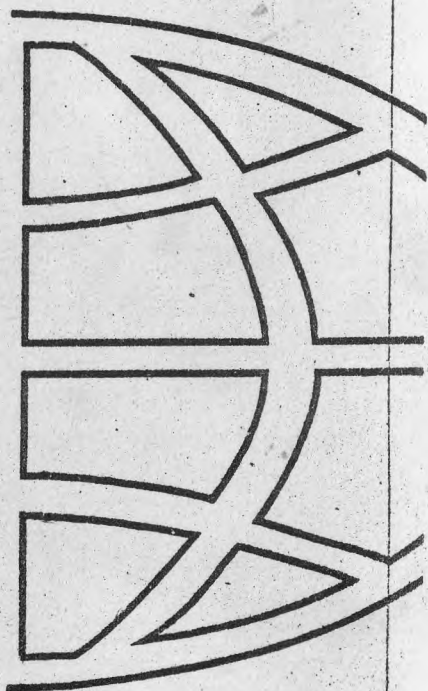


32

МЕТЕОРОЛОГИЯ,
КЛИМАТОЛОГИЯ
И ГИДРОЛОГИЯ



ОДЕССА-95

СОДЕРЖАНИЕ

Степаненко С.Н., Школьный Е.П. Стан і перспективи розвитку метеорологічних наук в Україні.....	3
--	---

ЦИРКУЛЯЦИЯ АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТ

Школьный Е.П., Гончарова Л.Д. Сжатие информации о статистической структуре составляющих скорости ветра над Северной Америкой.....	14
---	----

Гончарова Л.Д., Вертикальная статистическая структура скорости ветра в тропо-стратосфере Североамериканского континента.....	17
--	----

Гончарова Л.Д. Квазидвухлетние колебания составляющих скорости ветра в тропо-стратосфере над Северной Америкой	29
--	----

Макаринский О.Н. К вопросу о статистическом моделировании ветровых ситуаций.....	37
--	----

Дао Нгок Хунг. Прикладные задачи модели атмосферного пограничного слоя для обслуживания метеорологической информацией гражданской авиации.....	50
--	----

Чан Нгок Кыонг. Пространственные распределения вертикальных движений над юго-западной частью Тихого океана.....	54
---	----

Абдул Ахмад. Синоптические условия формирования осадков на территории Афганистана.....	58
--	----

Абдул Ахмад. Климатология осадков Афганистана.....	67
--	----

Маринин И.Л. Численное моделирование трехмерной структуры атмосферного пограничного слоя над северным Причерноморьем.....	71
---	----

паводочного стока в районах с высоким уровнем залегания грунтовых вод (на примере рек Полесья)..... 179

Иваненко А.Г., Цыганий О.В. Моделирование полей дождевых осадков для водосборов юго-западного Причерноморья... 183

Макаринский О.Н., Кисиль С.В. К вопросу исследования динамики вод на мелководных акваториях..... 194

✓ Лонин С.А., Тучковенко Ю.С. К вопросу о разработке трехмерной модели эволюции нефтяного пятна в морской среде..... 207

✓ Макаринский О.Н., Тучковенко Ю.С. К вопросу об использовании вероятностно-статистического метода изменчивости ветровых условий в задачах прикладной экологии..... 215

, N 3, с.414-419. 5. Егоренко Н.Н. Типовые барические поля над бассейном Черного моря // Тр. ин-та океанологии АН СССР, 1962, Т. LVII. с.81-92. 6. Изменчивость геофизических полей Черного моря / Под ред. В.А. Нелепо, Л. : Гидрометеиздат, 1984, 240 с. 7. Макаринский О.Н., Кисиль С.В. Комплексный подход к исследованию динамики вод в районе Одесского залива - Деп. в ГНТБ Украины 21.06.94, N1217-УК94. 1994. 19с. 8. Михайловский Г.Е., Семенов Е.В., Сеничкина Л.Г. и др. Факторы, определяющие экологическую структуру пелагиали океана и возможные подходы к ее выявлению // Океанология. 1993. Т.33. N1. с.91-96. 9. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч.1. М.: Наука, 1965. 639 с. 10. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. Л. : Гидрометеиздат, 1986. 279 с. 11. Опыт теоретического и экспериментального исследования проблемы глубоководного сброса сточных вод на примере района Ялты. Киев : Наукова думка, 1973. 274 с. 12. Okubo A. The effect of shear in an oscillatory current on horizontal diffusion from an instantaneous source // Int.J. Oceanol. Limpol. 1967, 1. p.194-205.

