной скорости



Р и с . 1 . Схема, поясняющая процедуру трансформации распределения, C_{cr} – наперед заданная критическая концентрация.

распространения вещества при диффузии. В некоторых случаях использование линейного параболического уравнения является оправданным для практических целей. Однако во множестве других оказывается необходимым учет волновой природы диффузионного процесса. Это касается задачи

о переносе нефтяного загрязнения, в которой необходимо получить описание фронта разрыва концентрации. Задача сводится либо к гиперболическому уравнению [8], либо к нелинейному параболическому уравнению. В рамках последнего подхода на определенном временном шаге используется процедура отсекания «хвоста» пространственного распределения концентрации в пятне с последующим добавлением отсеченной массы в центр пятна (рис.1). Полученное таким образом решение оказывается свободным от парадокса бесконечной скорости, при этом гарантируется выполнение закона сохранения вещества.

Существует, по крайней мере, три подхода к параметризации испарения в моделях трансформации нефти. Первый основан на методе псевдокомпонент [3]. Нефтепродукты условно подразделяются на фракции или псевдокомпоненты в соответствии с температурой кипения. На базе полуэмпирических уравнений рассчитывается давление пара для каждой компоненты. При условии малости парциального давления в окружающем воздухе, считается, что скорость испарения псевдокомпоненты пропорциональна парциальному давлению пара. При этом коэффициент массопереноса считается зависимым от скорости ветра, температуры и площади нефтяного пятна. Альтернативный, так называемый, аналитический метод [4] предполагает линейную зависимость количества испарившейся нефти от эффективной температуры кипения жидкой фазы. Оба метода предполагают, что испарение нефти подчиняется закону, который описывает испарение воды, т. е. скорость испарения нефти регулируется состоянием пограничного слоя. Проведенные в [5] экспериментальные исследования показывают, что это не так. Было установлено, что скорость испарения не зависит от скорости ветра в широком диапазоне изменчивости последней. Рост площади разлива не влияет существенно на скорость испарения. Уменьшение толщины пленки не увеличивает скорость испарения. Это позволило вывести упрощенные формулы для испарения нефти, критическими параметрами которых являются сорт нефти и температура. А именно, процент испарившейся нефти $\%Ev = (a + bT)\ln t$ либо $\%Ev = (c + dT)\sqrt{t}$, T – температура нефти, t – время, a, b, c, d – зависящие от сорта нефти константы.

Бездивергентное поле скоростей рассчитывается в рамках трехмерной линейной баротропной модели [9]. В силу сравнительной мелководности Керченского пролива течения здесь в основном определяются ветром. Рассматриваются синоптические ситуации, когда течения можно считать установившимися, например, ветер не меняется в течение суток.

Уравнения модели имеют вид

$$\begin{aligned} -fv &= g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - ru, & fu &= g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - rv, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где f – параметр Кориолиса; g – ускорение силы тяжести; A – коэффициент вертикальной вязкости, r – коэффициент рэлеевского трения, ζ – уровень.

На поверхности моря, представляющей собой поверхность тока, касательное напряжение ветра уравнивается турбулентным трением в морской воде, так что

$$A \frac{\partial u}{\partial z} = -\tau^x, \quad A \frac{\partial v}{\partial z} = -\tau^y, \quad w = 0 \quad \text{при } z = 0, \quad (5)$$

где τ^x , τ^y – составляющие касательного напряжения ветра, отнесенные к плотности морской воды.

На дне принимается условие прилипания

$$u = v = w = 0 \quad \text{при } z = H. \quad (6)$$

Интегрирование уравнения неразрывности по вертикали от поверхности моря до дна с учетом граничных условий (5), (6) приводит к интегральному уравнению неразрывности

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

что позволяет ввести интегральную функцию тока ψ . Составляющие полного потока U , V и функция тока ψ определяются формулами

$$U = \int_0^H u dz = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad V = \int_0^H v dz = \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (8)$$

На твердых боковых границах бассейна ставится условие непротекания, т.е. равенство нулю нормальной к границе компоненты полного потока. На открытых границах ставится условие свободного протекания, а именно, равенство нулю касательной к границе компоненты полного потока (полный поток направлен по нормали к границе).

Решение трехмерной задачи сводится к решению двумерного эллиптического уравнения для интегральной функции тока ψ и к последующему вычислению всех трех компонент скорости течения и градиента уровня по аналитическим формулам.

