

УДК 532.543

А.А.Гиргидов (асп., каф. МВТС)

УЧЕТ РЕЛЬЕФА НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА ПРИ РАСЧЕТЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО РАСТЕКАНИЯ НЕФТЯНОГО ПЯТНА ПОДО ЛЬДОМ

Активное освоение нефтяных месторождений на российском арктическом шельфе и транспортировка нефти и нефтепродуктов по воде в зимний период, увеличивают риски аварий в акваториях с последующими выбросами нефти в подледное пространство. Последствия таких выбросов особенно опасны труднопредсказуемым поведением нефтяного пятна. Прогнозирование распространения нефти дополнительно осложняют изменения, происходящие с ней в холодных условиях – изменение вязкости, плотности и др. свойств.

Нами была предложена модель [1], одна из модификаций которой позволяет рассчитать осесимметричное растекание нефтяного пятна, как единого объема, под действием силы тяжести и силы поверхностного натяжения. Для записи законов сохранения мы разбили объем нефти на внутреннюю и фронтальную области. Во внутренней области мы выделили контрольный объем и записали для него закон сохранения массы и баланса количества движения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(v_r h)}{\partial r} &= \frac{v_r h}{r}; \\ \frac{\partial(v_r h)}{\partial t} + 1.2 \frac{\partial(u_r^2 h)}{\partial r} + \rho_r g h \frac{\partial h}{\partial r} &= -v_o \frac{3v_r}{h} - \rho_r g h S, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $h = h(x_1, t)$ – толщина нефтяного пятна; t – время; $v_r = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 u_r dx_3$ – осредненная по вертикали горизонтальная скорость; r – радиус рассматриваемого пятна нефти при осесимметричном растекании; v_o – кинематическая вязкость нефти; S – радиальный уклон нижней поверхности льда. Граничные условия на фронте пятна записываются для отдельно выделенного фронтального элемента в лагранжевых переменных:

$$\left. \begin{aligned} \rho_o \Delta \Psi_n &= 0; \\ \rho_o \Psi_n \frac{\partial V_r}{\partial t} &= (\rho_w - \rho_o) g \frac{h^2}{2} - 3\eta_{o\phi p} \frac{V_r}{h} \Delta r - \sigma, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\Delta \Psi_n$ – объем нефти, содержащийся в граничном элементе с порядковым номером n на последнем шаге по времени; V_r – средняя по объему граничного элемента лагранжева скорость; $\eta_{o\phi p}$ – виртуальный коэффициент вязкости фронтального элемента, зависящий

от вязкости нефти или нефтепродукта. Значение отношения $K = \frac{\eta_{o\phi p}}{\eta_o}$ является экспериментальной константой.

Калибровка модели проводилась на экспериментальных данных Уара [3]. Расчеты показали, что скорость фронта на начальном этапе значительно превышает значения, которые наблюдались в эксперименте. Как видно из второго уравнения системы уравнений (2), на начальном этапе растекания силой, способствующей растеканию,

является сила давления $F_p = (\rho_w - \rho_o)g \frac{h^2}{2}$, которой препятствует сила трения нефти о лед

$F_{ice} = 3\eta_{офр} \frac{V_r}{h} \Delta r$. Последовательно увеличивая значение $\eta_{офр}$ от $1 \cdot \eta_o$ до $35 \cdot \eta_o$ мы

определили, что при значении отношения $K = \frac{\eta_{офр}}{\eta_o} = 35$ получается наилучшее

совпадение с экспериментальными данными. Это значение было принято при последующих расчетах.

Верификация модели проводилась с данными натурального эксперимента группы под руководством А.И. Альхименко [2]. Эксперимент проводился в Финском заливе Балтийского моря на объеме нефти, позволяющем учесть масштабный фактор.

Расчеты велись явным четырех-точечным методом конечных разностей и показали, что введение функции S существенно влияет на устойчивость численной схемы. Для устойчивости фронтального элемента шаг по времени пришлось уменьшить в сотни раз по сравнению с расчетами задач без уклона нижней поверхности льда. В результате расчетов были получены значения скорости фронта пятна близкие к натурным (Табл. 1).

Таблица 1

Сопоставление результатов

	Объем нефти, л	Скорость движения фронта пятна на начальном этапе, м/с
Эксперимент группы А.И.Альхименко [2]	200	$5.5 \cdot 10^{-3}$
Расчет по предложенной модели	200	Уменьшается от $6.5 \cdot 10^{-3}$ до $4.5 \cdot 10^{-3}$

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гиргидов, А.А. *Математическая модель распространения нефти под сплошным ледяным покровом, Безопасность водного транспорта, Санкт-Петербург, 10-12 сентября, 2003, (в печати).*

2. Alhimenko, A., Bolshev, A., Yakovlev, A., Klevanny, K., Liukkonen, S. Modeling oil pollution under ice cover. The International Offshore and Polar Engineers Vol. II, 594-601.

3. Yapa, D., Choudhury, T. Spreading of oil spilled under ice. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 116, No. 12, 1468-1483.