

УДК 532.5; 551.326.3; 628.394
DOI: 10.15372/PMTF202215112

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕФТИ С МОРСКИМ ЛЕДОВЫМ ПОКРОВОМ

В. К. Гончаров

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vkgonch@mail.ru

С использованием методов физической и коллоидной химии рассмотрены капиллярные эффекты на границах нефть — лед — атмосфера и нефть — лед — вода и показано, что при наличии этих эффектов ограничивается растекание нефти по поверхности льда в отличие от водной поверхности. Получены формулы для определения предельных толщин нефтяной пленки, которые можно использовать для оценки пространственных масштабов нефтяного загрязнения сплошного ледового покрова.

Ключевые слова: ледовый покров, вода, атмосфера, нефть, растекание, поверхностное натяжение, моделирование, прогнозирование

Введение. Теоретические и экспериментальные исследования процесса разлива нефти в ледовых условиях начались в 80-х гг. XX в. [1, 2]. Результаты этих исследований дали возможность построить математические модели растекания нефти по поверхности воды среди дрейфующего льда, по его поверхности и под ней и разработать программное обеспечение для прогнозирования аварийного разлива нефти в ледовых условиях. Однако практическое применение существующего программного обеспечения в условиях арктических морей является проблематичным вследствие многообразия форм ледового покрова и специфических климатических условий [3].

Стационарный ледовый покров из однолетних и двухлетних льдов толщиной более 1 м со сплоченностью 9 ÷ 10 баллов и припай покрывают акватории арктических морей с октября по июль. Чрезвычайно низкие температуры воздуха, достигающие $-30 \div -50$ °С, приводят к быстрому замерзанию ледовых каналов за судами. В результате сплошной ледовый покров на судоходных трассах и в акваториях нефтедобывающих платформ и терминалов существует в течение более полугода. Ледовая навигация осуществляется по трассам в обход полей торошения льдов и массивов многолетних льдов. Вследствие этого при прогнозировании масштабов загрязнения ледового покрова в случае аварийных разливов нефти, транспортируемой танкерами, следует учитывать, в первую очередь, наличие сплошного и ровного ледового покрова.

В данном случае интенсивность процесса растекания нефти и масштабы загрязнения определяются в основном капиллярными эффектами взаимодействия нефти со льдом

Работа выполнена в рамках проекта SIMREC “Тренажеры для усовершенствования черезграничной ликвидации разливов нефти в экстремальных условиях”, финансируемого ЕС, РФ и Республикой Финляндия.

в воздушной и водной средах. Результаты экспериментального исследования этих эффектов [4, 5] показали, что растеканию нефти по поверхности льда и под ней препятствует несмачиваемость льда нефтью, в то время как на поверхности воды величина краевого угла нефтяной пленки близка к 0° , поэтому пленка нефти растекается по поверхности воды, достигая толщины в несколько микрометров. Явление несмачиваемости льда нефтью использовалось ранее для оценки размеров нефтяной пленки и возможностей дистанционного обнаружения нефтяного загрязнения под сплошным ледовым покровом [6].

Предметом аналитического исследования, результаты которого представлены в настоящей работе, являются капиллярные эффекты на границах раздела нефть — лед в воздушной и водной средах, которые ограничивают растекание нефти по поверхности льда и определяют тем самым асимптотическую толщину пленки. Это дает возможность оценить размеры в горизонтальном направлении нефтяной пленки и как следствие масштабы нефтяного загрязнения льда в зависимости от физических свойств нефти и объема разлива с использованием известных результатов исследования закономерностей течения нефти по поверхности льда на границах с воздушной и водной средами [2]. Построены аналитические зависимости, дающие возможность оценить временные и пространственные масштабы загрязнения при разливах нефти на поверхности сплошного ровного ледового поля и под ней.

1. Ледовый покров. Ледовый покров морей представляет собой сложную многофазную структуру, физические свойства которой зависят от многих факторов (свойств и кристаллической структуры льда, характеристик прилегающих к нему воздушной и водной сред, географического расположения акватории [7, 8]). Взаимодействие ледового покрова с разлившейся нефтью во многом определяется физическими свойствами его верхней и нижней поверхностей. Эти свойства формируются под воздействием потока тепла из водной среды в атмосферу, величина которого определяется разностью температур воды и воздуха и теплом, выделяемым при кристаллизации льда. Поэтому температура верхней границы льда “следит” за температурой воздуха, а температура нижней границы не меняется и равна температуре замерзания морской воды [9].