УДК 551.577.2

Лонин С.А.,

Тучковенко Ю.С.,

Одесский гидрометеорологический институт

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭВОЛЮЦИИ НЕФТЯНОГО ПЯТНА В МОРСКОЙ СРЕДЕ

В результате кризиса, охватившего в последние годы нефтедобывающую промышленность России, перед Украиной встала задача поиска нетрадиционных (альтернативных) поставщиков нефти и путей ее доставки. Наиболее реальной представляется транспортировка ближневосточной нефти морским путем в один из портов северо-западной части Черного моря (СЗЧМ). Наиболее подходящим для

реализации этой цели является Одесский регион, инфраструктура промышленности и транспортных коммуникаций которого позволяет принимать и перерабатывать большие объемы нефти, поступающей с моря.

Функционирование морского нефтеперегрузочного комплекса (НПК) неизбежно будет связано с технологическими потерями и возможными аварийными разливами нефти и нефтепродуктов. В связи с этим возникла необходимость в разработке комплексной математической модели динамики нефтяного загрязнения в морской среде с учетом трансформации нефти. В настоящее время достаточно полно решена задача математического описания распространения и трансформации нефтяного slicka на поверхности моря (двумерная пространственная задача) /4/, /8/, однако авторам не известны математические модели, в которых бы учитывался процесс перехода нефти из поверхностного slicka в эмульсию типа "нефть в воде". Между тем, по свидетельству /2/, через десять суток после аварии в эмульгированное состояние переходит до 45 % пролитой на поверхность моря нефти. Заметим, что наличие нефти в морской воде в виде эмульсии представляет очень серьезную опасность для жизнедеятельности гидробионтов и функционирования морской экосистемы в целом. В виду вышесказанного, не вызывает сомнения актуальность разработки трехмерной модели распространения и трансформации нефти в море, в которой были бы учтены все значимые физические и химико-биологические процессы. В данной работе авторами сделан первый шаг на пути решения этой проблемы.

Нефть представляет собой сложную смесь химических веществ, сильно различающихся по своим физико-химическим свойствам. Кроме того, в зависимости от происхождения, нефти могут значительно отличаться по своему составу /7/. Эти обстоятельства затрудняют единое математическое описание динамики нефти в море и вынуждают к принятию ряда допущений, в зависимости от масштабов и условий сброса, целей решаемых задач.

При попадании значительного количества нефти в морскую среду сначала обычно образуется slick (поверхностная пленка). Затем происходит распространение slicka, т.е. увеличение его размеров за счет растекания, и перенос пятна нефти как целого образования. В целом судьба нефтяного slicka в море определяется общей цепью следующих процессов: испарение, эмульгирование, растворение, фотолиз, биodeградация, образование агрегатов и седиментация.

В предлагаемой постановке полагается, что:

- аварийный выброс нефти на поверхность моря происходит мгновенно;
- в первые часы после сброса slick не подвергается действию волн, ветра и течений; основную роль в формировании области нефтяного загрязнения в этот

период играет соотношение сил тяжести, поверхностного натяжения, вязкости и инерции;

- в последующие моменты времени доминирующую роль в трансформации slicka начинают играть процессы испарения, эмульгирования, фото- и биохимического разложения нефти, адвективного и диффузионного переноса пятна, включая его взаимодействие с берегом.

При отсутствии турбулентного обмена, в зависимости от соотношения сил, играющих главную роль в распространении нефти по поверхности моря, выделяют три стадии в процессе формирования области нефтяного загрязнения /3/: инерционная, гравитационно-вязкая и фаза поверхностного натяжения.

На первой стадии, с характерным временем $0 \leq t \leq T_1$, определяющую роль играют силы тяжести и инерции. Продолжается она до тех пор, пока толщина пленки η радиуса $R = K_m (\Delta\rho \rho_w^{-1} g V)^{1/4} t^{1/2}$ не достигнет толщины $\delta = (v t)^{1/2}$ вязкого подслоя. Здесь $K_m = 1.14$; v - молекулярная вязкость воды; g - ускорение свободного падения; $\Delta\rho = \rho_w - \rho_0$; ρ_w , ρ_0 - средняя плотность воды и нефти, соответственно; V - объем вылитой нефти.

