

## Влияние изменения вязкости нефти на характеристики ее разливов в холодной морской среде

М. П. Лобачев<sup>1</sup>, кандидат технических наук,  
К. Е. Сазонов<sup>2</sup>, доктор технических наук  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

*Рассматривается влияние температурных эффектов на характеристики разлива нефти в ледовых условиях, в первую очередь за счет изменения показателей вязкости нефти при изменении ее температуры. Получены оценки, показывающие, что учет изменения вязкости нефти необходим для более точного определения размера акватории, занятой разливом.*

**Ключевые слова:** разлив нефти, режим постоянного расхода, режим постоянного объема, вязкость, температура.

### Введение

Изучению поведения разливов нефти в открытом море и в ледовых условиях посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ [1]. В подавляющем большинстве этих работ рассматривается процесс растекания нефти в тех или иных условиях с точки зрения гидромеханики. При этом предполагается, что характеристики нефти в процессе разлива не изменяются. Тем не менее известно, что в зависимости от температуры физические свойства нефти, и в первую очередь вязкость, претерпевают большие изменения вплоть до того, что тяжелые фракции нефти могут парафинизироваться при растекании в процессе охлаждения.

С каждым годом увеличивается объем нефтеперевозок в замерзающих морях при низких температурах окружающей среды. В соответствии с современными требованиями в этом случае температура нефти при транспортировке тем или иным техническим средством должна быть не менее 40°C. Температура воды в арктических морях или подо льдом составляет примерно 0°C, поэтому при попадании

нефти в воду существует перепад температур не менее 40°C. Этот перепад оказывает существенное влияние на физические процессы, происходящие при растекании нефти. В данной работе рассматриваются различные аспекты, связанные с учетом термодинамических эффектов при рассмотрении процесса растекания нефти при низких температурах.

### Теория растекания нефти в водной среде

В процессе растекания нефти в открытой воде обычно выделяют три стадии [1]: гравитационно-инерционную, гравитационно-вязкую и стадию, когда определяющее влияние оказывают эффекты, связанные с вязкостью и поверхностным натяжением. При рассмотрении растекания нефти подо льдом эквивалентом силе тяжести является сила плавучести. На последних стадиях распространения, по мере того как слой нефти становится тоньше, силы поверхностного натяжения начинают доминировать, и прекращение распространения нефти достигается в результате статического баланса сил растяжения и плавучести.

Несколько другой подход предложен в работе японских специалистов [2], которые предлагают учитывать гравитационную силу, силу вязкости и силу поверхностного натяжения в качестве

<sup>1</sup> e-mail: lobachevm@mail.ru.

<sup>2</sup> e-mail: kirsaz@rambler.ru.

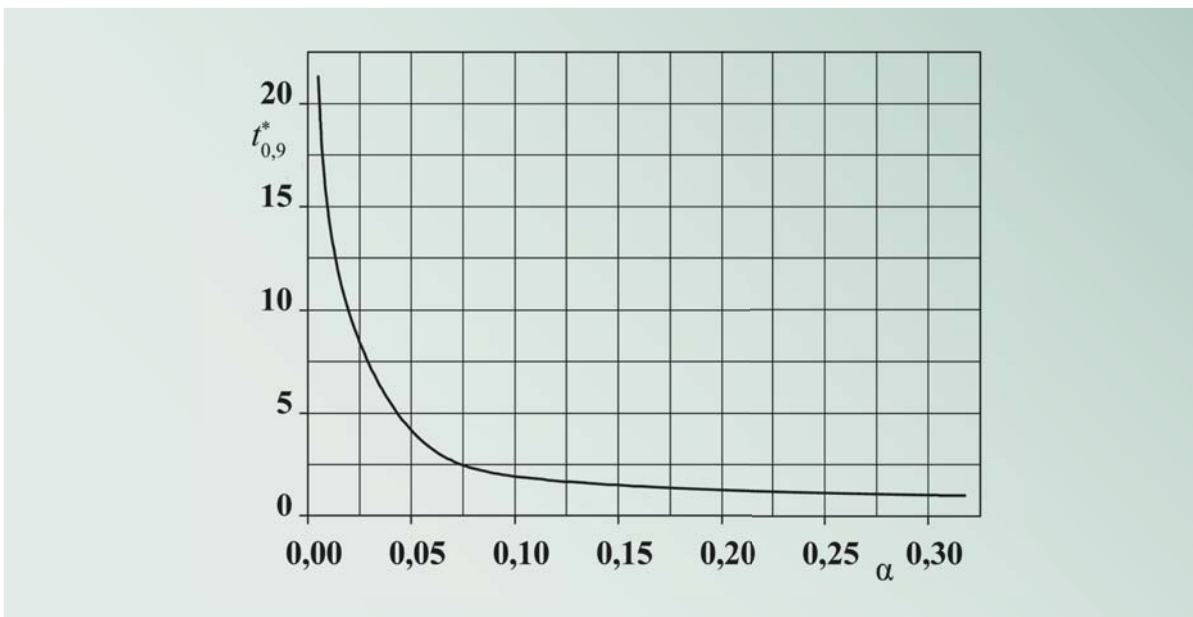


Рис. 1. Относительное время, затрачиваемое для достижения разливом  $R = 0,9R_f$ , в зависимости от параметра  $\alpha$

определяющих на всех стадиях развития разлива за исключением начальной — гравитационно-инерционной. При таком подходе радиус конечного пятна (дальность распространения разлива) определяется балансом сил плавучести и поверхностного натяжения. Время же, за которое этот радиус будет достигнут, существенным образом оказывается зависящим от соотношения сил вязкости и поверхностного натяжения, а не только вязкости, как следует из выражений, представленных в традиционных расчетных схемах [1].