При отсутствии последствий торошения льда шероховатость верхней поверхности определяется размерами заполненных воздухом пор, появляющихся при стекании капель рассола по мере подъема верхней поверхности льда над равновесным уровнем моря, и выделившимися при кристаллизации растворенными в воде газами [10]. Суммарный объем пор не превышает 5 %, а находящаяся над уровнем воды часть их объема соответственно не превышает 0,5 %. Шероховатость нижней поверхности льда определяется поперечными размерами кристаллов льда (“ледяных волокон”), которые имеют толщину $0,5 \div 2,5$ мм [7] и разделены пленкой рассола. Поэтому шероховатостью поверхности льда и прониканием (инфильтрацией) нефти в толщу льда при решении задачи о формировании нефтяной пленки можно пренебречь.

Для рассматриваемой задачи ледовый покров целесообразно представить в виде плоской гладкой пластины, верхняя и нижняя поверхности которой имеют постоянную температуру, равную температуре примыкающих к ним сред — воздуха и воды. Влияние снежного покрова, ветра и течения на рассматриваемый процесс в данной работе не учитывается.

2. Формирование нефтяной пленки на поверхности льда. Особенностью взаимодействия нефти с поверхностью льда (в отличие от поверхности воды) является несмачиваемость льда нефтью как в воздухе, так и в водной среде [4, 5]. Этот эффект характеризуется величиной контактного угла: на поверхности льда $0^\circ < \theta_u < 90^\circ$, на границе раздела с водной средой $90^\circ < \theta_d < 180^\circ$.

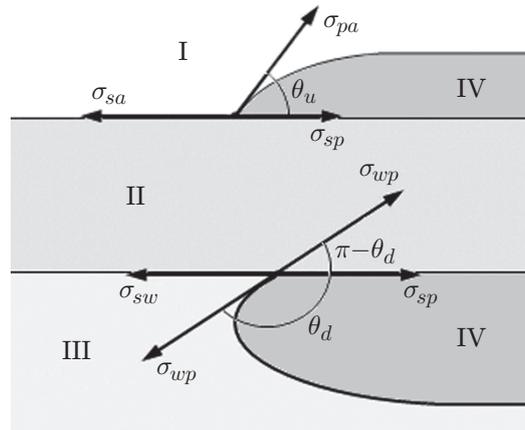


Рис. 1. Схема взаимодействия нефти со льдом:
I — воздух, II — лед, III — вода, IV — нефть

Толщина нефтяной пленки на поверхности льда определяется балансом силы поверхностного натяжения, удерживающей пленку от растекания, и силы тяжести, которая, сжимающая пленку, способствует увеличению ее поперечного размера. Схема сил, действующих в зоне контакта нефти и льда, показана на рис. 1.

Равновесная форма пленки определяется балансом сил поверхностного натяжения, который, в свою очередь, определяется уравнением Юнга [11, 12]

$$\cos \theta_u = \frac{\sigma_{sa} - \sigma_{sp}}{\sigma_{pa}}, \quad (1)$$

где σ_{sa} , σ_{sp} , σ_{pa} — коэффициенты поверхностного натяжения на границах лед — воздух, лед — нефть и нефть — воздух соответственно. Величина σ_{pa} — известное табличное значение, которое приводится в справочниках. Для решения задачи необходимо оценить величину σ_{sa} — поверхностное натяжение на границе лед (твердое тело) — атмосфера (газ). С использованием (1) эта константа определяется из условия равновесия пленки:

$$\sigma_{sa} = \sigma_{sp} + \sigma_{pa} \cos \theta_u. \quad (2)$$

В выражении (2) величина $\sigma_{sa} = \text{const}$, а все величины в правой части являются характеристиками некоторой жидкости (в рассматриваемом случае — нефти). Определить величины поверхностного натяжения на границах твердого тела с газом и с жидкостью не представляется возможным [11]. Можно предположить, что для каждой жидкости должно существовать собственное сочетание величин σ_{sp} , σ_{pa} , θ_u , определяемое формулой (2) и одинаковое для всех жидкостей (нефтей) при единственном значении σ_{sa} . Соответственно поверхностное натяжение на границе твердое тело — газ не зависит от того, какая жидкость растекается по поверхности. Из соотношения (2) также следует, что во всех случаях $\sigma_{sa} > \sigma_{sp}$, т. е. поверхностное натяжение на границе лед — воздух всегда больше, чем на границе лед — нефть, так как $0^\circ < \theta_u < 90^\circ$, $\cos \theta_u > 0$.

