

ДИНАМИКА УДАРА НЕФТЯНОЙ КАПЛИ ПО ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

По ряду объективных и субъективных причин транспортировка нефти сопряжена с риском аварийных выбросов нефти. При математическом моделировании распространения нефтяных загрязнений на водных объектах, покрытых льдом, одной из решаемых задач будет определение характера взаимодействия нефтяных капель, выпускаемых подводным участком трубопровода, в случае нарушения его герметичности, с внутренней поверхностью ледяного покрова.

Для оценки максимального давления на пятне контакта может быть использовано приближенное выражение, основанное на теории одномерного гидравлического удара. При этом вводятся поправочные коэффициенты, позволяющие учитывать те или иные экспериментальные данные. Таким образом, давление можно представить в виде [1]:

$$p = a \cdot \rho_n \cdot v_n \cdot c_n \quad (1)$$

где ρ_n - плотность нефти;

v_n - нормальная скорость соударения;

$a < 1$ - поправочный коэффициент;

c_n - скорость распространения ударной волны в нефти.

Как известно, скорость распространения ударной волны в жидкости (скорость звука) может быть найдена по формуле:

$$c_n = \sqrt{\frac{E_n}{\rho_n}}, \quad (2)$$

где E_n - модуль объемной упругости нефти.

Однако, т.к. формула (1) не учитывает объем сферической формы частицы, и жидкость (нефть) принимается идеально упругой, она лишь приблизительно выражает характер

распределения давления в области контакта частицы нефти с поверхностью льда (при этом лед принимается как неупругая поверхность, $\alpha = 1$). Формула (1) аналогична формуле, еще полученной Жуковским 1898 г. [2].

В различных работах ставилась задача уточнения данной формулы, в частности в [3], [4], т.к. многочисленные экспериментальные данные [1], [3] свидетельствуют о том, что величина зоны деформации и скорость перемещения капли (v_n) могут значительно отличаться от теоретических.

Нами рассматривается задача оценки влияния такого свойства нефти, как поверхностное натяжение, на величину давления капли нефти на внутреннюю поверхность льда. Поскольку физические свойства всех трех составляющих трехфазной системы вода-нефть-лед зависят от температуры, целесообразно рассматривать систему при температуре $t = 0-4$ °C - приближенная температура воды под ледяным покровом.

На границе раздела двух сред - вода-нефть давление, обусловленное поверхностным натяжением, может быть определено из уравнения Лапласа:

$$\Delta p = p^* - p_g = \sigma \cdot (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}), \quad (3)$$

где R_1 и R_2 - главные радиусы кривизны.

Если приближенно считать каплю нефти сферической, то можно принять, что $R_1 = R_2 = R$, тогда:

$$\Delta p = 2\sigma/R = 2\sigma/r, \quad \text{Н/м}^2, \quad (4)$$

где r - радиус капли, σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред - вода-нефть может быть принят равным $\sigma = 44 \cdot 10^{-3}$ Н/м [7]. Поправка при изменении температуры системы может быть ориентировочно определена исходя из условия [8, 2]: $\sigma_t = \sigma_0 - a \cdot t$, где a и σ_0 - 10^{-4} Н/м-°C - поправочный коэффициент; t - относительное изменение температуры, °C; σ_0 - поверхностное натяжение при температуре 0 °C, Н/м.

ВВЕДЕНИЕ

Итак, согласно уравнению (4), с учетом $\sigma = 44 \cdot 10^{-3}$ Н/м:

$$\Gamma_p = 88 \cdot 10^{-3} / \Gamma_n, \text{ Н/м}^2.$$

Скорость соударения капли нефти с поверхностью льда (скорость всплытия) v_n можно определить по формуле Стокса [6]:

$$v_n = \frac{JL \cdot \Delta \rho}{18 \mu} \quad (5)$$

где d - диаметр капли нефти, м; ρ_n - плотность воды и нефти, кг/м³; μ - динамическая вязкость воды, Пас; $g = 9,81$ м/с².

При расчетах для водотоков, в случае небольших скоростей течения водотоков, скорость течения не учитывается. Таким образом, например, для капли нефти диаметром $d = 1$ мм (0,001 м), плотности воды и нефти соответственно $\rho_n = 1000$ кг/м³, $\rho_n = 870$ кг/м³ и динамической вязкости воды (при $t = 4$ °C) $\mu = 0,0016$ Пас [2] расчетная скорость соударения с нижней поверхностью льда $v_n = 0,04$ м/с.

