

Краткое описание модели OilMARS

Разработанная в ААНИИ модель распространения нефтяных загрязнений в арктических ледовитых морях OilMARS (**O**il **S**pill **M**odel for the **A**rctic **S**eas) учитывает перенос и трансформацию нефтяных загрязнений на поверхности моря в результате аварийных длительных/моментальных разливов нефти от неподвижных или движущихся источников, а также распространение обнаруженных на поверхности моря пятен нефтяных загрязнений. Модель работает в трехмерном варианте, рассчитывая внутриводное распространение дисперсионного шлейфа и нефти, погружившейся в воду. Модель рассчитывает появление и распространение вторичного нефтяного загрязнения на поверхности воды и загрязнение морского дна. Кроме того, модель учитывает влияние сплоченности и дрейфа ледяного покрова на распространение загрязнения, попадание нефти на верхнюю поверхность ледяного покрова и под лед в результате сжатия дрейфующего льда, а также возможность вмержания нефтяного загрязнения в лед. Модель **OilMARS** была доработана для работы в оперативном режиме и включения в оперативную систему арктических морей.

Длительный аварийный нефтяной разлив представляется в виде большого числа маленьких дискретных разливов – порций или спиллетов (от англ. *spillet*), которые с определенной периодичностью поступают от источника загрязнения на поверхность воды. Начальные массы (объемы) спиллетов зависят от задаваемой скорости разлива:

$$m_0 = \int_{t_1}^{t_2} V_{sp} dt, \text{ где } t_2 - t_1 = \tau \text{ (шаг по времени).}$$

При этом скорость разлива может быть переменной во времени. Предполагается, что дискретные спиллеты независимы друг от друга. Количество спиллетов может быть задано от одного (мгновенный разлив) до любого количества, в зависимости от мощности компьютера. Каждый спиллет имеет набор параметров: координаты, площадь, плотность и вязкость нефти, количество нефти на поверхности воды, количество испарившейся нефти и т.д. Все параметры спиллетов зависят от времени нахождения данного спиллета на поверхности воды. Используемый в модели подход дает возможность учесть пространственную неоднородность нефтяного пятна, т.е. в каждый момент времени на поверхности воды находятся спиллеты с разной плотностью, вязкостью, массой и площадью.

Для расчета переноса спиллетов используется Лагранжев подход и расчетная сетка, используемая для расчета циркуляции воды (рис. ПЗ-1А). Для расчета процессов эволюции нефти используется подход Эйлера и сетки с высоким пространственным разрешением, зависящим от начальной массы спиллетов (рис. ПЗ-1Б).

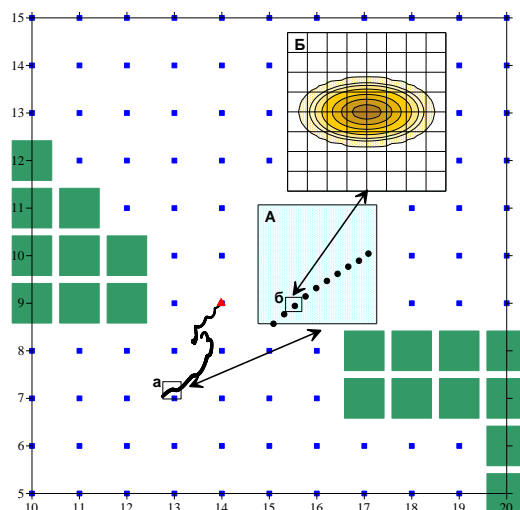


Рисунок ПЗ-1. Схема применения лагранжево-эйлерова подхода к описанию переноса и трансформации аварийного разлива нефти. Области, помеченные строчными буквами, соответствуют врезкам, помеченным прописными буквами. На осях – сеточные координаты.

В модели принимается, что процесс эволюции каждого спиллета проходит две стадии: растекания и трансформации. Вследствие малого объема спиллета, процесс растекания занимает всего несколько часов, в течение которых происходит процесс испарения легких фракций нефти, соответствующее уменьшение массы спиллета и увеличение плотности и вязкости нефти. Кроме того, учитывается влияние сплоченности ледяного покрова на площадь и толщину спиллета. При этом растекающийся спиллет переносится по поверхности моря и учитывается возможность выноса растекающегося спиллета к берегу.

Принимается, что после завершения процесса растекания, продолжает действовать процесс испарения и начинают действовать процессы горизонтальной диффузии, вертикальной дисперсии и образования эмульсии «вода в нефти» с соответствующим увеличением плотности и вязкости нефти. При этом спиллет переносится по поверхности моря и может быть вынесен к берегу. Учитывается влияние сплоченности и дрейфа ледяного покрова. На каждом временном шаге производится проверка баланса массы каждого спиллета.