Можно предположить, что при взаимодействии нефти и поверхности льда максимальным из возможных значений поверхностного натяжения σ_{sp} является величина σ_{pa} , поскольку у всех жидкостей поверхностное натяжение на границе с воздухом максимально [11], и, следовательно, на границе с твердым телом оно будет меньше. Это дает следующую оценку “сверху”:

$$\sigma_{sa} \leq \sigma_{pa} + \sigma_{pa} \cos \theta_u = \sigma_{pa} (1 + \cos \theta_u). \quad (3)$$

Оценка величины σ_{sa} может быть построена также на основе правила Антонова [11], в соответствии с которым “поверхностное межфазовое натяжение на границе двух взаимно ограниченно растворимых жидкостей равно разности поверхностных натяжений взаимно насыщенных растворов обеих жидкостей на их границе с воздухом”. Применяя это правило к рассматриваемой границе льда с нефтью, находим

$$\sigma_{sp} = \sigma_{pa} - \sigma_{sa}. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в (2), получаем

$$\sigma_{sp} = \sigma_{pa}(1 - \cos \theta_u)/2. \quad (5)$$

Данная оценка дает в два раза меньшее значение коэффициента σ_{sa} поверхностного натяжения на границе лед — атмосфера, чем его максимально возможное значение, полученное по формуле (3). Можно предположить, что оценка (5) дает минимально возможное значение σ_{sa} . Следовательно, выполняется неравенство

$$\sigma_{pa}(1 + \cos \theta_u) \geq \sigma_{sa} \geq \sigma_{pa}(1 - \cos \theta_u)/2.$$

Далее для определения коэффициента поверхностного натяжения на границе лед — воздух целесообразно использовать одно и то же выражение с корректирующим эмпирическим коэффициентом $0,5 \leq \omega < 1,0$. Этот корректирующий коэффициент может зависеть от физических свойств поверхности льда и ее формы (шероховатости), поэтому для оценки его значения необходимы специальные экспериментальные исследования. Априори можно полагать, что его значение ближе к определяемому правилом Антонова значению $\omega = 0,5$. Далее будем использовать выражение

$$\sigma_{sa} = \omega \sigma_{pa}(1 + \cos \theta_u).$$

Коэффициент поверхностного натяжения на границе лед — нефть находим из следующего выражения:

$$\sigma_{sp} = \sigma_{pa}[1 - \omega(1 + \cos \theta_u)]. \quad (6)$$

Толщину нефтяной пленки можно определить, полагая, что она имеет практически плоскую поверхность и значительно (на порядки) превышающие толщину горизонтальные размеры. В этом случае гидростатическое давление на единицу протяженности боковой поверхности пленки [13] определяется весом нефти:

$$P_{on} = \gamma_p h_{on}^2/2. \quad (7)$$

Здесь h_{on} — толщина пленки нефти на поверхности льда; γ_p — плотность нефти. Приравняв (6), (7), можно определить толщину пленки

$$h_{on} = \sqrt{2\sigma_{pa}[1 - \omega(1 + \cos \theta_u)]/\gamma_p}. \quad (8)$$

Из соотношения (8) следует, что толщина нефтяной пленки на поверхности льда зависит от величины контактного угла θ_u , определить которую можно только экспериментальным путем.

На рис. 2 показана зависимость толщины нефтяной пленки на поверхности льда от величины контактного угла θ_u для двух значений плотности нефти $\gamma_{p1} = 870 \text{ кг/м}^3$ и $\gamma_{p2} = 930 \text{ кг/м}^3$ при значении коэффициента $\omega = 0,5$. Видно, что на поверхности льда поверхностное натяжение препятствует растеканию нефти и ограничивает минимальную толщину пленки ($2,5 \div 3,2 \text{ мм}$).

3. Формирование нефтяной пленки под поверхностью льда. Случай формирования нефтяной пленки, когда нефть находится на границе раздела лед — вода и нефть не

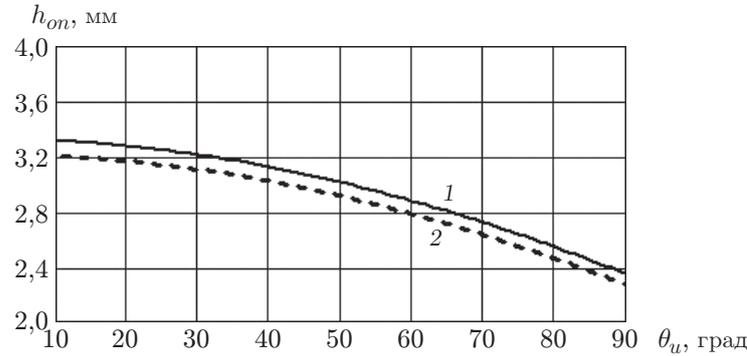


Рис. 2. Зависимость толщины пленки нефти на поверхности льда от величины контактного угла при $\omega = 0,5$ и различных значениях плотности нефти:
 1 — $\gamma_{p1} = 870 \text{ кг/м}^3$, 2 — $\gamma_{p2} = 930 \text{ кг/м}^3$