Для радиуса растекания нефтяного пятна в режиме постоянного расхода  $Q$  в работе [2] получено выражение

$$R = \left(\frac{k_0}{\pi^3}\right)^{1/8} \left(\frac{\Delta\rho g Q^3}{\mu_0}\right)^{1/8} f(\alpha) t^{1/2}, \quad (1)$$

где  $f(\alpha) = \left(\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 2\alpha + 1}\right)^{1/8}$ ;  $\alpha = 2\pi k_0 \frac{\sigma_n^2}{\Delta\rho g \mu_0 Q}$ ;

$\mu_0$  — динамическая вязкость нефти;  $\sigma_n$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе «вода-нефть».

Для стадии постоянного объема

$$r - r_0 + \ln \left| \frac{1-r}{1-r_0} \right| = -4\alpha(t^* - 1), \quad (2)$$

где  $r = (R/R_f)^4$ ;  $r_0 = (R_0/R_f)^4$ ;  $t^* = t/t_0$ ;  $R_0$  — радиус нефтяного пятна в момент прекращения вытекания нефти и, соответственно, начала фазы постоянного объема;  $t_0$  — соответствующее этому

моменту время от начала растекания; коэффициент  $k_0 = 0,5$ ;  $R_f$  — конечный радиус нефтяного пятна;

$$R_f = \left(\frac{1}{2\pi^2}\right)^{1/4} \left(\frac{\Delta\rho}{\sigma_n}\right)^{1/4} V^{1/2}. \quad (3)$$

Для отношения радиуса нефтяного пятна в конце фазы постоянного расхода к окончательному в [2] получено выражение

$$R_0 / R_f = (2\alpha)^{1/8} f(\alpha).$$

На рис. 1 показана зависимость времени  $t_{0,9}^*$  ( $t_{0,9}^* = t_{0,9}/t_0$ ) от параметра  $\alpha$ . Здесь  $t_{0,9}$  — время, за которое нефтяное пятно достигнет радиуса  $0,9R_f$ . Хорошо видно, что при больших значениях  $\alpha$ , т. е. при малой вязкости  $\mu_0$  или малом расходе  $Q$  радиус  $0,9R_f$  достигается за время, сравнимое со временем фазы постоянного расхода. В то же время при больших значениях вязкости нефти и/или при больших величинах расхода время, требуемое для растекания нефтяного пятна до радиуса  $0,9R_f$  и, следовательно,  $R_f$ , резко возрастает. Таким образом, для практических целей в случае разливов нефти большой вязкости или при катастрофических разливах оказывается значимым не только окончательный радиус нефтяного пятна  $R_f$ , но и радиус в конце фазы постоянного расхода  $R_0$ . Именно этот радиус будет определять динамику поведения нефтяного пятна в реальных условиях в первое время после катастрофы.