Для расчета растекания нефти до состояния пленки в модели используется стандартный подход [Fay and Hoult, 1971; ASCE, 1996; Reed et al., 1999]. Расчет процесса

растекания проводится с использованием полуэмпирических зависимостей, предложенных в [Fay and Hoult, 1971]. Для учета влияния ледяного покрова используется соотношение [Fingas and Hollebone, 2003]:

$$S = \alpha S_0, \text{ где } \alpha = \left[\frac{\mu_{oil}}{\mu_{water}} \right]^{-0.15} (1 - C_{ice}),$$

Где μ_{oil} и μ_{water} – динамическая вязкость нефти и воды; C_{ice} – сплоченность ледяного покрова; S – площадь пятна.

После завершения растекания производится адаптация пятна на прямоугольную расчетную сетку с учетом ветрового воздействия. Для каждого спиллета формируется своя расчетная сетка, пространственное разрешение которой зависит от массы данного спиллета.

Перенос спиллетов происходит под воздействием ветра, течений и волн. Кроме того, учитывается случайный перенос спиллетов за счет горизонтальной мезомасштабной турбулентности на поверхности моря:

$$\frac{dX_i}{dt} = \bar{U}_i = \bar{U}_{itid} + \bar{U}_{icur} + \bar{U}_{iwind} + \bar{U}_{iwave} + \bar{U}_{idiff},$$

где X_i – координаты i -ого спиллета; U_{itid} – приливная составляющая переноса, U_{icur} – составляющая за счет течения; U_{iwind} – ветровая составляющая; U_{iwave} – волновая составляющая (стоксов перенос); U_{idiff} – диффузионная составляющая.

Для определения вектора суммарных течений используются результаты расчетов на гидродинамической модели. Ветровая составляющая переноса спиллета принимается по величине равной 3 % от скорости ветра [ASCE, 1996; Reed et al., 1999]. Для расчета угла отклонения от направления ветра используется эмпирическая зависимость [Samuels et al., 1982]:

$$\alpha_{dev} = 25 \exp(-W^3 / 1184.75),$$

где W – скорость ветра. При скорости ветра больше 20 м/с угол отклонения принимается равным нулю.

Приливные составляющие переноса либо входят в расчетные скорости течения, либо рассчитываются отдельно по пространственному распределению гармонических постоянных.

Диффузионная составляющая переноса рассчитывается по формуле [Бровченко и Мадерич, 2002]:

$$u_{idiff} = P_1 \sqrt{\frac{2K_L}{\tau}} \text{ и } v_{idiff} = P_2 \sqrt{\frac{2K_L}{\tau}},$$

где $P_{1,2}$ - случайные числа $[-1, 1]$; K_L – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии на поверхности воды, рассчитывается по схеме Смагоринского [Haidvogel and Beckmann, 1999].

Стоксов перенос рассчитывается по формуле [Филлипс, 1980]:

$$V_{st} = \frac{\sigma k a^2 c h(2k(H-z))}{2sh^2(kH)},$$

где σ – частота волны ($=2\pi/T_w$); k – волновое число ($=2\pi/\lambda_w$); a – амплитуда волны ($=h_w/2$); H – глубина.

Соответственно, составляющие по осям координат:

$$\begin{aligned} u_{iwave} &= V_{st} W_x / W \\ v_{iwave} &= V_{st} W_y / W \end{aligned}$$

При наличии ледяного покрова, по наблюдениям и результатам ретроспективного моделирования [Reed and Aamo, 1994], скорость переноса нефти существенно уменьшается в зависимости от сплоченности льда, и направление переноса нефтяного пятна отклоняется на угол до 60° от предвычисленного направления переноса без учета ледяного покрова. Поэтому при расчетах скорости и направления переноса спиллетов принимается $\vec{U}_{ice} = \alpha \vec{U}_i$, где $\alpha = (1 - C_{ii})$ – коэффициент, зависящий от сплоченности льда в ближайших узлах сетки:

$$\begin{aligned} C_{itx} &= C_{ixy} + u_i \frac{\partial C_{ice}}{\partial x} \tau \\ C_{ity} &= C_{ixy} + v_i \frac{\partial C_{ice}}{\partial y} \tau \end{aligned}$$

где C_{ixy} - сплоченность льда в точке нахождения данного спиллета; $\frac{\partial C_{ice}}{\partial x, y}$ - градиенты сплоченности льда по осям координат, τ – расчетный шаг по времени.

При заходе спиллета в зону большей сплоченности льда производится соответствующее уменьшение площади спиллета с сохранением массы. Примем:

$$S_1 = S_0(1 - C_{ixy}) \text{ и } S_2 = S_0(1 - C_{ixyt})$$

Отсюда:

$$S_2 = \frac{(1 - C_{ixyt})}{(1 - C_{ixy})} S_1,$$

где C_{ixyt} - сплоченность льда в точке, в которую данный спиллет переносится за шаг по времени. При $C_{ixyt} < C_{ixy}$ перерасчета площади спиллета не производится.