Затем, при $T_1 \leq t \leq T_2$ действуют гравитационные и вязкие силы, увеличивая характерный радиус slicka по закону

$$R = K_6 (\Delta\rho \rho_w^{-1} g V^2 v^{-1/2})^{1/6} t^{1/4} \text{ пока } \eta \leq [\sigma(\Delta\rho/\rho_0)^{-1} g^{-1} \rho^{-1}]^{1/2};$$

σ - суммарная величина поверхностного натяжения на воде /6/.

В фазе поверхностного натяжения ($T_2 \leq t \leq T_{\max}$) радиус slicka

$$R = K_7 (\sigma^2 t^3 / \rho_w^2 v)^{1/4}$$

увеличивается, пока толщина η не достигнет минимального предела η_0 для этой фазы ($\eta_0 \approx 0.5$ мм). Причиной прекращения растекания нефти является уменьшение σ и изменение его знака. Однако определение этой границы - сложная задача, т.к. в состав нефти входит много органических веществ, влияющих на величину σ .

По свидетельству /5/, при толщине slicka, превышающей η_0 , нефтяная пленка практически не рассеивается в толще воды. Можно считать, что величина T_{\max} достаточно мала, чтобы при расчете первоначального растекания пятна пренебречь испарением нефти. Дальнейшее растекание будет происходить под действием гидродинамических факторов и теоретически возможно до мономолекулярного слоя /7/, однако на практике нефтяная пленка, испаряя и растворяя легколетучие фракции, увеличивает вязкость и теряет способность к растеканию.

В области Ω с достаточно гладкой границей $\partial\Omega$ на рассматриваемом интервале времени $t \geq T_{\max}$ уравнение эволюции нефтяного slicka на поверхности моря записывается в виде

$$\nabla \eta + L_1 \eta = -E_\eta - f_{12} - f_{b1} - f_{p1}, \quad (1)$$

где $V = \partial / \partial t$; $\vec{U}_e = \text{div}(\vec{U}_e) - D_0 \Delta$; Δ - оператор Лапласа; D_0 - коэффициент молекулярной диффузии нефтяной пленки; E_n , f_{12} , f_{b1} , f_{ph} - потери нефтяной пленки за счет испарения, эмульгирования, био- и фотохимического разложения; \vec{U} - вектор эффективного дрейфа нефтяного slicka, связанный с вектором скорости ветра \vec{W} и скоростью поверхностных течений $\vec{V}(z=0)$ соотношением

$$\vec{U} = K_w \vec{W} + K_s \vec{V}(z=0), \quad (2)$$

в котором коэффициент ветрового дрейфа, по оценкам [3], $K_w = 0.03$, а коэффициент $K_s = 0.56$. Очевидно, что преобладающее влияние на дрейф пленки оказывает ветер в приводном слое моря.

Интенсивность испарения нефтяной пленки рассчитывалась по формуле [9]:

$$E(t) = \sum_{k=1}^n E_k(t) = \sum_{k=1}^n K_k P_{\alpha k} m_k M_0 / (RT m_0), \quad (3)$$

где $E_k(t)$ - поток k -ой фракции нефти; $P_{\alpha k}$ - парциальное давление при данной температуре T ; M_0 - молярная масса нефти; R - универсальная газовая постоянная; m_k и m_0 - масса k -ой фракции и нефти в целом; $K_k = 1.25 \cdot 10^{-3} |\vec{W}|$ - коэффициент массопереноса в атмосфере, вычисляемый по скорости ветра W .

Процесс физико-химической и биохимической деструкции нефти, согласно [1], можно описать следующим уравнением:

$$f_{ph} + f_{b1} = K_d \eta, \quad (4)$$

где $K_d = \alpha K(T)K(S)K_0$ - скорость распада (сут^{-1}), K_0 - поправка, учитывающая сезонные изменения активности биологических факторов самоочищения (принимается равной 0.323 (зима), 0.625 (весна), 0.914 (лето) и 0.674 (осень)); $K(T) = \exp(T-20/10)$, $K(S) = 0.28/S^{1/2} - 0.0015(S-2)$ - поправочные коэффициенты, зависящие соответственно от температуры T и солености S морской воды. Учет замедления скорости деградации нефти с течением времени вследствие увеличения относительного количества долгоживущих фракций производится путем введения в формулу для K_d нормирующего множителя $\alpha = 1$, если $t < 6$ сут и $\alpha = 0.84$ при $t > 6$ сут.

