

УДК 502.51:504.5:665.665.6/.7

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ УДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БОНОВОГО ЗАГРАЖДЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. **В.К. ЛИПСКИЙ, Д.П. КОМАРОВСКИЙ**
(Полоцкий государственный университет),

д-р техн. наук, проф. **М.В. ЛУРЬЕ**

(Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва)

Разработан метод расчета удерживающей способности бонового заграждения, позволяющий определить объем нефти, удерживаемый боновым заграждением, глубину погружения бонового заграждения и установить скорость потока, при которой происходит унос нефти за боновое заграждение. Предложены технические решения, позволяющие увеличить удерживающую способность бонового заграждения.

Известно, что основным техническим средством, позволяющим локализовать и удерживать пятно разлившейся нефти на водотоке, является боновое заграждение.

При конструировании боновых заграждений, их эксплуатации и планировании использования, в частности при составлении планов ликвидации аварий [1], возникает потребность в расчетных методах, позволяющих определить технические и эксплуатационные характеристики бонового заграждения, прежде всего их *удерживающую способность*. В настоящее время подобные методы отсутствуют.

Решению этой проблемы были посвящены экспериментальные и теоретические исследования, проведенные в Полоцком государственном университете и Российском государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина [2 - 5].

На основе результатов этих исследований:

- разработан метод расчета удерживающей способности бонового заграждения;
- предложены методы, позволяющие увеличить удерживающую способность бонового заграждения.

Под удерживающей способностью бонового заграждения следует понимать способность бонового заграждения удерживать определенный объем нефти без ее *уноса* в течение длительного времени при данной скорости течения воды в реке.

В ходе исследований [2, 3] установлено, что существуют два режима взаимодействия слоя нефти на поверхности водотока с боновым заграждением: *поверхностно-гладкий режим* (ПГР) и *поверхностно-волновой режим* (ПВР). Для каждого из этих режимов предложены решения для расчета и повышения удерживающей способности бонового заграждения.

Методы расчета удерживающей способности бонового заграждения

Поверхностно-гладкий режим. Как показали проведенные исследования, определить удерживающую способность бонового заграждения – это значит установить зависимость величины объема нефти $V_{\text{н}}$, удерживаемого боном, от глубины погружения бонового заграждения h и скорости течения v .

$$V_{\text{н}} = f(h, v). \quad (1)$$

В соответствии с этим метод расчета удерживающей способности бонового заграждения включает три задачи:

1. Определить объем нефти $V_{\text{н}}$, удерживаемый боновым заграждением, имеющим глубину погружения h на водотоке, со скоростью течения v .
2. Определить, какую глубину погружения h должно иметь боновое заграждение, чтобы удерживать заданный объем нефти $V_{\text{н}}$ на водотоке с известной скоростью потока v .
3. Определить, до какого значения скорости потока v в водотоке боновое заграждение с глубиной погружения h будет удерживать заданный объем нефти $V_{\text{н}}$.

Первая задача возникает в случае, когда необходимо определить какой объем нефти удержит боновое заграждение. К примеру, на предприятии трубопроводного транспорта имеется боновое заграждение с глубиной погружения h . Из планов ликвидации аварий известно, что при аварии на конкретном подводном переходе объем вылившейся нефти составит $V_{\text{н}}$, а скорость течения воды в реке равна v . Требуется узнать, сможет ли имеющееся боновое заграждение удержать весь объем вылившейся нефти.

Вторая задача возникает на стадии разработки планов ликвидации аварий [6] при подборе бонового заграждения, когда необходимо определить, какой глубиной погружения h должен обладать бон, чтобы он мог удержать известный объем нефти V_n , на реке скоростью потока u . Вторая задача возникает также тогда, когда нужно разработать новую конструкцию бонового заграждения для данных условий (скорость течения реки v и объем вылившейся нефти V_H), определив для этого глубину погружения бона h .