При расчетах распространения нефти в ледовых условиях обычно принимается, что при сплоченности льда более 5 баллов нефть движется вместе со льдом [например: *Bobra*

and Fingas, 1986; Venkatesh et al., 1990]. Но, как показали результаты наблюдений за реальным разливом, нефть может двигаться быстрее, чем дрейфующий лед [Wang et al., 2008]. Поэтому в модели принимается, что при сплоченности льда более 5 баллов спиллет будет переноситься со скоростью дрейфа льда $U_{iice}=U_{drift}$ только при условии $U_{drift} > U_{iice}$ (где U_{drift} – скорость дрейфа льда). В противном случае спиллет переносится со скоростью U_{iice} . При сплоченности льда более 5 баллов также принимается $U_{iwave} = 0$.

При подходе загрязнения к берегу (припаю) происходит загрязнение береговой зоны, степень которого зависит от геоморфологии берега. При неблагоприятных условиях происходит вынос нефтяного загрязнения (с волнами или с нагоном) на берег и впитывание его в почву. В настоящей версии модели принимается, что берег (припай) является отвесной стенкой. При подходе спиллета к берегу происходит изменение его формы и толщины. При этом вся масса нефти остается на воде у берега и производится перераспределение массы с соответствующим увеличением толщины слика.

Дальнейший расчет трансформации каждого спиллета производится путем решения уравнения диффузии для неконсервативной примеси относительно массы нефти.

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = A_{x_i}(t) \frac{\partial^2 m_i}{\partial x_{lit}^2} + A_{y_i}(t) \frac{\partial^2 m_i}{\partial y_{lit}^2} + \sum Q_{mij}$$

где m_i – масса i -ого спиллета; A_{x,y_i} – коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии; t – время; $\sum Q_{mij}$ – потеря массы за счет испарения, вертикальной дисперсии и погружения в воду.

Для расчета горизонтальной диффузии используется коэффициент диффузии, зависящий от пространственных размеров пятна примеси [Озмидов, 1986]. Кроме того, в расчетную формулу введены два дополнительных коэффициента, зависящие от изменения вязкости нефти и от сплоченности ледяного покрова.

$$A_{x(y)_i}(t) = (1 - C_{ice}) \frac{\mu_o}{2\mu_i} u^* L_{x(y)_i}^{1.33},$$

где $L_{x(y)_i}$ – пространственный размер i -ого спиллета в x (y) направлении, u^* – “скорость диффузии” (0.8 cm/s), μ_o – начальная вязкость нефти, μ_i – вязкость i -ого спиллета.

Решение уравнения диффузии производится с использованием центральных разностей при отсутствии твердой границы и направленных разностей второго порядка в случае контакта спиллета с границей. В результате спиллет приобретает форму эллипса (рис. ПЗ-2).

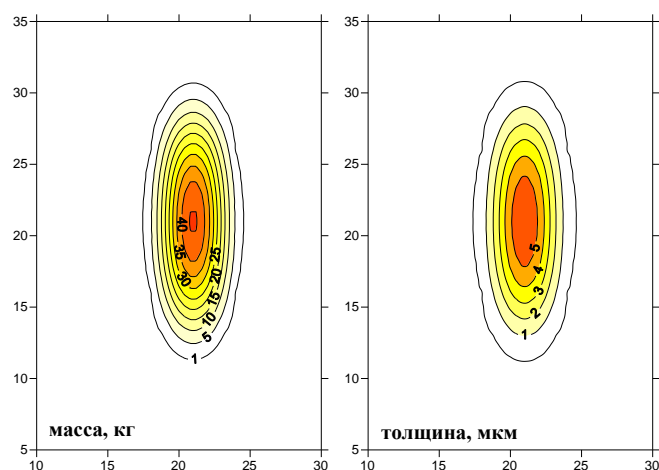


Рисунок ПЗ-2. Распределение массы и толщины нефти в спиллете.

Поскольку масса спиллета в процессе диффузии не должна изменяться, на каждом временном шаге производится проверка постоянства массы. В случае возникновения невязки, производится ее ликвидация методом итераций.

Испарение является одним из наиболее важных процессов. Процесс испарения нефти сопровождается изменением ее химического состава, что приводит к изменению физико-химических свойств. По мере выхода наиболее летучих фракций процентное содержание средних и тяжелых фракций увеличивается, возрастает плотность и вязкость нефти.

Для расчета процесса испарения нефти в модели используется псевдо-компонентный метод [Ткалин, 1986]. При образовании эмульсии нефти учитывается влияние вязкости на процесс испарения [Xie et al., 2007]. Принимается, что процесс испарения прекращается, когда масса спиллета становится равной $m_i = (Asph + Wax)m_0/100$, где *Asph* – содержание асфальтенов (+ смол) в нефти (%), *Wax* – содержание парафинов в нефти (%).

При сжатиях льда и попадании спиллета на верхнюю поверхность снежно-ледяного покрова процесс испарения продолжается, но с учетом резкого понижения температуры подстилающей поверхности. Если температура поверхности снежно-ледяного покрова ниже точки текучести данного нефтепродукта, то рассчитывается только перенос нефти дрейфующим льдом.