Для более точного описания структуры течений вблизи берега косвенно учитывается прибрежный пограничный слой. Для этого на расстоянии шага сетки от твердой границы, дополнительно вводится граница, на которой предполагается равенство нулю компонент горизонтальной скорости течения. Это позволяет учесть особенности вертикальных движений и получить более точное распределение концентрации нефти непосредственно у берега.

Задача переноса загрязнения решается численно с помощью конечно-разностной схемы [10], обладающей свойством транспортности. Интег-

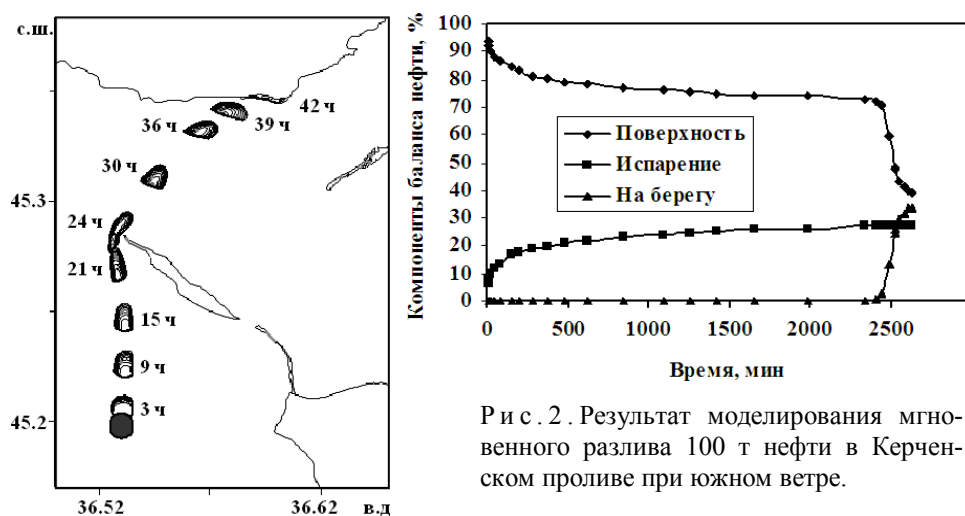
рирование по времени осуществляется с помощью двухслойной полунявной схемы первого порядка точности с неявной аппроксимацией вертикального обмена. При интегрировании по пространству используется консервативная схема, обеспечивающая положительную определенность решения, т.е. получение неотрицательных значений концентрации нефти, причем во всей рассматриваемой области и в течение всего времени расчета. Это достигается аппроксимацией адвективных членов уравнения переноса примеси с дозированной схемной диффузией.

По горизонтали дискретизация производится на равномерной сетке В (по терминологии Аракавы) с шагом Δx и Δy , по вертикали – на неравномерной сетке с шагом Δz_k . В узлах боксов рассчитываются горизонтальные компоненты скорости течения, в центрах боксов концентрация примеси и вертикальная компонента скорости течения. При расчете концентрации нефти, согласно численной схеме, в качестве скоростей течений на горизонтах z_k используются средние в слоях горизонтальные течения.

Для расчетов использовалась 4-уровневая численная модель с горизонтами $z_k = 0; 0,01; 0,5; 2$ м, шагом по горизонтали $\Delta x = 39,5$ м, $\Delta y = 55,5$ м. Шаг по времени составлял $\Delta t = 2$ мин. Коэффициенты вертикальной вязкости и рэлеевского трения полагались постоянными $A = 20$ см²/с, $r = 10^{-4}$ с⁻¹. Коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии нефти принимались также постоянными $D_x = D_y = 10^2$ см²/с, $D_z = 0,1$ см²/с. Параметр Кориолиса $f = 10^{-4}$ с⁻¹.