смачивает его поверхность, показан на рис. 1 при величине контактного угла $\pi > \theta_d > \pi/2$. В этом случае уравнение Юнга имеет вид

$$\cos \theta_d = (\sigma_{sw} - \sigma_{sp}) / \sigma_{pw},$$

где σ_{sw} , σ_{pw} , σ_{sp} — коэффициенты поверхностного натяжения на границах лед — вода, нефть — вода и лед — нефть. Поверхностное натяжение на границе нефть — вода определяется в соответствии с правилом Антонова:

$$\sigma_{pw} = \sigma_{wa} - \sigma_{pa}. \quad (9)$$

Преобразуя уравнение Юнга, получаем соотношение

$$\sigma_{sw} = \sigma_{sp} + \sigma_{pw} \cos \theta_d. \quad (10)$$

Подставляя (6), (9) в (10), получаем выражение для коэффициента поверхностного натяжения на границе лед — вода, которое зависит от коэффициента ω и коэффициента поверхностного натяжения на границе лед — воздух:

$$\sigma_{sw} = \sigma_{pa} [1 - \omega(1 + \cos \theta_u) - \cos \theta_d] + \sigma_{wa} \cos \theta_d. \quad (11)$$

От растекания пленку нефти удерживает сила, которую можно определить, используя коэффициент поверхностного натяжения (см. рис. 1):

$$\sigma_{pd} = \sigma_{sp} + \sigma_{pw} \cos (\pi - \theta_d). \quad (12)$$

Подставляя в формулу (12) выражения (9), (11), получаем

$$\sigma_{pd} = \sigma_{pa} (1 - \cos \theta_u) / 2 - (\sigma_{wa} - \sigma_{pa}) \cos \theta_d. \quad (13)$$

Гидростатическое давление на единицу протяженности нефтяной пленки определяется ее плавучестью

$$P_{un} = (\gamma_w - \gamma_p) h_{un}^2 / 2, \quad (14)$$

где h_{un} — толщина пленки нефти на нижней поверхности льда; γ_w — плотность воды. Приравнявая (13) и (14), находим выражение для толщины пленки нефти под поверхностью льда

$$h_{un} = \sqrt{\frac{2\sigma_{pa}}{\gamma_w - \gamma_p} \left(\frac{1}{2} (1 - \cos \theta_u) + \cos \theta_d + \frac{\sigma_{wa}}{\sigma_{pa}} \cos (\pi - \theta_d) \right)}. \quad (15)$$

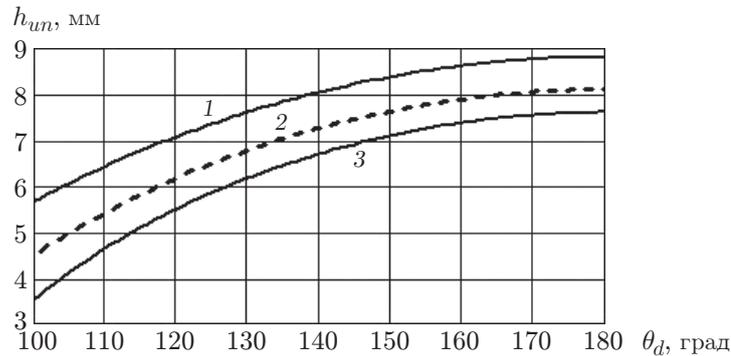


Рис. 3. Зависимость толщины нефтяной пленки под поверхностью льда от величины контактного угла на границе нефть — лед θ_d в водной среде при различных значениях контактного угла θ_u :

1 — $\theta_{u1} = 60^\circ$, 2 — $\theta_{u2} = 40^\circ$, 3 — $\theta_{u3} = 20^\circ$

В полученном решении толщина нефтяной пленки зависит от величины углов контакта нефтяной пленки со льдом как в водной, так и в воздушной среде. Это обусловлено взаимосвязью коэффициентов поверхностного натяжения на границах лед — воздух, лед — вода, нефть — вода.

На рис. 3 показана зависимость толщины нефтяной пленки под поверхностью льда в водной среде от величины контактного угла θ_d для значений контактного угла пленки той же нефти на поверхности льда $\theta_{u1} = 60^\circ$, $\theta_{u2} = 40^\circ$, $\theta_{u3} = 20^\circ$. Видно, что в водной среде под поверхностью льда пределом растекания нефти может оказаться пленка толщиной $8 \div 9$ мм.

Результаты выполненного исследования показывают, что толщина нефтяной пленки на поверхности льда и под ней зависит главным образом от величины угла на границе контакта нефтяной пленки и льда. Величину контактного угла для реального морского льда, который обладает специфическими механическими и физико-химическими свойствами, можно определить только экспериментально. Поэтому оценка этого параметра, необходимого для адекватного прогнозирования загрязнения льда нефтью, является актуальной проблемой дальнейших исследований.

4. Растекание нефти на поверхности и под поверхностью ледового покрова.

Процесс растекания нефти по поверхности льда происходит под действием тех же сил, что и при растекании нефти по поверхности воды: гравитации, вязкого сопротивления и поверхностного натяжения. В то время как для невозмущенной водной поверхности решение задачи можно получить аналитическим путем (см., например, [14]), для поверхности льда это не представляется возможным вследствие его пористости. Аналогичные закономерности были обнаружены при исследовании растекания нефти по грунту [15].