Изучение эмульсий «вода в нефти» показывает, что в зависимости от содержания в нефти смол и асфальтенов эмульсии могут быть трех категорий: устойчивые, среднеустойчивые (время существования - несколько дней) и неустойчивые (время существования - несколько часов). Среднеустойчивые эмульсии содержат асфальтенов и смол больше 3% (но меньше 7%). При содержании асфальтенов более 7% образуется устойчивая эмульсия [Fingas et al., 1999]. Для определения устойчивости эмульсии

вводится индекс стабильности [Xie et al., 2007]. В случае, благоприятном для образования эмульсии, производится расчет этого процесса.

В настоящей модели реализовано два метода расчета эмульгирования: метод, предложенный Расмуссеном [1985], используется когда известно содержание асфальтенов и парафинов в нефти, и метод, предложенный Маккеем и др. [1980], когда содержание асфальтенов и парафинов неизвестно.

Расчет вертикальной дисперсии нефти в воду, т.е. вбивания обрушающимися волнами капель нефти в поверхностный слой моря, в результате чего образуется эмульсия типа «нефть в воде», производится с помощью широко используемого в мировой практике метода [Delvigne and Sweeney, 1988; Reed et al., 1999].

Плотность и вязкость нефти значительно увеличиваются при испарении легких фракций нефти и при образовании эмульсий "вода в нефти". Также, плотность и вязкость нефти зависят от изменчивости температуры воды, что особенно важно при расчетах нефтяных разливов в арктических морях. Для расчета изменений плотности и вязкости нефти применяются широко используемые соотношения [Mackay et al., 1980; Reed, 1989; Miranda et al., 2000; Quiroga et al., 2002; etc].

На каждом временном шаге (t) производится проверка условия сохранения массы каждого спиллета:

$$m_{i0} = m_{isurf}^t + \int_0^t (m_{ieva} + m_{idisp} + m_{isubm}) dt,$$

где m_{i0} – начальная масса спиллета; m_{isurf} – масса спиллета на поверхности воды в момент времени t ; m_{ieva} - масса испарившейся нефти, m_{idisp} - масса нефти, вбитая в воду ветровыми волнами; m_{isubm} - масса утонувшей нефти.

Загрязнение ледяного покрова. Оперативная модель OilMARS использует поля сплоченности и дрейфа льда, полученные с помощью гидродинамической модели, работающей в оперативно-прогностическом режиме.

В связи с тем, что ледяной покров обладает сильной пространственно-временной изменчивостью, каждый спиллет испытывает его влияние в данный момент времени в данной точке и последствия влияния ледяного покрова на разные спиллеты могут значительно различаться.

В модели принимается, что сплоченность ледяного покрова влияет на площадь и, соответственно, на увеличение толщины пленки нефти в процессах растекания и дальнейшей диффузии нефтяного сляка. Влияние сплоченности льда на процессы испарения и формирование эмульсий «нефть в воде» и «вода в нефти» под действием ветровых волн косвенно учитывается за счет сокращения площади спиллета. При этом

принимается, что влияние ветровых волн прекращается при сплоченности ледового покрова более 5 баллов. Кроме того, сплоченность и дрейф льда оказывают сильное влияние на перенос спиллетов.

При сжатии и торошении льда нефть будет заплескиваться как на поверхность льда, так и уходить под ледяной покров. Используемый в модели подход дает возможность промоделировать поведение нефти при сжатиях льда. Принимается, что при сплоченности льда 9.5 баллов и скорости сжатия менее 0.12 м/с вся масса спиллета оказывается подо льдом. При скорости сжатия более 0.12 м/с вся масса спиллета попадает на верхнюю поверхность льда (“lead pumping”) [Fingas and Hollebone, 2003].

Нефть, попавшая на верхнюю поверхность снежно–ледяного покрова, растекается по поверхности, частично испаряется, частично впитывается в снежно–ледяной покров и переносится в пространстве дрейфующей загрязненной льдиной. При попадании нефти на поверхность снежно-ледяного покрова происходит значительное увеличение плотности и вязкости нефти за счет низкой температуры поверхности. Если температура поверхности снежно-ледяного покрова ниже точки текучести данного нефтепродукта, то рассчитывается только перенос нефти дрейфующим льдом без растекания и впитывания.

Для расчетов процесса растекания нефти на верхней поверхности снежного/ледяного покрова используется полуэмпирические параметризации [Chen et al., 1974; Belore and Buist, 1988 Fingas and Hollebone, 2003]. Для расчета впитывания (инфильтрации) нефти в снег/лед используется модифицированный метод [Belore and Buist, 1988], основанный на решении уравнения Дарси. После расчета процессов растекания и впитывания на данном временном шаге, производится расчет процесса испарения с поверхности и расчет переноса пятна нефти дрейфующим льдом.

Под лед нефть попадает в результате сжатия льда, либо при сбросе нефти непосредственно под лед, либо при выходе вторичного загрязнения под лед. Этот вид загрязнения льда самый неопределенный, поскольку оценить количество и положение нефти подо льдом практически невозможно.