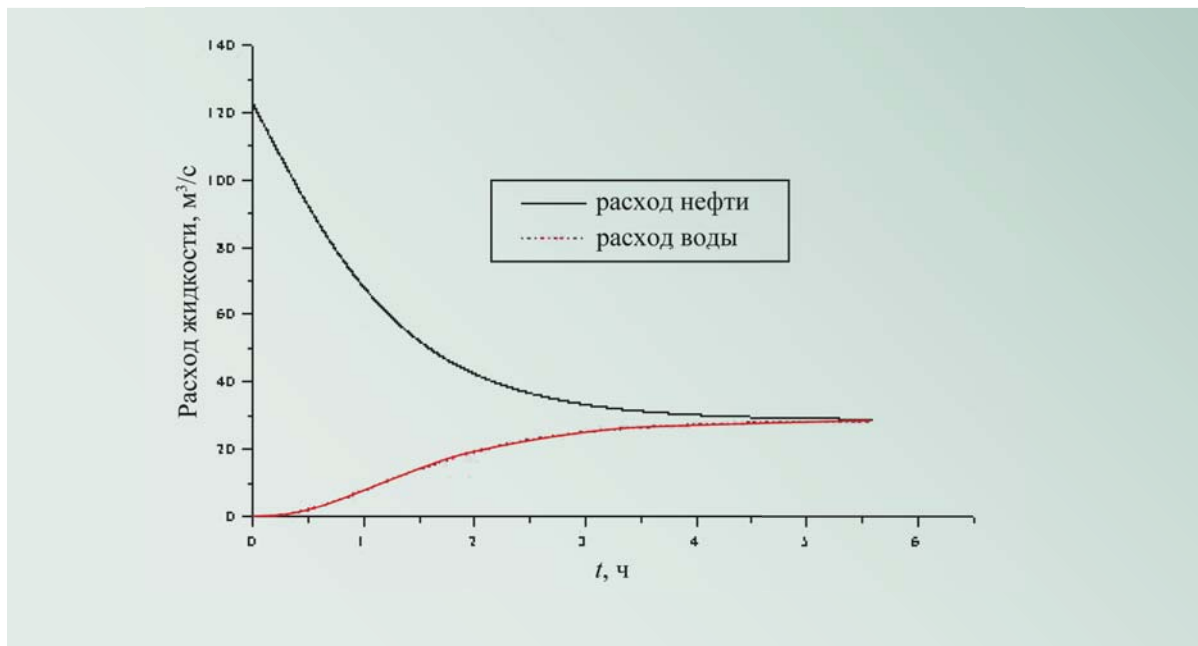


Рис. 2. Расходы нефти и воды через пробоину. Отношение площади пробоины к площади танка составляет  $10^{-3}$

Необходимо отметить, что выбор того или иного сценария развития разлива (постоянный расход или объем) представляет собой неоднозначную задачу. Например, для такого типичного аварийного случая, как вытекание нефти из бортовой пробоины в корпусе танкера, полученной при столкновении судов, характер изменения расхода нефти во времени через пробоину показан на рис. 2 [3].

Из этого рисунка следует, что начальные стадии вытекания нефти характеризуются изменяющимися значениями расхода нефти, которые лишь через некоторое достаточно большое время могут быть приняты постоянными. Приведенная зависимость величины расхода вытекающей из пробоины нефти от времени может быть объяснена сложностью происходящих при этом физических явлений [3]. Процесс вытекания нефти из танка можно разбить на четыре фазы, которые последовательно сменяют одна другую. Однако при определенных условиях одна или несколько фаз процесса могут отсутствовать.

**Фаза 1.** Происходит вытекание нефти из пробоины. Эта фаза характеризуется тем, что столб нефти в танке еще достаточно велик и его гидростатическое давление превышает гидростатическое давление воды по всей площади поверхности пробоины. Следовательно, струя вытекающей нефти также занимает все сечение пробоины. Во время действия первой фазы возможен прорыв воздуха в танк.

**Фаза 2.** Уровень нефти в танке становится ниже верхнего края пробоины. Из-за этого струя вытекающей нефти занимает уже не все сечение пробоины. Это приводит к изменению скорости истечения и расхода нефти через пробоину. Данная фаза не

всегда имеет место, ее возникновение зависит от расположения пробоины по высоте.

**Фаза 3.** Гидростатическое давление столба нефти в танке сравнивается по величине и становится меньше гидростатического давления воды на какой-то части площади пробоины. В этой части пробоины возникает противоположное по направлению течение воды внутрь корпуса. Из-за разности в плотности воды и нефти попавшая внутрь корпуса вода опускается на дно танка, вытесняя нефть наверх. Это продолжается до тех пор, пока вся нефть из танка не будет вытеснена водой. Абсолютные размеры сечений пробоины, по которым происходит вытекание нефти и втекание воды, по мере развития процесса изменяются. В первом приближении именно эта фаза вытекания нефти может быть принята за стадию разлива при постоянном расходе.

**Фаза 4.** Через пробоину стекает остаточный слой нефти. Начало этой заключительной фазы совпадает с установлением в танке такого же уровня воды, как и в море. Из-за незначительности эта фаза в дальнейшем не рассматривается. Здесь она описывается только для полноты физической картины процесса.

После вытекания всей нефти из танка дальнейшее развитие разлива должно рассматриваться в соответствии со сценарием  $V = \text{const}$ .

Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что общепринятые в настоящее время подходы к расчету характеристик разлива, базирующиеся на допущении постоянства расхода, не полностью соответствуют реально протекающим при возможных авариях процессам. Практический интерес представляет решение задачи о распространении разлива нефти