Поскольку данные эффекты еще не изучены и отсутствует их параметризация, оценки пространственных размеров пленки, времени растекания нефти на поверхности льда и под ней следует рассматривать как оценки “сверху” — предельные масштабы нефтяного загрязнения поверхности ледового покрова.

В случае разлива нефти объемом Q на поверхности льда и ее радиально-симметричного растекания до предельной толщины пленки h_{on} (8) конечный (при завершении растекания) диаметр этой пленки определяется следующим образом:

$$D_{on}^f = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma_p}{\sigma_{pa}(1 + \cos \theta_u)}}. \quad (16)$$

Скорость растекания нефти по поверхности льда определяется балансом сил тяжести, инерции и вязкости, от которой зависит сопротивление течению нефти по поверхности льда. Существуют различные модели этого процесса, общим недостатком которых является то, что они не были верифицированы в условиях реального крупномасштабного разлива. Поэтому в данном исследовании для моделирования выбраны решения, экспериментально проверенные в наибольшем диапазоне пространственно-временных масштабов, доступных в лабораторных условиях.

Зависимость диаметра растекающейся по поверхности льда нефтяной пленки от времени определяется по формуле [2, 16]

$$D_{on}(t) = 0,48 \left(\frac{\gamma_p Q^2}{\mu_p} t \right)^{0,2}, \quad (17)$$

где t — время; μ_p — вязкость нефти. Это решение позволяет определить время растекания разлива нефти до окончания этого процесса T_{\max}^f , приравнявая выражения (16) и (17). Рассматриваемый период времени требуется для образования устойчивой пленки с предельно возможной толщиной D_{on}^f (16), после чего дальнейшему растеканию будет препятствовать поверхностное натяжение. Соответствующее решение имеет вид

$$T_{on}^f = 71,8 \frac{\mu_p Q^{0,5}}{\gamma_p h_{on}^{2,5}}. \quad (18)$$

Поверхность льда в водной среде (т. е. под поверхностью льда) нефть практически не смачивает, и величина контактного угла на границе раздела лед — нефть — вода находится в диапазоне $160 \div 180^\circ$. Поэтому растекание нефти под поверхностью льда в водной среде прекращается, когда на внешней границе нефтяной пленки устанавливается баланс силы плавучести нефтяной пленки и поверхностного натяжения. Исходя из этого условия оценивается предельная при растекании толщина нефтяной пленки под поверхностью льда (15), которая для конечного объема нефти Q определяет предельный диаметр нефтяной пленки подо льдом:

$$D_{un}^f = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi} \sqrt{\frac{\gamma_w - \gamma_p}{2\sigma_{pa}} \left(1 - \omega(1 + \cos \theta_u) + \cos \theta_d + \frac{\sigma_{wa}}{\sigma_{pa}} \cos(\pi - \theta_d) \right)^{-1}}}. \quad (19)$$

Скорость растекания нефти под поверхностью льда определяется балансом сил плавучести нефти, инерции и вязкости, от которой зависит сопротивление течению нефти по поверхности льда и относительно водной массы. Используя решение [2, 17], зависимость диаметра растекающейся под поверхностью льда нефтяной пленки от времени можно представить в виде

$$D_{un}(t) = 1,282 \left(\frac{\gamma_w - \gamma_p}{\mu_p} Q^3 \right)^{0,125} t^{0,125}. \quad (20)$$

Решение (20) позволяет оценить время разлива нефти до окончания этого процесса T_{\max}^f , т. е. до момента образования устойчивой пленки толщиной D_{un}^f (19), когда дальнейшему растеканию препятствует поверхностное натяжение по периметру области контакта нефти и льда. Приравнявая выражения (19) и (20), получаем

$$T_{un}^f = 0,36 \frac{\mu_p Q}{(\gamma_w - \gamma_p) h_{un}^4}. \quad (21)$$

Полученные решения применимы для практических расчетов, так как значения входящих в них параметров можно определить по справочникам и выбрать исходя из типичных условий добычи, хранения и транспортировки нефти на шельфе Арктики.

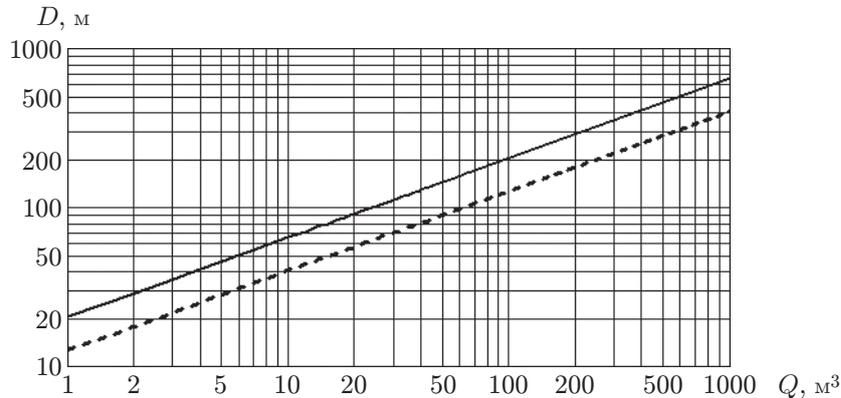


Рис. 4. Зависимость диаметра нефтяной пленки от объема разлитой нефти в случае растекания по поверхности (сплошная линия) и под поверхностью (штриховая линия) льда