Нефть, попавшая под лед, растекается и скапливается в полостях и карманах на нижней поверхности ледяного покрова, часть нефти может заполнять трещины и разводья. При этом процесс загрязнения льда зависит от шероховатости и топографии нижней поверхности. Чем больше впадин и углублений и чем они глубже, тем больше нефти может быть задержано льдом и тем меньше площадь растекания нефти.

Растекание нефти подо льдом происходит, в основном, под действием силы плавучести, поэтому доминирующей является фаза вязко–гравитационная (плавучесть), при которой сила вязкого сопротивления уравновешивается гравитационной. В модели

используется полуэмпирическое выражение для радиуса пятна нефти при постоянном объеме [Yapa and Chowdhury, 1990; Yapa and Belaskas, 1993; Fingas and Hollebone, 2003].

Как показали экспериментальные исследования, перемещение нефти относительно нижней поверхности льда начинается при достижении некоторого критического значения скорости течения воды относительно льда [Wadhams, 1976; Clark and Finley, 1982; Bobra and Fingas, 1986; Измайлов, 1988]. При скорости течения меньше критической нефть перемещается вместе со льдом.

Величина критической скорости является функцией плотности нефти, поверхностного натяжения нефть–вода, шероховатости льда и толщины нефтяного пятна. По результатам лабораторных экспериментов [Cox et al., 1980] при относительно гладкой поверхности льда критическую скорость можно рассчитать по уравнению [Liu and Leendertse, 1981]:

$$u_{cr} = 1.5 \times \left\{ 2 \times \left[\frac{\rho_o + \rho_w}{\rho_o \rho_w} \right] [\sigma_{o/w} g (\rho_w - \rho_o)]^{1/2} \right\}^{1/2},$$

где ρ_o – плотность нефти; ρ_w – плотность воды; $\sigma_{o/w}$ – поверхностное натяжение нефть–вода.

Когда критическое значение достигнуто, нефть начинает передвигаться относительно воды со скоростью [Cox et al., 1980; Liu and Leendertse, 1981]:

$$u_{oil} = u_{water} \left\{ 1 - \left[\frac{K}{0.115 F_\delta^2 + 1.105} \right]^{1/2} \right\},$$

где K – параметр усиления, который определяется экспериментально и зависит от шероховатости нижней поверхности льда ($K=1$ для гладкого льда и больше 1 для шероховатого льда). F_δ – параметр (денсиметрическое число Фруда), определяемый по формуле [Cox et al., 1980]:

$$F_\delta^2 = u_{water} \left\{ \frac{(\rho_w - \rho_o) g h_{oil}}{\rho_w} \right\}^{-1/2}.$$

Для определения параметра усиления (K) используются результаты расчета толщины льда. Производится расчет градиентов толщины льда в ближайших точках (по оси y аналогично):

$$h_{ice1} = h_{ice0} + u_{oil} \tau \frac{\partial h_{ice}}{\partial x}, \quad \delta h_{ice} = h_{ice1} - h_{ice0}$$

Принимается, что $K = 1$ при $-0.25 \leq \delta h_{ice} \leq 0.25$, т.е. лед считается ровным, если его толщина на расстоянии $u_{oil} \tau$ меняется не более, чем на 0.25 м [Wadhams et al., 1985]. При $\delta h_{ice} < -0.25$, $K = 0$ (нефть поднимается) и при $\delta h_{ice} > 0.25$, $K = 2$ (нефть опускается).

Внутриводное загрязнение нефтью. Основные причины внутриводного загрязнения нефтью:

- вертикальная дисперсия частиц нефти при обрушении ветровых волн, в результате чего образуется эмульсия типа «нефть в воде» и шлейф загрязнения в верхнем слое моря с возможной последующей адсорбцией капель нефти на взвешенных минеральных частицах. При слабых и умеренных ветрах вклад вертикальной дисперсии во внутриводное загрязнение достаточно мал, но в штормовых ситуациях, когда возрастает риск аварийных разливов, вклад вертикальной дисперсии значительно увеличивается.

- значительное увеличение плотности нефти при образовании эмульсий типа «вода в нефти», испарении легких фракций и под влиянием низких температур. При этом достаточно небольшого изменения температуры воды или выноса пятна нефти в зону с меньшей плотностью поверхности воды (прибрежная зона, зона влияния речного стока, прикромочная ледовая зона), чтобы нефть оказалась тяжелее воды и начала тонуть.

Очевидно, внутриводное загрязнение является одним из наиболее неблагоприятных в экологическом отношении, т.к. образуются обширные зоны с концентрацией нефтеуглеводородов во много раз превышающей ПДК. Эти зоны могут быть зафиксированы только прямыми методами измерений (взятием проб воды для определения концентрации нефтеуглеводородов), при этом дистанционные наблюдения с помощью ИСЗ покажут только очищение поверхности воды от нефти.

В толще воды нефтяное загрязнение переносится течениями и существенно зависит от процессов вертикального перемешивания и термохалинной структуры воды. В результате пространственной неоднородности плотности воды нефть может оседать на дно, образуя зоны донного загрязнения, или всплывать на поверхность воды, образуя зоны вторичного загрязнения поверхности моря.

