

УДК 665.63:51.001.57

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗЛИВА
НЕФТИ В МОРЕ****А.Ф.АМИНБЕКОВ, Г.Л.РАФИЕВА***Бакинский Государственный Университет**aminbekov@mail.ru*

В статье описывается методика для расчета растекания нефтяной плёнки по поверхности моря. При растекании нефтяной плёнки по поверхности моря, наблюдаются три последовательных режима: инерционный, гравитационно-вязкий и режим поверхностного натяжения. По полученным математическим формулам в статье можно определить размеры нефтяной плёнки в процессе растекания по поверхности моря, а также время прекращения растекания.

Ключевые слова: нефтяная пленка, инерционный и гравитационно-вязкий режим, растекание нефти, коэффициент молекулярной диффузии нефти

Известно, что загрязнения океанов и морей происходит вследствие поступления загрязняющих веществ с речным стоком, их выпадения из атмосферы и наконец, благодаря хозяйственной деятельности человека, непосредственно, на морях и океанах. Особое место занимает загрязнение океана нефтью и нефтепродуктами. Естественное загрязнение происходит в результате просачивания нефти из нефтяных слоёв, главным образом, на шельфе. Около половины искусственных источников создаёт деятельность людей, непосредственно, на морях и океанах. На втором месте находится речной сток (вместе с поверхностным стоком с прибрежной территории) и на третьем – атмосферный источник.

Наибольший вклад в нефтяное загрязнение океана вносят морские перевозки нефти. Даже при безаварийном транспорте происходят потеря нефти при её погрузке и разгрузке, сбрасывании в океан промывочных и балластных вод (которыми заполняют танкера после выгрузки нефти), а также при сбросе, так называемых, льяльных вод, которые всегда скапливаются на полу машинных отделений любых судов. Хотя международные конвенции запрещают сброс, загрязненных нефтью, вод в особых районах океана, налагают ограничения на содержание нефти и нефтепродуктов в сбрасываемых водах, они всё же не устраняют загрязнения.

Наибольший ущерб окружающей среде и биосфере наносят внезапные разливы больших количеств нефти при авариях танкеров, хотя такие разливы и составляют только 5-6% суммарного нефтяного загрязнения. Аварийные разливы также происходят при добыче нефти на морском шельфе, в настоящее время составляющей около трети всей мировой добычи. В среднем, такие аварии вносят сравнительно небольшой вклад в нефтяное загрязнение океана, но отдельные аварии имеют катастрофический характер.

В открытом океане нефть встречается, главным образом, в виде тонкой плёнки (с минимальной толщиной до 0.15 мкм.) и смоляных комков, которые образуются из тяжёлых фракций нефти. Если смоляные комки воздействуют, прежде всего, на растительные и животные морские организмы, то нефтяная плёнка, кроме того, влияет на многие физические и химические процессы, происходящие на поверхности раздела океан-атмосфера и в слоях, прилегающих к нему. При росте загрязнённости океана, такое влияние может приобрести глобальный характер. Прежде всего, нефтяная плёнка увеличивает долю, отражаемой от поверхности океана, солнечной энергии и уменьшает долю поглощаемой энергии. Тем самым, нефтяная плёнка оказывает влияние на процессы теплонакопления в океане. Несмотря на уменьшение количества поступающего тепла, поверхностная температура, при наличии нефтяной плёнки, повышается тем больше, чем толще нефтяная плёнка. Океан является главным поставщиком атмосферной влаги, от которого в значительной мере зависит степень увлажнения материков. Нефтяная плёнка затрудняет испарение влаги, а при достаточно большой толщине (порядка 400 мкм.) может свести его, практически, к нулю. Сглаживая ветровое волнение и препятствуя образованию водных брызг, которые, испаряясь, оставляют в атмосфере мельчайшие частички соли, нефтяная плёнка изменяет солеобмен между океаном и атмосферой. Это также может повлиять на количество атмосферных осадков над океаном и материками, так как частицы соли составляют значительную часть ядер конденсации, необходимых для образования дождя.