5. Возможные масштабы загрязнения при разливе нефти на и под поверхность ледового покрова. С использованием формул (16), (18), а также (19), (21) можно выполнить компьютерное моделирование для оценки пространственных и временных масштабов загрязнения сплошного ледового покрова вследствие разлива нефти в зависимости от ее физических свойств и объема разлива.

Будем полагать, что время выливания рассматриваемого объема нефти на поверхность или под поверхность льда пренебрежимо мало по сравнению со временем, которое требуется для растекания и образования стационарной нефтяной пленки. Расчеты выполнены для случая, когда температура всех четырех сред равна $T = 0$ °С. С использованием известных эмпирических формул эти величины могут быть пересчитаны для любой температуры воздуха, льда, морской воды и нефти в соответствии с конкретными метеорологическими условиями. В расчетах были приняты следующие значения характеристик морской воды и нефти [18, 19]: плотность нефти $\gamma_p = 920,8$ кг/м³, вязкость нефти $\mu_p = 3,84 \cdot 10^{-3}$ кг·с/м², поверхностное натяжение нефти $\sigma_{pa} = 4,83 \cdot 10^{-3}$ кг/м, величина контактного угла на льду $\theta_u = 40^\circ$, величина контактного угла подо льдом $\theta_d = 160^\circ$, плотность морской воды $\gamma_w = 1028$ кг/м³, поверхностное натяжение воды $\sigma_{wa} = 7,79 \cdot 10^{-3}$ кг/м, корректирующий коэффициент $\omega = 0,5$.

На рис. 4 представлены результаты оценки диаметра нефтяных пленок на поверхности льда и под поверхностью сплошного ледового покрова, образующихся при одинаковых объемах разлитой нефти. Размеры нефтяной пленки под поверхностью льда существенно меньше, чем на его поверхности, вследствие различия толщин пленок при завершении растекания под действием силы плавучести и силы тяжести. При объеме разлива нефти $Q = 100$ м³ диаметр нефтяной пленки на поверхности льда равен $D_{on} = 204,5$ м, под поверхностью льда $D_{un} = 126,9$ м, т. е. поверхность нефтяного загрязнения верхней поверхности льда может быть приблизительно в 2,5 раза больше, чем нижней (на границе с водной массой) поверхности.

На рис. 5 показана зависимость времени растекания разлитой нефти от ее объема также на поверхности и под поверхностью льда. В этом случае различие более существенно, что обусловлено большим сопротивлением водной массы течению нефти по поверхности льда при разливе под лед по сравнению с сопротивлением воздуха при разливе на поверхность льда. Кроме того, градиент давления, зависящий от силы тяжести нефти и инициирующий течение на поверхности льда, в несколько раз больше градиента давления, связанного с плавучестью нефти и вызывающего растекание нефти в водной среде.

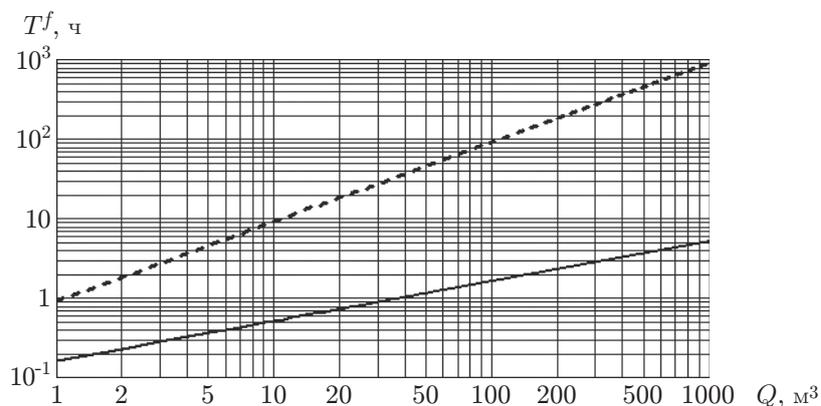


Рис. 5. Зависимость времени растекания нефти до момента образования стационарной пленки от объема разлива по поверхности (сплошная линия) и под поверхностью (штриховая линия) льда

На поверхности льда при $Q = 100 \text{ м}^3$ стационарная пленка образуется приблизительно через 1,5 ч, а под поверхностью льда для этого потребуется более 90 ч.