Исходя из вышеизложенных рассуждений, влияние поверхностного натяжения на величину давления капли на нижнюю поверхность льда можно определить как отношение

$$\begin{aligned} \Delta p/p &= (2a/r)/(a \cdot \rho_n \cdot v_n \cdot c_n) \\ &\text{или} \\ \Delta p/p &= (88 \cdot 10^{-3} / \Gamma_n) / (a \cdot \rho_n \cdot v_n \cdot c_n). \end{aligned} \quad (6)$$

Расчетное значение a - коэффициента, который учитывает "неупругость" жидкости, дается в ряде работ Перельмана, в частности [1], «можно приближенно рассчитать по формуле [2]:

$$a = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{3}{E_n}}} \quad (7)$$

Если принять среднее значение модуля упругости нефти $E_n \ll 0,14 \cdot 10^{10}$ Па и модуля упругости льда $E_n \cdot 0,28 \cdot 10^{10}$ Па [5],

то $a \approx 0,8$. Модуль объемной упругости каждой из фаз; системы может изменяться в широких пределах в зависимости от давления и температуры. Соответственно коэффициент "неупругости" a может равняться $0,7$ ($E_s = E$), а в идеальном случае, если лед считать абсолютно неупругой поверхностью ($E_s \rightarrow \infty$), то a для нефти будет стремиться к 1. Таким образом, целесообразно рассматривать зависимость $\Delta p/p = J(a)$ в интервале от $0,6 \leq a \leq 1$.

Размеры капель нефти могут быть различными, зависящими от многих условий. Представляет интерес, с нашей точки зрения, рассмотреть зависимость $\Delta p/p = J(a)$ для минимально возможных размеров капель нефти, встречающихся в практике. На рис. 1 представлена зависимость $\Delta p/p = J(a)$ в интервале от $0,6 \leq a \leq 1$ для капель нефти, имеющих диаметр от 150 до 450 мкм (0,00015-0,00045 м).

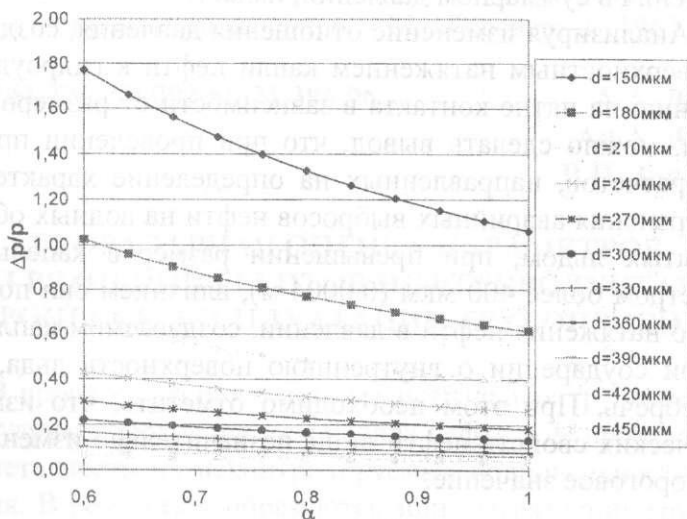


Рис. 1. Отношение давления, создаваемого поверхностным натяжением нефти, к гидроударному давлению на пятне контакта в зависимости от коэффициента a

Скорость соударения капель нефти с внутренней поверхностью льда в указанном диапазоне различна и является квадратичной функцией от размера (диаметра) всплывающей капли нефти. Численные значения, характеризующие физические свойства фаз вода-нефть принимались такими же как в примере к формуле (4). При этом скорость распространения ударной волны c , рассчитывалась по формуле (2) и принималась равной $1,26 \cdot 10^3$ м/с для модуля объемной упругости нефти $E_n \ll 0,14 \cdot 10^{10}$ Па.

Очевидно, что у капли нефти имеющей диаметр более 180 мкм (0,00018 м), что соответствует скорости всплытия частицы нефти $v_n = 0,0014$ м/с, в суммарном давлении, возникающем при соударении капли нефти со льдом, давление, создаваемое силами поверхностного натяжения, составляет уже менее половины. В дальнейшем, при увеличении размеров частиц всплывающей нефти и, соответственно, их скорости всплытия, доля давления, создаваемая силами поверхностного натяжения в суммарном давлении, падает.

Анализируя изменение отношения давления, создаваемого поверхностным натяжением капли нефти к гидроударному давлению на пятне контакта в зависимости от размеров капли нефти, можно сделать вывод, что при проведении практических расчетов, направленных на определение характера распространения аварийных выбросов нефти на водных объектах, покрытых льдом, при превышении размеров капель нефти диаметром более 400 мкм (0,0004 м), влиянием сил поверхностного натяжения нефти в давлении, создаваемом каплей нефти при соударении о внутреннюю поверхность льда, можно пренебречь. При этом необходимо отметить, что изменение физических свойств нефти лишь незначительно изменяет данное пороговое значение.

Литература

1. Перельман Р.Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. - М: «Машиностроение», 1980.

2. Альтшуль А.Д. Примеры расчетов по гидравлике. - М: Стройиздат, 1977.

3. Перельман Р.Г. О расчете давлений при соударении капли с плоскостью. - «Известия вузов», Машиностроение, 1968.- №7. - С. 85-90.

4. Годунов С.К., Забродин А.В., Прокопович Г.М. Разностная схема для двухмерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной. - ЖВМ и МФ, 1961, т. 1. - №6. - С. 1020-1050.

5. Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.М. Справочник по гидравлике. - Киев: "ВШ", 1984.

6. Жуков А.И., Карелин Я.А., Колобанов С.К. Канализация. - М., 1969.

7. Хасанов И.Ю., Ракаев К.М. Исследование процесса удержания нефтяного пятна на воде. - М.: Нефтяное хозяйство, № 3. - 1996. - С. 52-54.

8. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. - М: «Госэнерго», 1962.