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к исследованиям распространения нефти в морской среде. При планировании работ по борьбе с аварийными нефтяными разливами в море и при проведении таких работ возникает необходимость в прогнозировании распространения нефти в море. В связи с этим очень важное значение имеет разработка методики составления прогноза размеров и положения нефтяного пятна в море, в том числе и в прибрежной зоне, где такой прогноз наиболее актуален. Такие прогнозы позволяют, в частности, передавать предупреждения о возможности загрязнения нефтью береговой зоны, о пересечении нефтяным пятном районов интенсивной хозяйственной деятельности, курсов судов и т.д.

Постановка задачи и метод решения

Распространения нефти в море представляет собой сложный процесс, при описании которого необходимо учитывать большое количество разнообразных факторов. Для случая мгновенного локального пролива некоторого объема нефти (например, в результате аварии танкера), этот процесс схематически можно представить следующим образом. Вначале наблюдается растекание нефти по поверхности моря под действием силы тяжести, (т.к. плотность воды больше плотности нефти, то нефть возвышается над поверхностью моря), а затем и силы поверхностного натяжения. Задача усложняется тем, что в процессе растекания, вследствие испарения и растворения, в воде изменяются свойства нефти: ее плотность и вязкость растут, а суммарное поверхностное натяжение на границе раздела вода-нефть-воздух убывает. На определенном этапе поверхностное натяжение меняет знак и растекание прекращается. Дальнейший рост размеров плёнки определяется турбулентным ветром, т.е. турбулентной диффузией. Под действием турбулентной диффузии нефтяная плёнка должна была бы, в итоге, стать мономолекулярной и затем начать «рваться».

Дальнейшее поведение нефти неоднозначно и зависит от индивидуальных физико-химических свойств, сорта нефти и гидрометеороусловий: ветра, волнения, температуры воды и воздуха, солнечной радиации, солёности моря. В одних случаях, нефть длительное время распространяется в виде slickов, в других случаях, достаточно быстро происходит образование эмульсий типа «нефть в воде» или «вода в нефти», а иногда вследствие интенсивного испарения и выщелачивания, нефть становится более плотной, чем вода и тонет.

Помимо распространения пятна нефти относительно его центра тяжести, важным является вопрос о движении пятна как целого, т.е. вопрос о дрейфе пятна нефти. Дрейф нефтяной плёнки определяется воздействием ветра, течения и поверхностного волнения.

Ниже предлагается методика для расчета растекания нефтяной плёнки по поверхности моря. Для этой цели используется подход, предложенный Ж.А.Фейом [1].

Согласно идее Фейя, при растекании нефтяной плёнки по поверхности моря, наблюдается три последовательных режима: инерционный, гравитационно-вязкий и режим поверхностного натяжения. При этом предполагается, что нефтяная плёнка характеризуется радиусом R , толщиной h и объём плёнки $V \sim R^2 h$ во всех режимах сохраняется.

В инерционном режиме, растекание нефтяной плёнки обеспечивается за счет баланса сил горизонтального градиента давления и инерционного члена. Для случая нефтяной плёнки, справедливы следующие оценки:

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial r} = g \varepsilon \frac{\partial h}{\partial r} \approx g \varepsilon \frac{h}{R} = g \varepsilon \frac{V}{R^3}. \quad (1)$$

$$u \frac{\partial U}{\partial r} \approx \frac{R}{t} \frac{R}{tR} = \frac{R}{t^2}. \quad (2)$$

Однако, в реальных условиях до мономолекулярности дело никогда не доходит: под действием турбулентных пульсаций скорости течения и поверхностного волнения пленка "рвется" гораздо раньше.