Представленные результаты моделирования процесса разлива нефти в условиях сплошного ледового покрова показывают, что размеры нефтяной пленки и время ее образования на поверхности льда и под ней существенно различаются. Это обусловлено двумя основными факторами:

- 1) различным действием капиллярных сил на границе контакта нефти и поверхности льда в воздушной и водной средах;
- 2) различием сопротивлений растеканию нефти и градиентов давления, инициирующих растекание нефти.

6. Обсуждение результатов моделирования. При рассмотрении результатов моделирования разливов нефти следует отметить, что длительное время растекания нефти, особенно под поверхностью льда, очень велико и в течение этого времени могут проявиться эффекты испарения в атмосферу или растворения в водной массе легких фракций нефти и ее инфильтрации в лед при уменьшении общего содержания нефти в пленке по сравнению с объемом разлитой нефти и соответственно сокращении поперечных размеров пленки.

Испарение нефти в атмосферу зависит от доли легких фракций в нефти и температуры воздуха и достаточно хорошо исследовано. Согласно [20] при температуре воздуха $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ доля испарившейся приблизительно за 100 ч нефти в зависимости от марки составляет $4 \div 25 \%$. В соответствии с формулой (16) диаметр пятна разлива на поверхность льда уменьшается на $2 \div 14 \%$.

До настоящего времени исследования процесса инфильтрации нефти в лед имели в основном качественный характер [21]. Конкретные результаты измерения коэффициента фильтрации нефти в лед с границы его раздела с водой приведены в работе [22]. Результаты экспериментов в модельных условиях показывают, что в образец льда диаметром 140 мм из нефтяной пленки на границе льда с водой за 100 ч инфильтровалось лишь 14 мл нефти (скорость инфильтрации составила $9,1 \cdot 10^{-3} \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$). В рассматриваемом случае для разлива под поверхностью льда нефти объемом $Q = 100 \text{ м}^3$ при времени растекания 91,6 ч и диаметре пятна разлива 127 м (см. рис. 4, 5) инфильтрация нефти в лед составит $3,52 \text{ м}^3$ (3,5 % объема разлива). Это соответствует уменьшению диаметра пятна разлива на 1,5 м (см. (16)).

Из пленки нефти, находящейся под поверхностью льда, легкие фракции нефти диффундируют в водную массу. В работе [23] исследовался процесс растворения легких фракций нефти из капель, появляющихся в придонных слоях моря при утечках из донных нефтепроводов. Моделирование показало, что при всплытии с глубины 50 м на поверхность моря в течение 8 ч капли нефти с начальным диаметром 0,25 мм уменьшаются в объеме на 40 %. Данный результат не описывается параметрами пленки нефти, находящейся вблизи поверхности моря, однако свидетельствует о необходимости исследования роли этого фактора.

Сравнение приведенных выше оценок показывает, что испарение легких фракций нефти в атмосферу и растворение их в водной массе необходимо учитывать при прогнозировании растекания нефти в ледовых условиях.

Заключение. В работе с использованием методов физической химии проведено исследование взаимодействия нефти с поверхностью ледового покрова, позволившее выявить новые эффекты, получить аналитические зависимости для оценки пространственных и временных масштабов растекания нефти по поверхности и под поверхностью льда, а также выполнить математическое моделирование этого процесса для реальных объемов возможных аварийных разливов.

Основным результатом проведенного теоретического анализа является вывод о том, что пространственные и временные масштабы растекания нефти по поверхности и под поверхностью льда ограничены временем достижения баланса сил поверхностного натяжения и гидростатического давления в нефтяной пленке на ее границе.

Результаты расчетов, выполненных для реально возможных объемов разлившейся нефти, показали, что масштабы загрязнения льда нефтью на порядки меньше, чем загрязнение свободной ото льда водной поверхности при тех же объемах разлива. Результатом моделирования является также вывод о существенном различии процессов растекания разлитой нефти по поверхности льда и под ней. В частности, под поверхностью льда растекание нефти происходит значительно медленнее и размеры области загрязнения льда существенно меньше, чем на его поверхности.