Прежде чем выписать выражение для f_{12} , запишем аналогичное (1) уравнение динамики эмульгированной части нефтепродукта типа "нефть в воде" с объемной концентрацией C :

$$B C + L_2 C = -K_0 C, \quad (5)$$

где $L_2 = \text{div}(\vec{V}_L) + (w + w_0) \partial/\partial z - \alpha_c A_L \Delta - \partial/\partial z[(\alpha_c K_z + v) \partial/\partial z]$; A_L , K_z - горизонтальная и вертикальная турбулентность; $\vec{V} = \vec{V}(x, y, z)$ - вектор горизонтальных компонент скорости течений; координатные оси x , y и z направлены соответственно на восток, север и вертикально вниз; α_c - обратное турбулентное число Шмидта для примеси; w , w_0 - вертикальная скорость воды и частиц эмульгированных нефтяных капель ($w_0 < 0$).

В начальный момент времени $t = T_{\text{max}}$ полагается

$$\eta = \eta_0; \quad C = 0. \quad (6)$$

В качестве граничных условий для уравнений (1), (5) на береговом контуре $\partial\Omega_c$ с нормалью \vec{n} положим

$$D_0 \partial\eta/\partial n = -f_{1c}; \quad \alpha_c A_L \partial C/\partial n = -f_{2c}, \quad (7)$$

где f_{1c} , f_{2c} - стоки нефтепродуктов, обусловленные проникновением нефти в межпоровые пространства между частицами отложений, слагающих побережье. Величины f_{1c} и f_{2c} полагаются равными $\beta v_c \eta$ и $\beta v_c C$, соответственно, где v_c - характерная скорость беспрепятственного проникновения нефти, а параметр β варьирует в диапазоне значений от 0 до 1 в соответствии с классификацией уязвимости прибрежной зоны по 10-балльной шкале [2].

Учитывая тот факт, что водонефтяная эмульсия в основном концентрируется в верхнем 10-метровом слое воды, т.е. в придонном слое на большей части шельфа концентрация нефти в эмульсии невелика, на дне при $z = H$ можно положить

$$-w_0 C + (\alpha_c K_z + v) \partial C/\partial z = 0. \quad (8)$$

На поверхности моря ($z = 0$) для эмульсии "нефть в воде" задается следующее граничное условие:

$$-w_0 C + (\alpha_c K_z + v) \partial C/\partial z = \begin{cases} f_{12}, & \eta > 0 \\ 0, & \eta = 0, \end{cases} \quad (9)$$

при этом, в виду сложности описания сорбционных свойств на поверхности жидкости, ~~мы не~~ рассматриваем отдельно эмульсии типа "вода в нефти" и полагаем, что эмульгирование происходит благодаря рассеиванию капель нефти в толще воды при обрушении поверхностных волн.

В условии (9) не учитывается возможность повторного образования поверхностных пленок при всплывании частиц нефти, а также испарение нефти из поверхностной эмульсии рассматриваемого типа. Считается, что к моменту исчезновения нефтяной пленки с поверхности моря, практически все легколетучие фракции нефти испарятся.

Для определения потока f_{12} вовлечения нефти из пленки в толщу воды нами принята гипотеза, аналогичная представлениям о механизме вовлечения в задачах эволюции термоклина /10/. Полагается, что скорость вовлечения $d\eta/dt$ нефтяной пленки определяется динамическими свойствами жидкости, а именно, потоком турбулентной энергии Q_1 за счет обрушения поверхностных волн и силами плавучести, т.е.

$$d\eta/dt = u \cdot f(Ri) = u \cdot Ri^{-n}, \quad (10)$$

где $n > 0$; u - скорость трения на поверхности моря; Ri - глобальное число Ричардсона, так что $Ri = g \Delta\rho\eta / (\rho_0 u^2)$; $Q_1 \sim u^3$.

Для того, чтобы $d\eta/dt$ было пропорционально Q_1 , необходимо, чтобы $n = 1$ и, следовательно,

$$d\eta/dt = -f_{12} = -\gamma u^3 \rho_0 / (\Delta\rho g \eta), \quad (11)$$

где γ - универсальная постоянная, которая может быть определена из натуральных данных. Для приближенной оценки величины γ мы ограничились рассмотрением стационарных внешних условий, при которых $u = \text{Const}$. Тогда, уравнение (11) с граничным условием (6) допускает частное решение вида $\eta = [\eta_0^2 - 2\gamma u^3 \rho_0 t / (\Delta\rho g)]^{1/2}$ и величина γ может быть выражена через время T_1 полного перехода пленки в эмульсию посредством соотношения $\gamma = \eta_0^2 \Delta\rho g / (2u^3 \rho_0 T_1)$.