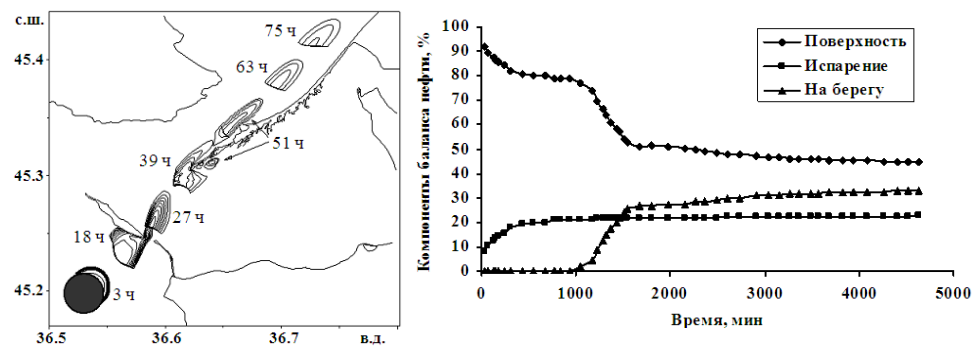
Поскольку ставится задача исследования возможного загрязнения Керченского пролива, изучается случай ветров южного сектора с источником в районе рейдовой перевалки грузов. Имеет место генеральный перенос вод из Черного моря в Азовское – черноморский тип течений. Напряжение ветра считается горизонтально однородным, так как характерный масштаб изменения ветра значительно больше масштаба расчетной области. Амплитуда напряжения ветра полагается равной 1 см²/с², что соответствует скорости ветра 8 м/с. Толщина поверхностного слоя считается равной $h = 0,01$ м, значение коэффициента адгезии принимается равным $q = 1$, что символизирует полное прилипание нефти к берегу, $k = 0,013$ [11]. Рассматривался случай разлива сырой нефти, испарение которой описывается уравнением [6] $\%Ev = (2,21 + 0,045T) \ln t$, T – температура в °С, t – время в минутах. Полагалось, что $T = 15^\circ\text{C}$.

На рис.2 приводится расчет мгновенного разлива 100 т нефти, который происходит при южном ветре со скоростью 8 м/с. Траектория пятна прослеживается в течение 1 сут 20 ч. Видно, что примерно за сутки пятно достигает северной оконечности о. Коса Тузла. Направление движения нефтяной пленки практически совпадает на этом участке с направлением ветра. Затем нефть попадает в область интенсивных струйных течений (со скоростями, достигающими 60 см/с) в Павловской узкости. Здесь за счет увеличения составляющей, связанной со скоростью течения, направление дрейфа изменяется. Загрязнение достигает побережья между мысом Змеиным и Еникале, где происходит мощное выпадение нефти на берег. Временной ход составляющих баланса нефти показывает, что за первые 10 часов после разлива испаряется около 25% разлитой нефти, через 40 часов начинает функ-



ционировать второй сток – адгезия на береговой черте, который очень быстро (в течение 4 ч) освобождает акваторию от более чем 30 % загрязнения. Оставшаяся нефть (около 40 %) в небольшой концентрации продолжает диффундировать и разноситься течениями по всему Керченскому проливу.

На рис.3 приводится результат моделирования последствий мгновенного разлива нефти массой 1000 т в условиях ветра с направлением 240° и скоростью 8 м/с. Отрисовка изолиний начинается от внешнего контура, где концентрация составляет 10 % от максимальной с шагом 10 %. Максимальная концентрация равна $12,75 \text{ кг/см}^3$. Двигаясь в северо-восточном направлении, пятно достигает юго-восточного берега о.Коса Тузла через 18 ч после аварии. Береговая черта, выступающая в роли своеобразного фильтра по отношению к водной среде, задерживает около 30 % от разлитой массы нефти. Оставшаяся часть просачивается через промоину, значительно ускоряясь благодаря возрастанию скорости течения в промоине до 60 см/с. Через 35 ч после разлива загрязнение достигает южной оконечности косы Чушка. Здесь пятно рассекается на две части, более мощная устремляется в северную узкость, где скорость течения достигает 80 см/с. После северной узкости течение замедляется и около 45 % начальной массы нефти через



немного более трех суток после разлива попадает в Азовское море. Оторвавшаяся на южной оконечности косы Чушка малая часть пятна оседает на изрезанном мелкими заливами восточном побережье косы. Видно, как со временем уменьшается в линейных размерах и деформируется ядро пятна. Значительный вклад (20 %) в ослабление загрязнения вносит на рассматриваемых временных масштабах испарение.

Разработанная модель может быть использована для расчета загрязнения не только от мгновенного источника, но и от источника конечной длительности. Это иллюстрирует рис.4, на котором показан результат действия стационарного источника загрязнения мощностью 50 кг/мин. Источник функционирует на протяжении 18 ч. Дрейфовый режим определяется ветром с направлением 240° и скоростью 8 м/с.