Целью дальнейших исследований является уточнение основных физических параметров, от которых зависит растекание нефти по поверхности льда. В первую очередь это относится к роли снежного покрова льда в процессе инфильтрации нефти и сопротивления ее течению, испарения в атмосферу и растворения в водной массе легких фракций нефти, а также воздействия подледных течений на формирование нефтяной пленки. Это даст возможность после экспериментальной проверки и уточнения путем введения эмпирических коэффициентов рекомендовать модели для использования при разработке компьютерных программ, предназначенных для прогнозирования развития и ликвидации аварийных разливов нефти в ледовых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **The fate and behavior of oil in freezing environments** / Ed. by B. P. Hollebone, M. Fingas, D. N. S. Permann, J. Mullin. Ottawa: S. n., 2001.
2. **Fingas M., Hollebone B.** Oil behavior in ice-infested waters // Intern. Oil Spill Conf. 2014. V. 1. P. 110–135. DOI: 10.7901/2169-3358-2014.1.1239.
3. **Goncharov V. K.** Problems of the oil spill combating in the Arctic seas // Proc. of the 6th World maritime technology conf. (WMTC2018), Shanghai (China), 4–7 Dec. 2018. Shanghai: Shanghai Soc. of Naval Arch. and Marine Engrs, 2018. CD-ROM.
4. **Liukkonen S., Koskivaara J., Ryttonen J., Lampela K.** Adhesion of oil to plastic, stainless steel and ice // Proc. of the 18th AMOP Technical seminar on environmental contamination and response. Ottawa (Canada), 1995. Ottawa: S. n., 1995. P. 69–90.

5. **Liukkonen S., Rytkonen J., Alhimenko F., Kniazeva E.** On the adhesion of oil to ice // Proc. of the 7th Intern. offshore and polar engineering conf., Honolulu (USA), 25–30 May 1997. Golden: Intern. Soc. of Offshore and Polar Engrs, 1997. V. 1. P. 579–586.
6. **Goncharov V. K., Aleshin I. V., Smolin R. D., Sudakov A. F.** Possibly approaches for under ice oil pollution detection // Proc. of the 25th IAHR Intern. symp. on ice, Trondheim (Norway), 23–25 Nov. 2020. S. l.: Intern. Assoc. for Hydro-Environment Engng and Res., 2020. P. 583–594.
7. **Морской лед:** Справ. пособие / Под ред. И. Е. Фролова, В. П. Гаврило. СПб.: Гидрометеоздат, 1997.
8. **Атлас** гидрометеорологических и ледовых условий морей российской Арктики. М.: Нефт. дело, 2015.
9. **Goncharov V. K., Edush N. Yu., Zueva E. S., et al.** Investigation of correlation between the temperature on air-snow and snow-ice interfaces and the atmospheric air temperature // J. Earth Sci. Engng. 2016. V. 6, N 5. P. 245–253.
10. **Goncharov V. K., Klementieva N. Yu., Jian-min Qin.** Analysis of the problem of saturation of ice with air bubbles // Proc. of the 21st Intern. conf. on port and ocean engineering under Arctic conditions (РОАС 2011), Montreal (Canada), 2011. N. Y.: Curran Assoc., Inc., 2011. V. 1. P. 68–77.
11. **Щукин Е. Д.** Коллоидная химия / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. М.: Высш. шк., 2004.
12. **Адамсон Н. К.** Физика и химия поверхностей. М.: Гостехтеоретиздат, 1947.
13. **Штеренлихт Д. В.** Гидравлика. М.: Энергоатомиздат, 1984.
14. **Гамзаев Х. М.** Моделирование растекания нефтяной пленки по поверхности моря // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 3. С. 127–130.
15. **Шагапов В. Ш., Гильманов С. А.** Растекание жидкости по поверхности, сопровождающееся впитыванием в грунт // ПМТФ. 2010. Т. 51, № 5. С. 88–94.
16. **McMinn T. J.** Crude oil behavior on Arctic winter ice: Rep. / United States Coast Guard. N 734108. Washington, 1972.
17. **Yara P. D., Weerasuriya S. A., Belaskas D. P., Chowdhury T.** Oil spreading in surface water with an ice cover: Rep. Clarkson Univ. N 93-3. Potsdam; N. Y., 1989.
18. **Попов Н. И.** Морская вода: Справ. рук. / Н. И. Попов, К. Н. Федоров, В. М. Орлов. М.: Наука, 1979.
19. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
20. **Buist I., Belore R., Guariano A., et al.** Empirical weathering properties of oil in ice and snow // Proc. of the 32 AMOP Tech. seminar on environmental contamination and response. S. l.: S. n., 2009. V. 1.
21. **Eric Collins R., Bluhm B., Gradinger R., et al.** Crude oil infiltration and movement in first-year ice: Impacts on ice-associated biota and physical constrains: Final Rep. Univ. of Alaska. N OCS Study ВОЕМ 2017-087. Fairbanks, 2017.
22. **Сарнавский Д. В., Сабодаш О. А.** Проблема взаимодействия нефти и льда при аварийных ситуациях на нефтеперерабатывающих платформах и нефтеперегрузочных терминалах, сопровождаемых разливами нефти под ледяной покров // Евраз. союз ученых. 2019. Т. 5. С. 30–41. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.62.95.
23. **Goncharov V. K.** Simulation of oil drop dynamics in seawater environment // J. Marine Engng Technol. 2009. N 15. P. 21–28.

*Поступила в редакцию 12/IV 2022 г.,
после доработки — 27/V 2022 г.
Принята к публикации 27/VI 2022 г.*