Глубина погружения и концентрация загрязнения зависят от плотности, площади и массы затонувшей нефти и плотностной структуры воды. При длительном разливе нефти плотность данного объема нефти (спиллета) зависит от времени нахождения на поверхности воды. Благодаря пространственной изменчивости плотности поверхности воды, различные спиллеты могут погружаться в воду когда плотность данного спиллета будет превышать плотность воды на поверхности моря в данной точке, в результате может возникнуть множество очагов внутриводного загрязнения с различной плотностью нефти, которые, в зависимости от положения и мощности пикноклина, будут располагаться на разных глубинах.

В модели предполагается, что после формирования эмульсии «нефть в воде» часть капель нефти соединяется со взвешенными минеральными частицами, образуя нефтяные

агрегаты. В результате происходит увеличение плотности и погружение нефтяных агрегатов на глубину соответствующей плотности воды.

При разработке модельного блока расчета внутриводного распространения нефти предполагается, что концентрация нефти и расчет процессов распространения не зависят от состояния нефти в воде (коллоидный раствор, эмульсия, взвешенные капли и т.д.). Предполагается, что плотность и вязкость данной массы нефти не изменяется во времени. Предполагается также, что нефть, попавшая в воду под действием ветровых волн (эмульсия типа «нефть-в-воде») имеет плотность равную плотности воды в поверхностном слое в точке, где произошла дисперсия нефти.

Для расчета распространения нефтяного загрязнения в воде используется численное решение трехмерного уравнения адвекции и диффузии для вязкой примеси:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u_3 \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v_3 \frac{\partial \varphi}{\partial y} + (w_3 + w_c) \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\mu_w}{\mu_{oil}} \left[\frac{\partial}{\partial x} A_L \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_L \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] + \sum Q_{subm} + \sum q_{disp} + \sum q_{agr},$$

где u_3, v_3, w_3 – составляющие скорости течения на трехмерной сетке по осям x, y, z , соответственно; w_c – собственная гравитационная вертикальная скорость примеси; μ_w и μ_{oil} – вязкость воды и нефти; A_L и A_V – горизонтальный и вертикальный коэффициенты турбулентной диффузии; Q_{subm} и q_{disp} – мгновенные источники загрязнения за счет затопления и вертикальной дисперсии нефти в воду; q_{agr} – источник загрязнения за счет образования агрегатов нефти со взвешенными минеральными частицами.

Так как плотность и вязкость в разных очагах загрязнения могут быть различны и предполагается, что они остаются неизменными, уравнение адвекции и диффузии решается одновременно для концентрации углеводородов и производений концентрации на плотность и вязкость: $\varphi = \{C; C \cdot \rho; C \cdot \mu\}$.

Соответственно, выражения для источников также входят в уравнения в виде источника концентрации и соответствующих производений. Для уравнения относительно концентрации:

$$Q_{isubm} = \frac{m_i}{S_i dh \tau} \delta(t - t_{i0}) \text{ и } q_{idisp} = \frac{m_{idisp}}{S_i dh_{wave} \tau} \delta(t - t_{i0}) \text{ при } \rho_i \text{ и } \mu_i \text{ данного спиллета,}$$

$$q_{iagr} = \frac{m_{iagr}}{S_i dh_{agr} \tau} \delta(t - t_{i0}) \text{ при } \rho_{agr} \text{ и } \mu_i \text{ данного спиллета}$$

где m_i – масса затонувшего спиллета; m_{idisp} – масса нефти, вбитая волнами в воду; m_{iagr} – масса нефти, образовавшая агрегаты; S_i – площадь спиллета, пересчитанная в трехмерную

сетку; dh – толщина слоя воды с плотностью равной плотности затонувшей нефти; dh_{wave} – толщина поверхностного слоя волнового воздействия ($\sim 1.5 H_{wave}$); dh_{agr} – толщина слоя воды с плотностью равной плотности нефтяных агрегатов; τ – шаг по времени; δ – дельта-функция Дирака; t_{i0} – момент действия источника.

Таким образом, предполагается, что спиллет с плотностью, превышающей плотность поверхностного слоя воды, погружается в воду до глубины, где нефть имеет нейтральную плавучесть. При этом, концентрация нефти рассчитывается в зависимости от массы спиллета, его площади на поверхности воды на временном шаге, предшествующем моменту затопления, и толщины слоя воды с плотностью равной плотности нефти.

На верхней границе ($z = 0$) задается условие непротекания в общем случае или мгновенный поток нефтеуглеводородов в случае образования вторичного загрязнения поверхности воды:

$$A_v \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = 0 \text{ при } \rho_{oil} \geq \rho_{water}, z=0$$

$$A_v \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = \frac{C_i dh}{\tau} \Big|_{z=0} \delta(t - t_{i0}) = - \frac{m_i dh}{\Delta x_3 \Delta y_3 \Delta z \tau} \Big|_{z=0} \delta(t - t_{i0}) \text{ при } \rho_{oil} < \rho_{water}, z=0,$$

Где dh – толщина верхнего слоя, из которого масса загрязнения уходит на поверхность воды (принимается $dh = 1$ м).