При решении второй задачи следует учитывать, что глубина бонового заграждения ограничена процессами уноса нефти. Эти процессы заключаются в том, что при большой глубине погружения бона интенсифицируются процессы, связанные с отрывом потока от нижней кромки бона, что способствует уносу нефти и снижает удерживающую способность бонового заграждения.

Третья задача будет иметь более узкое применение, так как в реальных условиях скорость потока всегда известна и требуется определить либо объем нефти, удерживаемый боновым заграждением, при известной глубине погружения бона h (первая задача), либо найти глубину погружения бона h для известного объема вылившейся нефти V_H (вторая задача). Третья задача может рассматриваться для случая, когда требуется определить, при каких значениях скорости течения реки o боновое заграждение с глубиной погружения h будет удерживать известный объем нефти V_n .

При решении каждой из указанных задач прежде всего необходимо определить скорость, при которой происходит смена режима, для чего используется формула, полученная по результатам экспериментальных исследований:

$$\bar{v} = 3,6 \cdot v_n^{1/3} \cdot g^{1/3} - 0,0001 \frac{\sigma_{n-в}}{\Delta\rho \cdot v_n}, \quad (2)$$

где $\sigma_{n-в}$ – коэффициент поверхностного натяжения на границе контакта «нефть – вода», кг/с²; $\Delta\rho = \rho_n - \rho_в$ – разность плотностей, кг/м³; ρ_n – плотность нефти, кг/м³; $\rho_в$ – плотность воды, кг/м³; v_n – кинематическая вязкость нефти, м²/с; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Если скорость реки v будет меньше скорости \bar{v} ($v < \bar{v}$), то наблюдается ПГР, если $v \geq \bar{v}$ – ПВР.

Представленный метод расчёта удерживающей способности боновых заграждений предназначен для режимов, при которых слой нефти взаимодействует с боновым заграждением в режиме ПГР.

Для решения *первой задачи* объем нефти V_n , удерживаемый боновым заграждением, определяем по формуле, полученной из аналитического решения задачи обтекания потоком воды бонового заграждения, удерживающего слой нефти на свободной поверхности воды [4, 7]:

$$V_n = \frac{B \cdot h^4 \cdot g}{12 \cdot v_n \cdot v}. \quad (3)$$

Для решения *второй задачи* глубину бонового заграждения находим по формуле [4, 7]:

$$h = \sqrt[4]{\frac{12 \cdot V_n \cdot v_n \cdot v}{B \cdot g}}. \quad (4)$$

Для решения *третьей задачи* скорость течения реки v , при которой боновое заграждение с глубиной погружения h удержит объем нефти V_n , определяем из формулы (3):

$$v = \frac{B \cdot h^4 \cdot g}{12 \cdot v_n \cdot V_n}. \quad (5)$$

При решении *третьей задачи* следует иметь в виду, что скорость v (5) должна быть меньше скорости \bar{v} (2), так как формула (5) справедлива только для режима ПГР.

Примеры расчета

Пример 1. Для ликвидации аварии на подводном переходе магистрального нефтепродуктопровода согласно Плану ликвидации аварий были направлены боновые заграждения с глубиной погружения $h_{бз} = 0,2$ м. Определить объем бензина $V_б$, удерживаемого боновым заграждением.

Исходные данные: глубина погружения бонового заграждения $h = 0,2$ м; скорость реки $v = 0,25$ м/с; вязкость бензина $v_б = 6 \cdot 10^{-7}$ м²/с; плотность бензина $\rho_б = 745$ кг/м³; коэффициент поверхностного натяжения на границе контакта «бензин – вода» $\sigma_{б-в} = 0,044$ кг/с²; ширина водотока $B = 10$ м.