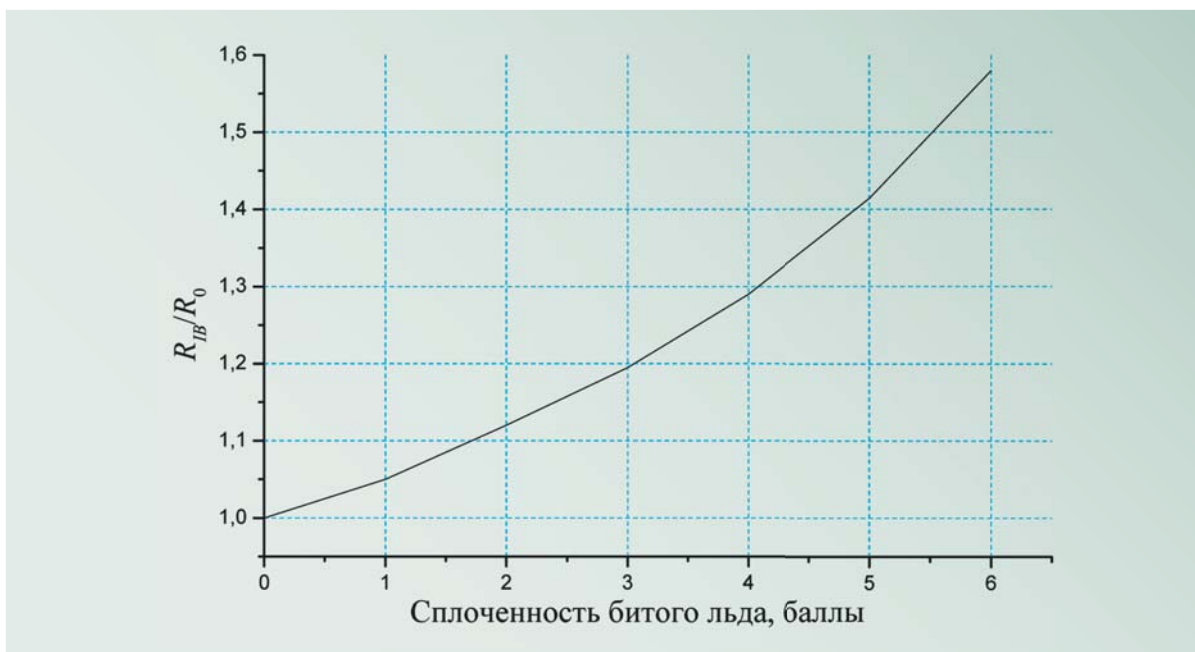


Рис. 3. Увеличение характерного радиуса разлива нефти в море, покрытом битым льдом:  $R_{IB}$  – характерный радиус в битых льдах,  $R_0$  – характерный радиус на чистой воде

как на чистой воде, так и подо льдом для случая изменяющегося во времени расхода.

Если танкер получил днищевую пробоину, то расход нефти через нее также не может рассматриваться как постоянный [4]. В случае же вертикальной качки процесс вытекания нефти из пробоины носит пульсирующий характер, зависящий от параметров качки.

В реальных условиях на величину  $R_0$  могут оказывать влияние и другие факторы. Так, если разлив нефти происходит в битых льдах различной сплоченности, характер распространения нефти в воде определяется особенностями ее движения по каналам между льдинами. В [5] выполнено численное исследование такого движения. Там же получена приближенная оценка влияния сплоченности льда на характеристики разлива. На рис. 3 показано изменение характерного радиуса разлива по отношению к соответствующему радиусу на чистой воде.

Важнейшим недостатком используемых методов расчета распространения разливов нефти в ледовых условиях является то, что в них рассматривается изотермическая задача. В то же время при транспортировке нефти в арктических районах ее подогревают. Таким образом, в случае разлива температура нефти может отличаться от температуры окружающей среды на  $40^\circ\text{C}$ . Как показывают исследования [6], вязкость нефти очень существенно зависит от температуры. Особенно сильно эта зависимость может проявляться для смесей различных нефтей [6]. Другие характеристики нефти (в том числе поверхностное натяжение) также зависят от температуры, хотя и в меньшей степени. Кроме

того, поверхностное натяжение весьма сильно зависит от наличия на поверхности нефтяного пятна поверхностно-активных веществ. Неравномерная температура поверхности нефтяного пятна и неравномерная концентрация поверхностно-активных веществ в окружающей среде могут приводить к возникновению глобальных движений (эффект Марангони), что, в свою очередь, способно привести к значительным изменениям в характере растекания нефти. В данной работе эти эффекты не рассматриваются. Изучается только изменение вязкости в зависимости от температуры, которая является переменной по объему нефтяного пятна. Как известно, даже для простейшего течения между двумя параллельными плоскостями переменность вязкости по пространству может приводить к нетривиальным явлениям [7].

### Анализ влияния температурных эффектов

При первичном анализе теплообмена в силу большой вязкости нефти можно пренебречь конвективным теплообменом. Кроме того, можно не рассматривать начальную стадию вытекания и считать толщину нефтяного пятна постоянной по пространству. Это дает возможность представить нефтяное пятно как некоторый диск с заданным законом теплообмена с окружающей средой. В силу малости площади боковой поверхности пятна по сравнению с общей его площадью можно пренебречь теплообменом через боковую поверхность. Полученное в этом случае распределение температуры будет справедливо везде кроме зоны размером примерно в толщину пятна от его края.