Определение времени T_1 основывается на концепции полураспада /5/, согласно которой, нефть после разлива сперва растекается без рассеивания до достижения определенной критической толщины (≈ 0.5 мм), после чего начинается процесс ее рассеивания как преобладающий с временем полураспада $t_{0.5} = 12$ ч независимо от типа нефти. Тогда $T_1 = T_{\text{max}} + 6 t_{0.5}$ и в численных экспериментах нами было установлено значение $\gamma = 1.1 \cdot 10^{-6}$.

На рис.1- 2 приведены результаты тестовой задачи, характеризующие временную эволюцию пятна нефти в море после аварийного (100 тонн) разлива. При расчетах полагалось, что разлив нефти происходил при ветре 7.5 м/с, температура воздуха и воды принималась равной 10°C , глубина места - 10 м. Параметры нефти задавались на основании сведений о нефти "Экофиск" /5/. Границы фаз растекания нефти характеризовались следующими параметрами: инерционная фаза - $T_1 = 230$ с; $R(T_1) = 50$ м; $\eta(T_1) = 15$ мм; гравитационно-вязкая фаза - $T_2 = 20$ мин; $R(T_2) = 100$ м; $\eta(T_2) = 3.7$ мм; фаза поверхностного натяжения - $T_{\text{max}} = 76$ мин; $R(T_{\text{max}}) = 272$ м; $\eta(T_{\text{max}}) = 0.5$ мм. После завершения третьей фазы

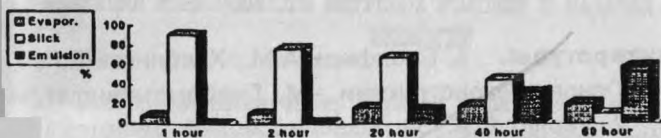


Рис. 1 Временная диаграмма трансформации нефти в море по результатам численного эксперимента

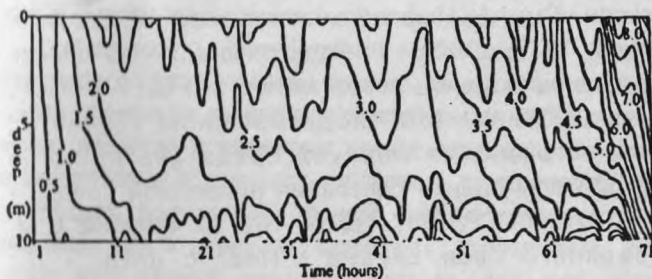


Рис. 2 Пространственно-временное распределение содержания нефти (в г/л) под сликом в эмульсии типа "нефть в воде".

геометрические размеры пятна полагались неизменными и моделировалась убыль толщины slicka за счет испарения, деструкции и эмульгирования нефти. Полученные результаты хорошо согласуются с данными натурных наблюдений над эволюцией нефтяных пятен в море, приведенными в работе /5/.

Список литературы. 1. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. Азовское море : Основы реконструкции, - М., Гидрометеоиздат, 1985. - 212 с. 2. Герлах С.А. Загрязнение морей. Диагноз и терапия. Пер. с англ. - Л.: Гидрометеоиздат, 1985 - 263 с. 3. Журбас В.М. Основные механизмы распространения нефти в море // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа, т.12, ВИНТИ, М., 1978. - с.144-159. 4. Зацепа С.Н., Овсиенко С.Н. Численное моделирование распространения нефти в море // Методология прогнозирования загрязнения океанов и морей. - М: Гидрометеоиздат, 1986 - с.152-154. 5. Кормак Д. Борьба с загрязнением моря нефтью и химическими веществами: Пер. с англ. - М.: Транспорт, 1989. - 365с. 6. Краус Е. Взаимодействие атмосферы и океана: Пер. с англ. - Л.: Гидрометеоиздат, 1976. - 295 с. 7. Нельсон - Смит А. Нефть и экология моря : Пер. с англ. - М. : Прогресс, 1977 - 302с. 8. Тарасенко Л.Н. Об оценке нефтяного загрязнения в шельфовой зоне. - М.: ВЦ АН СССР, 1989. - 12 с. 9. Ткалин А.В. Моделирование как метод исследования загрязнения морской среды (на примере нефтяного) // Методы оценки состояния природной среды. - Владивосток. ДВО АН СССР, 1987. - с.158-162. 10. Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана : Пер. с англ. - Л.: Гидрометеоиздат, 1980, 318 с.