Где r -радиальная координата, t -время с момента разлива нефти, U -радиальная компонента скорости, p -давление, g - ускорение свободного падения, $\varepsilon = \frac{\rho_\omega - \rho_0}{\rho_0}$ - относительная разность плотностей воды ρ_ω и нефти ρ_0 ; V -объем разлитой нефти.

Приравнивая (1) и (2), получаем зависимость радиуса нефтяной плёнки R от времени, для инерционного режима растекания:

$$R = k_i (\varepsilon g V t^2)^{1/4}, \quad (3)$$

где k_i –константа порядка единицы.

В гравитационно-вязком режиме, растекание нефтяной плёнки обеспечивается за счет баланса сил горизонтального градиента давления и вязкости.

Известно, что для отношения коэффициентов молекулярной вязкости нефти μ_0 и воды μ_ω справедливо соотношение:

$$\frac{\mu_0}{\mu_\omega} \gg 1.$$

Поэтому можно предположить, что вертикальный градиент скорости в нефтяной плёнке будет мал по отношению к градиенту скорости в воде. Упрощенно, можно считать, что плёнка движется с постоянной по толщине скоростью $U(r)$. А вследствие вязкой передачи импульса от плёнки к воде, под плёнкой существует вязкий пограничный слой воды, охваченный движением, толщина которого оценивается как $\delta = (\nu t)^{1/2}$, где ν - кинематический коэффициент вязкости воды. Следовательно, растекание плёнки тормозится благодаря существованию в воде вязкого пограничного слоя. Сила трения F_τ на единицу массы плёнки по закону Ньютона равняется вязкому напряжению на границе раздела вода-плёнка (т.е. произведению динамического коэффициента вязкости воды μ_ω на верти-

кальный градиент скорости в воде), деленному на $\rho_0 h$, то в первом приближении принимаем $\rho_0 - \rho_\omega$.

$$F_\tau = \frac{\rho_\omega v \frac{\partial U}{\partial z}}{\rho_0 h} \approx v \frac{R}{t \delta} \frac{1}{h} = \frac{v^{\frac{1}{2}} R^3}{V t^{\frac{3}{2}}}. \quad (4)$$

Приравнивая выражения (1) и (4), получаем формулу для радиуса нефтяной плёнки на гравитационно-вязком режиме растекания:

$$R = k_\tau \left(\frac{\varepsilon g V^2 t^{\frac{3}{2}}}{v^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{6}}. \quad (5)$$

где k_τ – константа.

Несложный анализ показывает, что переход от инерционного к гравитационно-вязкому режиму происходит тогда, когда толщина плёнки h становится достаточно малой, а толщина вязкого пограничного слоя δ достаточно большая, так что выполняется равенство:

$$h = \delta.$$

В режиме поверхностного натяжения, растекание нефтяной плёнки происходит под действием сил вязкости и поверхностного натяжения. На единицу массы нефти, вследствие поверхностного натяжения, действует сила:

$$F_p \approx \frac{\sigma R}{\rho_o V}, \quad (6)$$

где $\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$, σ_1 , σ_2 , σ_3 – поверхностное натяжение на границе раздела вода-воздух, вода-нефть и воздух-нефть, соответственно.

Так как, согласно (1), действие на плёнку горизонтального градиента давления убывает как R^{-3} , а действие поверхностного натяжения, согласно (6), растёт пропорционально R , то на начальной стадии растекания существенен только градиент давления, а когда толщина плёнки становится меньше, чем h_k ,

$$h_k = \left(\frac{\tau}{\varepsilon g \rho_o} \right)^{\frac{1}{2}},$$

то вклад поверхностного натяжения в растекание плёнки начинает доминировать. Приравнивая правые части формул (4) и (6), находим зависимость для радиуса нефтяной плёнки в режиме поверхностного натяжения:

$$R = K_p \left(\frac{\sigma^2 t^3}{\rho_0^2 \nu} \right)^{1/4}, \quad (7)$$

где K_p - константа.