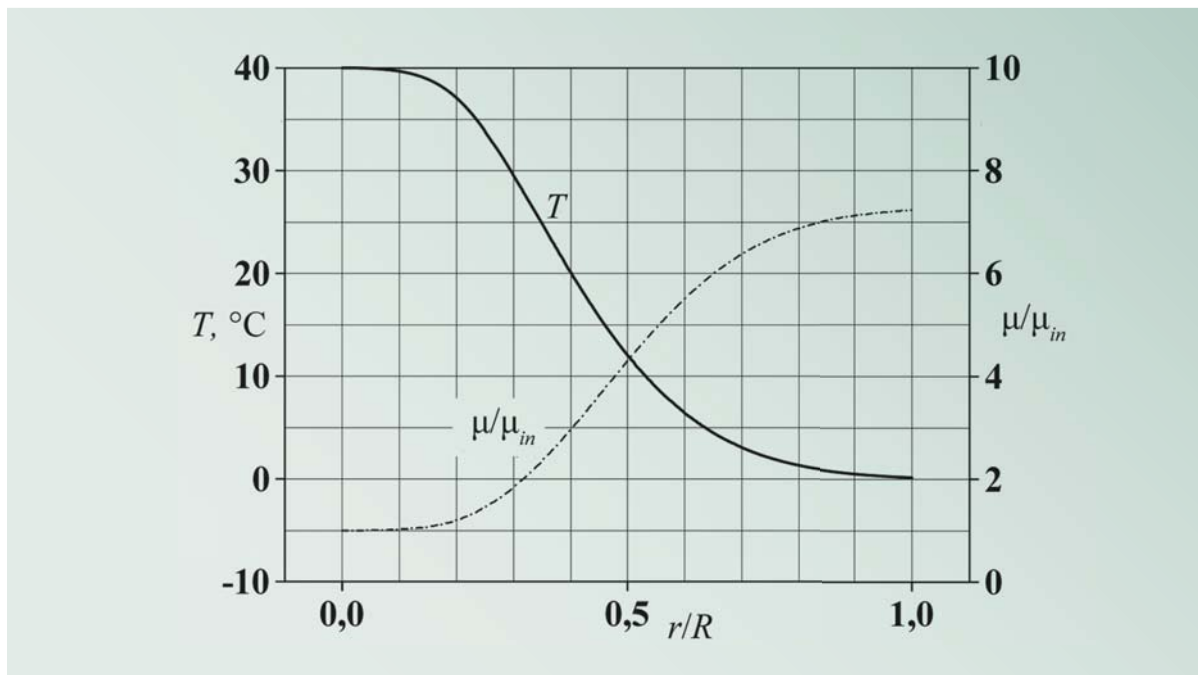


Рис. 4. Распределение температуры и вязкости по средней поверхности разлива

Для первичных оценок в таком случае можно использовать решение задачи об остывании неограниченной пластины, равномерно прогретой в момент времени  $t = 0$  до температуры  $T_{in}$ , погруженной в среду с постоянной температурой  $T_0$ . Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  от поверхности пластины к среде принимается не изменяющимся во времени. Ось  $z$  перпендикулярна к боковым поверхностям, начало координат поместим в середине пластины. Ранее было сказано, что на границе раздела «нефть-лед» можно полагать температуру нефти равной температуре льда. Здесь, однако, будем считать, что на этой поверхности также происходит теплоотдача в среду с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ . Это позволит воспользоваться уже имеющимся решением.

Безразмерная температура в плоскости  $z$  в момент времени  $t$  определяется уравнением [8]

$$\Delta \bar{T} = \frac{T - T_0}{T_{in} - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{\beta_n z}{\delta}\right) \exp(-\beta_n^2 Fo), \quad (4)$$

$$A_n = \frac{2 \sin \beta_n}{\beta_n + \sin \beta_n \cos \beta_n},$$

где  $\beta_n$  — корни характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg} \beta = \frac{1}{Bi} \beta; \quad Fo = at / \delta^2 \text{ — число Фурье;}$$

$Bi = \alpha \delta / \lambda$  — критерий Био; толщина пластины обозначена  $2\delta$ ;

$a$  — коэффициент температуропроводности.

При  $Bi \geq 100$  температура поверхности пластины  $T_w$  практически равна температуре окружающей среды, и

$$\Delta \bar{T} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \cos\left[\frac{(2n-1)\pi z}{2\delta}\right] \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} Fo\right]. \quad (5)$$

В рассматриваемой задаче для большинства нефтей при разливе в фазе постоянного расхода  $Bi \geq 100$ , по крайней мере  $Bi \geq 50$ . Поэтому при выполнении оценочных расчетов можно пользоваться последней формулой.

Определим распределение температуры в нефтяном пятне для конкретного случая разлива. Для оценки размеров пятна будем пользоваться выражениями (1) и (2), выведенными, как известно, без учета изменения вязкости. Примем расход  $Q$  равным  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ , длительность фазы постоянного расхода  $t_0 = 1,8 \cdot 10^4 \text{ с}$  (5 ч), начальную температуру нефти  $T_{in} = 313 \text{ К}$  ( $40^\circ\text{C}$ ), температуру окружающей среды —  $273 \text{ К}$  ( $0^\circ\text{C}$ ), вязкость нефти при начальной температуре  $\mu_{in} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , поверхностное натяжение  $\sigma = 0,1 \text{ Н/м}$ , разность плотностей нефти и воды  $\Delta \rho = 0,1 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент температуропроводности  $a = 0,088 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,143 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ; коэффициент теплоотдачи можно принять равным коэффициенту теплоотдачи в неподвижную воду  $\alpha = 580 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Все указанные коэффициенты отличаются большой изменчивостью, однако при проведении оценок могут быть взяты для какого-либо конкретного образца нефти.