Аналогично на нижней границе ($z = H$) задается условие непротекания в общем случае или мгновенный поток нефтеуглеводородов в случае осаждения загрязнения на дно:

$$A_v \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = 0 \text{ при } \rho_{oil} \leq \rho_{water}, z=H$$

$$A_v \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = \frac{C_i dh}{\tau} \Big|_{z=H} \delta(t - t_{i0}) = \frac{m_i dh}{\Delta x_3 \Delta y_3 \Delta z \tau} \Big|_{z=H} \delta(t - t_{i0}) \text{ при } \rho_{oil} > \rho_{water}, z=H,$$

Где dh – толщина нижнего слоя, из которого масса загрязнения оседает на дно (принимается $dh = 1$ м). После этого, отмечаются координаты места осаждения (переведенные в сеточные координаты по большой сетке) и масса нефти на дне.

Для численного решения адвективной части уравнения используется хорошо известная схема коррекции потоков FCT (flux-corrected transport), которая обладает наилучшими свойствами транспортности без искусственной численной вязкости [Флетчер, 1991; Kowalik and Murty, 1993].

Для расчета коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии используется схема Смагоринского [Haidvogel and Beckmann, 1999].

Для расчета коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии используется схема KPP (K-profile parameterization) [Large et al., 1994; Umlauf et al., 2005; Burchard et al., 2008]. При написании программного модуля использовался модифицированный модуль расчета KPP из пакета GOTM (версия 3.2) [Umlauf et al., 2005]. При расчетах добавлен учет влияния Стоксова переноса [Smyth et al., 2002] и наличие на верхней границе расчетной области дрейфующего льда или припая.

На каждом временном шаге (t) производится проверка условия сохранения массы:

$$\iiint_{\Omega} C(x, y, z) dx dy dz \Big|_0^t = \int_0^t (M_{subm} + M_{disp} - M_{sec} - M_{bot}) dt ,$$

Где Ω – расчетная область; $C(x, y, z)$ – концентрация нефтеуглеводородов в воде; M_{subm} – масса затонувшей нефти; M_{disp} – масса нефти, вбитая волнами в воду; M_{sec} – масса нефти, ушедшей в виде вторичного загрязнения; M_{bot} – масса нефти, осевшей на дно.

При этом проверка производится дважды - до расчета распределения внутриводного загрязнения и после него.

Список литературы.

- Бровченко И.А., Мадерич В.С. Численный лагранжевый метод моделирования распространения поверхностных пятен нефти. // Прикладна гідромеханіка, 2002. Том 4(76), No 4, с. 1-9.
- Измайлов В.В. Трансформация нефтяных пленок в системе океан–лед–атмосфера. Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана, т. 9, Л., Гидрометеиздат, 1988, – 145 с.
- Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. // Л.: Гидрометеиздат, 1986. 278 с.
- Ткалин А.В. Испарение нефтяных углеводородов из пленок на гладкой поверхности моря. // Океанология, 1986, т. 26, вып. 4, с. 628–630.
- Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. // Л., Гидрометеиздат, 1980, - 319 с.
- Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей // М., Мир, 1991, Т.2. – 552 с.
- ASCE. State of the art review of modeling transport and fate of oil spills. // J. of Hydraulic Engineering. 1996. Vol. 122, 11. P. 594-609.
- Belore R.C., Buist I.A. Modelling of oil spills in snow. // Proc. of the 11th Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar, 1988, Canada, pp. 9-29.
- Bobra A.M., Fingas M.F. The behaviour and fate of arctic oil spills. // Wat. Sci. Tech., 1986, Vol. 18, pp. 13-23.
- Burchard H., Craig P.D., Gemmrich J.R., van Haren H., Mathieu P.-P., Meier H.E.M., Smith W.A.M.N., Prandke H., Rippeth T.P., Skyllingstad E.D., Smyth W.D., Welsh D.J.S., Wijesekera