Необходимо отметить, что по истечении определенного времени, с момента поступления нефти, её растекание по поверхности моря прекращается. Такое явление всегда наблюдается в режиме поверхностного натяжения. Поэтому естественно предположить, причиной этого является уменьшение и, в конечном итоге, изменение знака σ . Следовательно, для решения задачи о прекращении растекания, необходимо знать: насколько быстро в плёнке изменяется σ . Вопрос об изменении σ представляется достаточно сложным. Поскольку, во-первых, сырая нефть состоит из большого числа органических веществ (в основном углеводородов с различным молекулярным весом). Каждый из них имеет свою летучесть и растворимость в воде и вносит определённый вклад в суммарное значение σ . Во-вторых, температура, солёность и биологические характеристики моря также, в определённой степени, влияют на σ . В силу указанных трудностей, до настоящего времени не разработан эффективный метод: определения момента прекращения растекания нефти по поверхности моря.

Для определения момента прекращения растекания нефти в режиме поверхностного натяжения, используем вероятностный подход описания динамических систем [2]. Согласно данному подходу, характерное время выравнивания неоднородности, за счёт транспорта в пространственной ячейке с линейным размером L , даётся формулой:

$$\tau \approx L^2 D^{-1}, \quad (8)$$

где D -коэффициент диффузии.

Очевидно, что растекание нефти по поверхности моря прекращается в момент времени, когда селективное испарение и растворение в воде наиболее летучих и растворимых компонентов нефти заканчивается. Тогда, согласно (8), за время t , диффузия нефти проникает на глубину:

$$h = \sqrt{D_m t}, \quad (9)$$

где D_m -коэффициент молекулярной диффузии нефти.

Комбинируя (7) и(9), получаем оценку для момента времени прекращения растекания нефти по поверхности моря.

$$t = \frac{1}{K_p} \left(\frac{V^2 \rho_0^2 V}{\sigma^2 D_m} \right)^{1/4}, \quad (10)$$

Таким образом, на основе полученных формул (3), (5), (7) и (10), можно определить размеры нефтяной плёнки в процессе растекания по поверхности моря, а также время прекращения растекания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fay J.A. The Spread of Oil Slicks. In. Oil on the Sea. New York, Plenum Press, 1969, p.53-63.
2. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1990, 345 с.

ДӘНİZӘ AXIDILMIŞ NEFTİN YAYILMASININ MODELLEŞDIRİLMƏSİ

Ə.F.ƏMİNБӘYOV, H.L.RƏFİYEVƏ

XÜLASƏ

Məqalədə dəniz səthində nazik neft təbəqəsinin yayılmasının hesablanması üçün metodika təsvir olunmuşdur. Dəniz səthində nazik neft təbəqəsinin yayılması zamanı üç ardıcıl rejim nəzərə çarpır: inersion, qravitasiya-özül və səthi gərginlik rejimləri. Məqalədə alınmış riyazi formullar əsasında dəniz səthində yayılan nazik neft təbəqəsinin ölçülərini və habelə yayılmanın dayanma vaxtını təyin etmək olur.

Açar sözlər: neft təbəqəsi, inersion və qravitasiya-özül rejimi, neftin yayılması, neftin molekulyar diffuziya əmsalı

MODELING THE SPREAD OF THE OIL SPILL IN THE SEA

A.F.AMINBAYOV, H.L.RAFIYEVA

SUMMARY

This paper describes the methodology for the calculation of oil slick spreading on the sea surface. The spread of the oil slick on the sea surface is followed by three consecutive regimes: inertial, gravity-viscous and surface tension. In the paper, using the obtained mathematical formulas, it is possible to determine the size of oil slick in the process of spreading over the surface of the sea, as well as the termination time of spreading.

Key words: oil film, inertia and gravity-viscous regimes, the spreading of oil, the molecular diffusion coefficient of oil

Поступило в редакцию: 05.09.2013 г.

Подписано к печати: 29.10.2013 г.