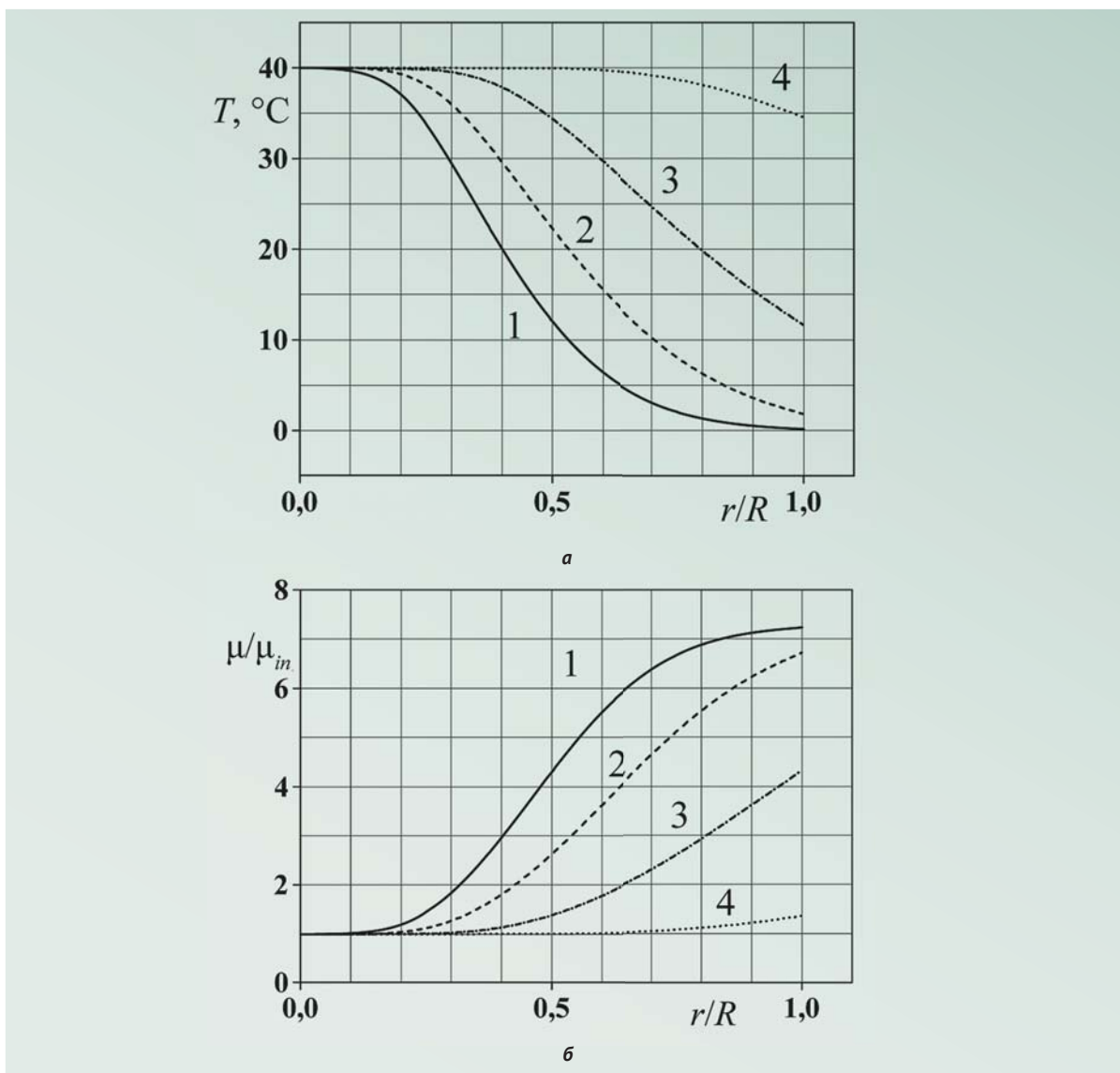


Рис. 5. Распределение температуры (а) и вязкости (б) в различные промежутки времени на средней поверхности разлива: 1 –  $R = 0,25R_0$ ; 2 –  $R = 0,5R_0$ ; 3 –  $R = 0,75R_0$ ; 4 –  $R = R_0$

Расчет по формуле (1) дает для этого случая  $R_0 = 105,5$  м. Окончательный радиус  $R_f = 200,3$  м. Толщины — соответственно  $h_0 = 0,0514$  м и  $h_f = 0,0143$  м.