- H.W.* Observational and numerical modeling methods for quantifying coastal ocean turbulence and mixing. // *Progress in Oceanography*, Vol. 76, 2008, p. 399-442.
- Chen E.C., Overall C.K., Phillips C.R.* Spreading of crude oil on an ice surface // *Can. J. of Chemical Eng.* 1974. 52. P. 71-74.
- Clark R.C., Finley J.S.* Occurrence and impact of petroleum on Arctic environments. // In: *The Arctic Ocean. The hydrographic environment and the fate of pollutants* (Ed. L. Rey), 1982, *Comite Arctique Int.*, pp. 295-341.
- Cox J.C., Schultz L.A., Johnson R.P., Shelsby R.A.* The transport and behavior of oil spilled in and under sea ice. // *Arctec Incorporated for NOAA/OCSEAP, Research Unit 568, Final Report*, 1980, 170 p.
- Delvigne G.A.L., Swinney C.E.* Natural dispersion of oil // *Oil and Chemical Pollution*. 1988. 17. P. 281-310.
- Fay J.A., Hoult D.P.* Physical processes in the spread of oil on a water surface // *USCG Report AD-726 281*. Washington. D.C.. 1971.
- Fingas M.F., Hollebhone B.P.* Review of behaviour of oil in freezing environments. // *Marine Pollution Bull.* 2003. Vol. 47. p. 333-340.
- Fingas M., Fieldhouse B., Mullin J.* Water-in-oil emulsion results of formation studies and applicability to oil spill modeling // *Spill Science and Technology Bulletin*. 1999. Vol.5. No 1. P. 81-91.
- Haidvogel D.B., Beckmann A.* Numerical ocean circulation modeling. // *Series on Environmental Science and Management*, Vol. 2. Imperial College Press, 1999. 318 p.
- Kowalik Z., Murty T.S.* Numerical modeling of ocean dynamics.// *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 5. World Scientific Publ., 1993. 481 p.
- Large W.C., McWilliams J.C., Doney S.C.* Ocean vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization.// *Reviews of Geophysics*, 32, 4, 1994, p. 363-403.
- Liu S.K., Leendertse J.J.* A 3-D oil spill model with and without ice cover. // In: *Mechanics of oil slicks*. Association amical des ingenieurs and international association for hydraulic research, Paris, 1981, pp. 249-265.
- Mackay D., Buist I., Mascarenhas R., Paterson, S.* Oil spill processes and models // *Environment Canada Report No EE-8*. Ottawa. Ontario. 1980.
- Miranda R., Brauschweig F., Leitao P., Neves R., Martins F., Santos, A.* MOHID 2000, a coastal integrated object oriented model // *Hydraulic Engineering Software VIII*, WIT Press. 2000. 480 p
- Quiroga, F.O.B., Perez A.P. and Valdes A.R.* Mass loss evaluation in oil spill. // *Proc. of 21st Int. Conf. on Offshore Mechanics*, June 23-28, 2002, Oslo, Norway, OMAE2002-28168.

- Rasmussen D.* Oil spill modeling – a tool for cleanup operations. // Proc. of Oil Spill Conf., American Petroleum Institute, 1985, pp 243-249.
- Reed M.* The physical fates component of the natural resource damage assessment model system // Oil and Chemical Pollution. 1989. 5. P. 99-123.
- Reed M., Johansen O., Brandvik P.J., Daling P., Lewis A., Fiocco R., Mackay D., Prentki R.* Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art // Spill Science and Technology Bulletin. 1999. 5. No 1. P. 3-16.
- Reed M., Aamo O.M.* Real time oil spill forecasting during an experimental oil spill in the Arctic ice // Spill science and Technology Bulletin. 1994. 1. No 1. P. 69-77.
- Samuels W.B., Huang N.E., Amstutz D.E.* An oil spill trajectory analysis model with a variable wind deflection angle. // Ocean Engineering, Vol. 9, 1982, pp 347-360.
- Smyth W.D., Skyllingstad E.D., Crawford G.B., Wijesekera H.* Nonlocal fluxes and Stokes drift effects in the K-profile parameterization. // Ocean Dynamics, Vol. 52, 2002. p. 104-115.
- Umlauf L., Burchard H., Bolding K.* GOTM. Sourcecode and test case documentation. Version 3.2. // www.gotm.net, 2005. – 231 p.
- Venkatesh S., El-Tahan H., Comfort G., Abdelnour R.* Modelling the behaviour of oil spills in ice-infested waters // Atmosphere- Ocean, 1990. vol. 28, No 3. P. 303-329.
- Wadhams P.* Sea ice topography in the Beaufort Sea and its effect on oil containment. // AIDJEX Bull., 1976, № 33, pp. 1-52.
- Wadhams P., McLaren A.S., Weintraub R.* Ice thickness distribution in Davis Strait in February from submarine sonar profiles. // J. of Geophys. Res., 1985, Vol. 90, № C1, pp. 1069-1077.
- Wang K., Lepparanta M., Gastgifvars M., Vainio J., Wang C.* The drift and spreading of the Runner 4 oil spill and the ice conditions in the Gulf of Finland, winter 2006/ // Estonian J. of Earth Sciences, 2008. vol. 57, No 3. P.181-191.
- Weerasuriya S.A., Yapa P.D.* Unidirectional spreading of oil under solid ice. // Can. J. Civ. Eng., 1993, Vol. 20, № 1, pp. 50-56.
- Xie H., Yapa P.D., Nakata K.* Modeling emulsification after an oil spill in the sea // J. of Marine Systems, 2007. vol. 68, pp. 489-506.
- Yapa P.D., Belaskas D.P.* Radial spreading of oil under and over broken ice: an experimental study. // Can. J. Civ. Eng., 1993, Vol. 20, № 6, pp. 910-922.
- Yapa P.D., Chowdhury T.* Spreading of oil under ice // J. Hydraul. Eng. 1990. Vol. 116. No 12. P. 1468-1483.