Этот пример соответствует первой задаче. Определяем режим (ПГР или ПВР). Для этого по формуле (2) рассчитываем скорость, при которой происходит смена режима

$$\bar{v} = 3,6 \cdot v_n^{1/3} \cdot g^{1/3} - 0,0001 \frac{\sigma_{н-в}}{\Delta\rho \cdot v_n} = 3,6 \cdot (6 \cdot 10^{-7})^{1/3} \cdot 9,81^{1/3} - 0,0001 \frac{0,044}{(1000 - 745) \cdot 6 \cdot 10^{-7}} = 0,27 \text{ м/с.}$$

Так как $\bar{v} > v$, то режим ПГР. Объем бензина V_6 , удерживаемый боновым заграждением, находим по формуле (3):

$$V_6 = \frac{B \cdot h^4 \cdot g}{12 \cdot v_6 \cdot v} = \frac{10 \cdot 0,2^4 \cdot 9,81}{12 \cdot (6 \cdot 10^{-7}) \cdot 0,20} = 87200 \text{ м}^3.$$

При решении *первой задачи* может оказаться, что объем нефти V_n , который способно удержать боновое заграждение, будет меньше вылившегося объема нефти \bar{V} . В этом случае устанавливают дополнительные линии боновых заграждений. Общее количество линий рассчитывается по формуле (6):

$$m = \frac{\bar{V}}{V_n}. \tag{6}$$

Расход нефти, поступающий к боновому заграждению, принимается равным расходу нефти, вытекающему из аварийного отверстия нефтепровода $Q_{авр}$.

После того как объем нефти, задерживаемый боновым заграждением, станет равным V_n , последующий приток нефти приведет к ее уносу за боновое заграждение. Расход уноса нефти будет равен расходу нефти, поступающему к боновому заграждению $Q_{авр}$. Чтобы унос нефти не происходил, необходимо откачивать нефть нефтесборными устройствами (НСУ) с расходом, равным расходу $Q_{авр}$. Если производительность одного нефтесборного устройства равна $Q_{нсу}$, тогда необходимое их количество определится по формуле (7):

$$n = \frac{Q_{авр}}{Q_{нсу}}. \tag{7}$$

Время $T_{ин}$ с момента подхода нефтяного пятна к боновому заграждению до момента уноса нефти определяется по формуле (8):

$$T_{ин} = \frac{V_n}{Q_{авр}}. \tag{8}$$

Пример 2. Произошла авария на подводном переходе нефтепровода через реку Уща. Скорость течения реки составляет 0,12 м/с, а объем вылившейся нефти 100 м³. Для предотвращения распространения пятна нефти и его удержания было решено использовать боновые заграждения. Требуется определить необходимую глубину погружения бонового заграждения h .

Исходные данные: объем вылившейся нефти $V_n = 100 \text{ м}^3$; скорость реки $v = 0,12 \text{ м/с}$; вязкость нефти $\nu_n = 13,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; плотность нефти $\rho_n = 860 \text{ кг/м}^3$; коэффициент поверхностного натяжения на границе контакта «нефть – вода» $\sigma_{н-в} = 0,025 \text{ кг/с}^2$; ширина водотока $B = 10 \text{ м}$.

Этот пример соответствует второй задаче. Определяем режим (ПГР или ПВР). Для этого по формуле (2) рассчитываем скорость, при которой происходит смена режима:

$$\bar{v} = 3,6 \cdot v_n^{1/3} \cdot g^{1/3} - 0,0001 \frac{\sigma_{н-в}}{\Delta\rho \cdot v_n} = 3,6 \cdot (13,5 \cdot 10^{-6})^{1/3} \cdot 9,81^{1/3} - 0,0001 \frac{0,025}{(1000 - 860) \cdot 13,5 \cdot 10^{-6}} = 0,19 \text{ м/с.}$$

Так как $\bar{v} > v$, режим ПГР. Критическую глубину бонового заграждения находим по формуле (4):

$$h = \sqrt[4]{\frac{12 \cdot V_n \cdot \nu_n \cdot v}{B \cdot g}} = \sqrt[4]{\frac{12 \cdot 100 \cdot (13,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,12}{10 \cdot 9,81}} = 0,067 \text{ м.}$$

Для того чтобы удержать 100 м³ разлившейся нефти, нужно, чтобы глубина погружения бонового заграждения была не менее 6,7 см.