В заключение отметим, что, хотя проблема валидации разработанной нами модели остается нерешенной, в целом расчеты дают правдоподобные результаты. На основании полученных в рамках модели оценок, можно планировать оперативные меры по минимизации ущерба – размещение на акватории нефтеулавливающих буев, применение искусственных сорбентов, сбор смеси нефти с грунтом на берегу. Модель помогает оценить не только пространственно-временные рамки превентивных мероприятий, но и объем работ по очистке берега. При использовании модели необходимо представлять границы ее применимости, что связано с пониманием основных источников ошибок. Известно, что самые существенные ошибки в разработках подобного рода вызваны неточностью в задании внешних полей – ветра и мощности источника. В рамках нашего подхода следующими по уровню ошибки неучтенными процессами являются флокуляция и седиментация. На синоптических масштабах их вклад в баланс сравним с вкладом испарения, а для тяжелых углеводородов, вероятно, его превосходит. Чтобы учесть эти процессы, необходимо объединить предложенную модель с моделью переноса взвешенных наносов. Кроме того, с целью более корректного описания адгезии с помощью натурных данных можно ранжировать побережье пролива по значению q . Известно, что этот коэффициент зависит от уклона берега и типа грунта.

Выводы.

Предложена упрощенная модель переноса и трансформации нефтяных углеводородов в Керченском проливе, которая дает разумные оценки траектории и компонент баланса массы.

Развитие модели видится в более корректном учете адгезии на береговой черте.

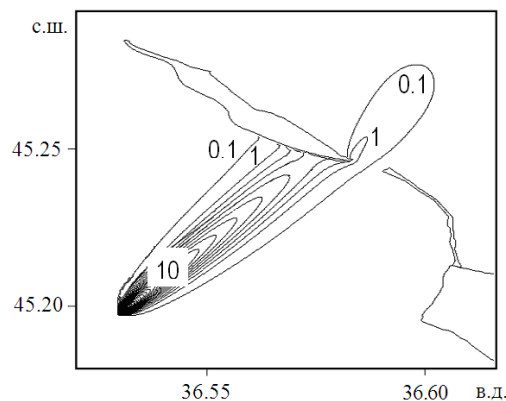


Рис. 4. Моделирование переноса нефти от источника конечной длительности.

Следующим шагом для усовершенствования предложенной модели может стать ее объединение с моделью транспорта донных наносов. Это позволит оценить массу оседающей на дно нефти, что существенно для Керченского пролива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tkalich P., Kamrul H., Karinayew H.* A multiphase oil spill model // J. Hydraulic Res.– 2003.– 41, № 2.– P.115-125.
2. *Azevedo A., Oliveira A., Fortunato A., Bertin X.* Application of the Eulerian-Lagrangian oil spill modeling system to the Prestige accident: trajectory analysis // J. Coastal Res.– 2009.– SI56.– P.777-781.
3. *Jones R.* A simplified pseudo-component oil evaporation model // Proc. of the 2 AMOP Tech. Sem.– 1997.– P.43.
4. *Mackay D., Matsugu R.S.* Evaporation rate of hydrocarbon spills on water and land // Can. J. Chem. Eng.– 1973.– 51.– P.434-439.
5. *Fingas M.* The evaporation of oil spills: Prediction of equations using distillation data // *Spill Sci. & Tech. Bull.*– 1996.– 3(4).– P.191-192.
6. *Fay J.A.* The spread of oil slicks on a calm sea.– N-Y.: Plenum Press, 1969.– 220 p.
7. *Монин А.М., Яглом А.С.* Статистическая гидромеханика. Часть I.– М.: Наука, 1965.– 640 с.
8. *Gomez H., Colominas I., Navarrina F., Casteleiro M.* A hyperbolic model for convection-diffusion transport problems in CFD: Numerical analysis and applications // Appl. Math.– 2008.– 102(2).– P.319-334.
9. *Иванов В.А., Шапиро Н.Б.* Моделирование течений в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– вып.10.– С.207-232.
10. *Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б., Ющенко С.А.* Моделирование распространения пассивной примеси в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал.– 1999.– № 3.– С.29-42.
11. *Малиновский В.В., Дулов В.А., Кориненко А.Е., Большаков А.Н., Смолов В.Е.* Натурные исследования дрейфа искусственных тонких пленок на морской поверхности // Изв. РАН. ФАО.– 2007.– 43, № 1.– С.117-127.

Материал поступил в редакцию 23.09.2010 г.