

УДК 621.221+627.81.502.65.4/656

В.А.Броже, асп. каф. МВТС

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТИ В РАЗБИТОМ ЛЬДУ

В связи с продвижением нефтедобывающей промышленности в арктические регионы, в последнее время возросла опасность разлива нефти в водах, покрытых разбитым льдом. Теоретическое моделирование подобных разливов позволяет улучшить работы, связанные с уборкой нефти, а также спрогнозировать возможные последствия разлива.

Существует большое число различных подходов к описанию процесса распространения нефтяного пятна в разбитом льду.

Например, Фри в 1981 предложил следующее уравнение:

$$\frac{q^2}{gb^3} = K_3 \left(\frac{\delta}{b}\right)^{K_4}.$$

Таким образом, протекание нефти между льдинами на единицу ширины потока (q) описывается как функция толщины нефтяного пятна (δ) и средней ширины зазора между льдинами (b). K_3 и K_4 – эмпирические коэффициенты.

Это очень упрощённая модель, не учитывающая вязкость нефти, свойства и форму льдин и т.д.

Позднее, Росс и Дикинс в 1987 предложили более полную модель. Они модифицировали модель, предложенную Фэйем и Холтом в 1971, внося параметры, учитывающие вязкость нефти и концентрацию льда. Они предложили следующие уравнения для инерционной, вязкой стадии и стадии поверхностного натяжения:

$$\begin{aligned} A &= 4.1(\Delta g V t^2)^{1/2}, \\ A &= 6.6(\Delta g V^2 t^{3/2} \rho / \mu^{1/2})^{1/3}, \\ A &= 16.6(\sigma^2 t / \rho \mu)^{1/2}, \end{aligned}$$

где σ – коэффициент растекания или поверхностное натяжение; V – объём разлитой нефти; t – время; μ – кинематическая вязкость воды; Δ – отношение разности между плотностью воды и нефти к плотности воды. Происхождение постоянных не указано.

Конечное состояние растекания описано следующим уравнением:

$$A_{\mu} = \left(\frac{\mu_o}{\mu}\right)^{-0.15} (1 - f_l) A,$$

где A – площадь пятна, рассчитанная по уравнениям, приведённым выше; $(1 - f_l)$ – коэффициент, показывающий концентрацию нефти находящейся между льдинами; f_l – коэффициент, показывающий концентрацию льда.

Авторы считают, что нефть распространяется только между льдинами и не попадает на их поверхность. Кроме того, они вводят параметр $\left(\frac{\mu_o}{\mu}\right)^{-0.15}$, учитывающий вязкость нефти.

Эта теория основана на предположении, что стадия распространения нефти за счёт поверхностного натяжения не имеет важного значения для нефтяного пятна, распространяющегося в разбитом льду. Надо заметить, что такое предположение совершенно не верно для ситуации, когда нефть распространяется в шуге.

Кроме того, авторы не объяснили происхождение коэффициентов описанных выше, хо-

тя упомянули, что они были приняты на основе экспериментальных исследований.

Зацепа в 1992 предложил следующие уравнения, описывающие процесс растекания нефти:

$$\rho_o(1-S)(H\bar{u}_i + (\bar{u}\nabla)\bar{u}) = -g'\nabla H - B_1(\bar{u} - (\bar{u}_d + \bar{u}_T)) - B_2(\bar{u} - \bar{u}_i);$$

$$H_i + \nabla \bullet (H\bar{u}) + \frac{HS}{1-S} \nabla \bullet (H\bar{u}_i) = -\frac{(k_1 + k_2)}{\rho_o} F_s(S) + \frac{Q}{\rho_o(1-S)},$$

где S – концентрация льда; u_i – скорость дрейфа льда; $F_s(S)$ – коэффициент, описывающий влияние концентрации льда на процессы тепло/энерго-обмена между средами; k_1 – коэффициент переноса массы при взаимодействии нефти и льда; k_2 – коэффициент переноса массы за счёт испарения; u – скорость распространения нефти; $H(x, u, z)$ – толщина нефтяной плёнки; $g' = g(\rho_w - \rho_o)/\rho_w$, ρ_w – плотность воды; ρ_o – плотность нефти; k – коэффициент переноса массы; u_d – вектор скорости течения воды на поверхности или скорость дрейфа льда; u_i – вектор скорости приливного течения; $\nabla \bullet$ – оператор дивергенции; ∇ – оператор градиента.

В первом приближении:

$$B_1 \propto \beta_1 (1 - S) \text{ и } B_2 \propto \beta_2 S/d,$$

где d – средний линейный размер льдин; β_1 и β_2 эмпирические коэффициенты, связанные с формой льдин, типом взаимодействия нефти и льда и т.д.

Как видно из уравнения, динамика нефти связана со свойствами и динамикой льда.

Модель Зацепы представляет собой чисто математическое описание процесса, не подтверждённое экспериментальными исследованиями. Однако, такой подход позволяет использовать одно уравнение для описания различных типов растекания как например растекание нефти на- и подо- льдом, путём изменения характеристик среды.

Все описанные модели не могут давать 100% точность моделирования ввиду сложности поставленной задачи, а, кроме того, в сложности точного описания начальных условий, как-то: начальное распределение нефти между льдинами, процентное содержание шуги в ледовом поле, размер и форма льдин, а так же характер их взаимодействия с нефтяным пятном. Динамика ледяного поля также имеет огромное влияние на распространение нефти.

Не достаточно подробно исследовано поведение нефти при наличии шуги, а также её взаимодействие с растущим льдом и влияние соляного раствора, выделяемого растущим льдом, на изменение свойств нефти. Тот факт, что часть нефти может вмержать в лёд, так же редко учитывается при моделировании.

Кроме того, во всех существующих моделях уделяется мало внимания изменениям свойств нефти, хотя в арктических условиях, где нефть может становиться квази-твёрдой и терять текучесть, этот фактор может иметь важное значение.

Необходимо проводить дальнейшие лабораторные и натурные исследования, чтобы иметь возможность более точно описывать процесс взаимодействия нефти и льда и улучшить существующие способы моделирования растекания нефти.