В случае определения температуры для произвольного радиуса  $r$  время  $t$ , которое данное сечение находится в контакте с окружающей средой, может быть определено из соотношения

$$\frac{t}{t_0} = \left( \frac{r}{R_0} \right)^2.$$

На рис. 4 представлено распределение температуры в средней плоскости нефтяного пятна в конце фазы постоянного расхода. Там же приведено

распределение отношения вязкости при соответствующей температуре к начальной вязкости. При определении зависимости вязкости от температуры было сделано предположение, что вязкость подчиняется зависимости  $\mu = A \exp(b/T)$ . Коэффициенты  $A$  и  $b$  приняты по данным, приведенным в [2]:  $A = 4,65 \cdot 10^{-8}$  Па·с,  $b = 4,24 \cdot 10^3$  К. Для отношения  $\mu/\mu_{in}$  получаем выражение

$$\mu/\mu_{in} = \exp \left[ b \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{in}} \right) \right]. \quad (6)$$

Наблюдается весьма сильное изменение температуры и вязкости. Таким образом, можно говорить о значимости тепловых эффектов при растекании нефти. Расчеты температуры на поверхности пятна

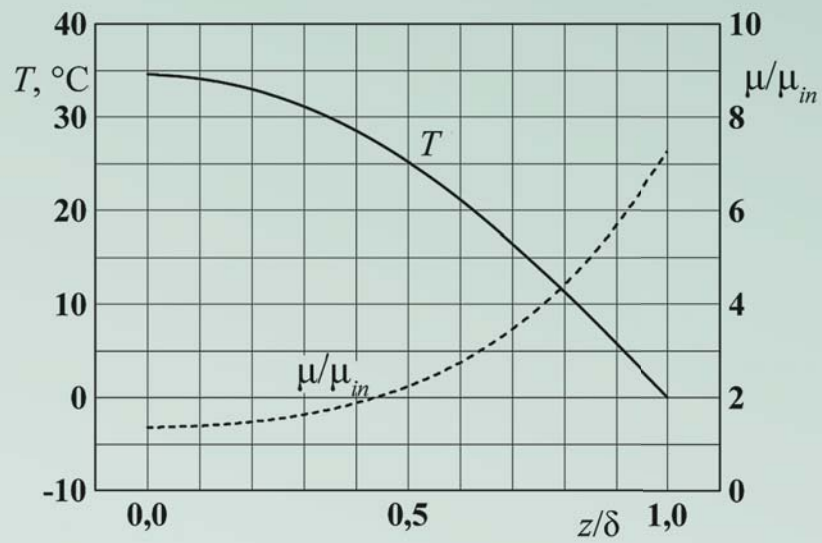


Рис. 6. Профили температуры и вязкости по толщине слоя нефти при  $r = 0,25R_0$

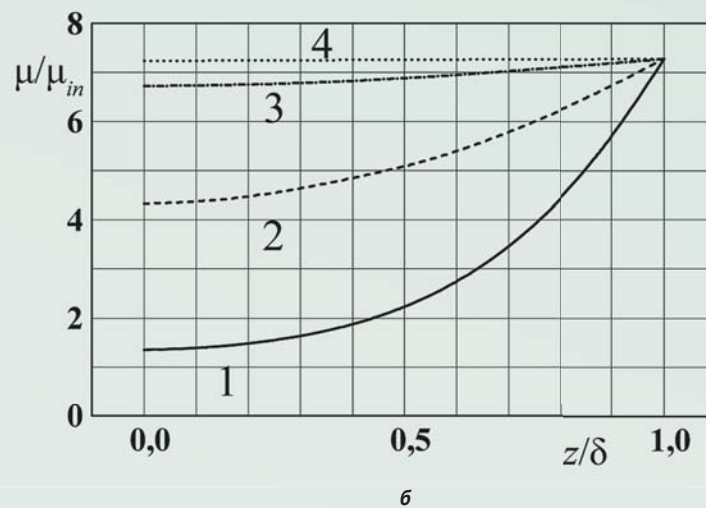
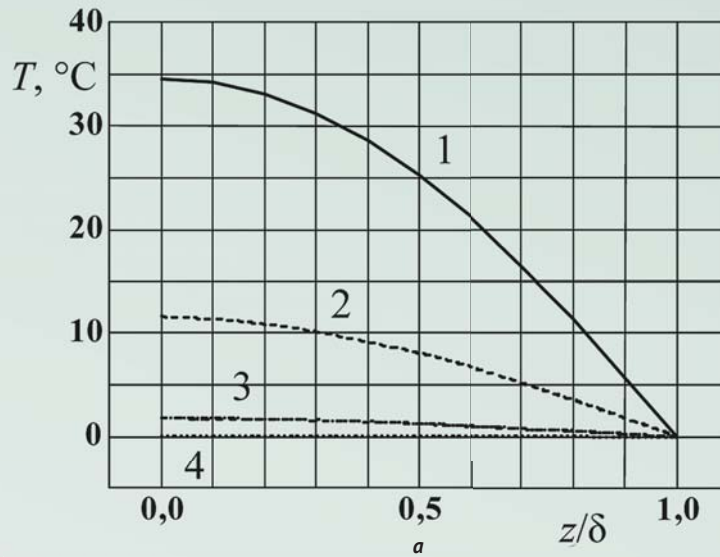


Рис. 7. Профили температуры (а) и вязкости (б) по толщине слоя нефти  
 1 –  $r/R_0 = 0,25$ ; 2 –  $r/R_0 = 0,5$ ; 3 –  $r/R_0 = 0,75$ ; 4 –  $r/R_0 = 1$

дают температуру, практически не отличающуюся от температуры окружающей среды.

Проследить динамику изменения температуры и вязкости при растекании нефти можно, проведя расчеты для разных моментов от начала процесса. На рис. 5 и 6 приведены распределения тех же величин, что и на рис. 3, но для моментов времени, когда радиус нефтяного пятна  $R$  составляет  $0,25 R_0$ ,  $0,50 R_0$ ,  $0,75 R_0$  и  $R_0$ . Соответствующие времена от начала растекания составили  $1,126 \cdot 10^3$  с,  $4,502 \cdot 10^3$  с,  $1,1013 \cdot 10^3$  с и  $1,8 \cdot 10^4$  с. Для возможности сопоставления при разных конечных радиусах  $R$  все величины построены в зависимости от отношения  $r/R$ .

Расчет при  $R > R_0$  показывает чрезвычайно быстрое падение температуры по всей площади нефтяного пятна, что приводит к выводу о значимости тепловых эффектов только в фазе постоянного расхода.

Выражения (4) или (5) позволяют также рассчитать распределение температуры и вязкости по толщине нефтяного пятна. На рис. 7 приведены распределения температуры и отношения  $\mu/\mu_m$  по толщине пластины (от средней линии) для радиуса  $R = 0,25 R_0$  в конце фазы постоянного расхода. Хорошо видно, что по толщине пятна имеется большая неравномерность этих величин.

Для других радиусов наблюдается подобная картина с постепенным выравниванием всех характеристик. Такой характер распределения вязкости, когда вблизи твердой поверхности наблюдается ее увеличение, обычно приводит к замедлению течения у стенки и к оттеснению линий тока от поверхности. С учетом хорошо видимого на предыдущих графиках увеличения вязкости в радиальном направлении вполне можно ожидать увеличения толщины нефтяного пятна по сравнению с изотермическим случаем. Это неизбежно приведет к переменной толщине вдоль радиального направления, что, в свою очередь, ведет к невозможности применения обычно используемых аналитических подходов для оценки параметров распространения загрязнения и неизбежному использованию численных методов. Математическая модель, которую можно использовать для расчета подобных течений, приведена в [9].

Проведенный выше теоретический анализ показывает, что нельзя однозначно определить влияние термодинамических эффектов на процесс растекания нефти в ледовых условиях. Наиболее сильное влияние термодинамические эффекты оказывают на параметры растекания на стадии постоянного расхода. По сравнению с изотермическим случаем учет этих эффектов приводит к увеличению толщины слоя растекающейся нефти. Этот ранее не отмечавшийся исследователями вывод имеет большое прикладное значение. Он показывает, что при растекании нефти в холодных климатических условиях величина загрязненной нефтью поверхности может быть существенно меньше, чем обычно принято полагать, базируясь на данных расчетов и экспериментов,

выполненных в теплых климатических условиях. Эффект уменьшения зоны загрязнения нефтепродуктами в холодных климатических условиях косвенно подтверждается данными об аварийных разливах. Учет температурных эффектов может сделать более реалистическими оценки времени растекания нефти и размеров акватории, занятой разливом.

### Литература

1. Мансуров М. Н., Сурнов Г. А., Журавель В. И., Маричев А. В. Ликвидация аварийных разливов нефти в ледовых морях / Под. общ. ред. М. Н. Мансурова — М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. — 423 с.
2. Izumiyama K., Uto S., Narita S., Tasaki R. Effects of Interfacial Tension on the Spreading of Oil under an Ice Cover // Proc. of the 14th Int. Symposium on Ice. Potsdam, New York, USA. — [S. I.], 1998. — P. 419—426.
3. Анполонов Е. М., Нестеров А. Б., Сазонов К. Е. Оценка времени вытекания нефти из бортовой пробоины на тихой воде // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2005. — Вып. 24 (308). — С. 134—144.
4. Анполонов Е. М., Нестеров А. Б., Сазонов К. Е. Влияние вертикальной качки на время вытекания нефти из бортовой и днищевой пробоины // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2005. — Вып. 24 (308). — С. 145—153.
5. Бартеньева А. А., Лобачев М. П., Овчинников Н. А., Сазонов К. Е. Исследование распространения нефти в ледяных каналах // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2010. — Вып. 51 (335). — С. 165—168.
6. Danielson T. J., Thomason W. H. Influence of Crude Oil Properties on Northern Gateway Terminal Transportation System. — Conoco Inc. Ponca City, OK, USA, 1997.
7. Аристов С. Н. Стационарное течение жидкости с переменной вязкостью // Доклады РАН. — 1998. — Т. 359, № 5. — С. 625—628.
8. Лыков А. В. Тепломассообмен (Справочник). — М.: Энергия, 1971. — 560 с.
9. Lobachev M. P., Sazonov K. E. On thermodynamic effects associated with marine oil spillages under low temperatures // Proc. the 15th Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC-99), Helsinki. — [S. I.], 1999. — P. 820—828.