Пример 3. При разработке Планов ликвидации аварий было установлено, что при аварии на участке 340,25 – 341,20 км нефтепровода загрязнение попадет в реку Чана. Согласно эпюре слива, количество вылившейся нефти составит $V_0 = 20\,000\text{ м}^3$. Определить, при какой скорости реки v боновое заграждение с глубиной погружения $h = 0,15\text{ м}$ удержит весь объем загрязнения.

Исходные данные: объем вылившегося дизельного топлива $V_0 = 20\,000\text{ м}^3$; вязкость нефти $\nu_n = 13,5 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$; плотность нефти $\rho_n = 860\text{ кг/м}^3$; коэффициент поверхностного натяжения на границе контакта «нефть – вода» $\sigma_{н-в} = 0,025\text{ кг/с}^2$; ширина водотока $B = 10\text{ м}$.

Этот пример соответствует третьей задаче. Скорость течения реки v , при которой боновое заграждение с глубиной погружения h удержит объем нефти V_n , определяем по формуле (5):

$$v = \frac{B \cdot h^4 \cdot g}{12 \cdot \nu_n \cdot V_n} = \frac{10 \cdot (0,15)^4 \cdot 9,81}{12 \cdot (13,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 20000} = 0,15\text{ м/с}.$$

Теперь по формуле (2) рассчитываем скорость, при которой происходит смена режима:

$$\bar{v} = 3,6 \cdot \nu_n^{1/3} \cdot g^{1/3} - 0,0001 \frac{\sigma_{н-в}}{\Delta\rho \cdot \nu_n} = 3,6 \cdot (13,5 \cdot 10^{-6})^{1/3} \cdot 9,81^{1/3} - 0,0001 \frac{0,025}{(1000 - 860) \cdot 13,5 \cdot 10^{-6}} = 0,19\text{ м/с}.$$

Так как $\bar{v} > v$, то режим ПГР, следовательно, наш расчет скорости v верный.

Пример 4. Определить необходимое количество нефтесборных устройств.

Исходные данные: Расход нефти $Q_{авр}$, вытекающий из аварийного отверстия нефтепровода и поступающий к боновому заграждению равен $0,1\text{ м}^3/\text{с}$; производительность одного нефтесборного устройства $Q_{нсу} = 100\text{ м}^3/\text{ч} = 0,028\text{ м}^3/\text{с}$.

Необходимое число НСУ определяем по формуле (7):

$$n = \frac{Q_{авр}}{Q_{нсу}} = \frac{0,1}{0,028} = 3,6 \text{ (принимаем 4 шт.)}.$$

Пути повышения удерживающей способности бонового заграждения

Поверхностно-волновой режим. Рассмотренный метод расчета удерживающей способности бонового заграждения применим только для случая ПГР. Для случая ПВР, из-за сложности гидродинамических процессов на границе взаимодействия потока воды и нижней волновой поверхностью слоя удерживаемой нефти, рассчитать удерживающую способность бонового заграждения пока не представляется возможным. Для этого режима предложены только методы, позволяющие уменьшить унос нефти за боновое заграждение, т.е. увеличить его удерживающую способность.

Первый метод заключается в изменении конструкции бонового заграждения. Здесь предлагаются два решения.

Первое решение связано с увеличением (до некоторых значений) глубины погружения бона. Экспериментально установлено, что с увеличением h объем нефти, удерживаемый боновым заграждением, увеличивается. Однако увеличение h ограничено гидродинамическими процессами обтекания потоком воды бонового заграждения, интенсивность которых увеличивается с увеличением h , что способствует уносу нефти.

Второе конструктивное решение позволяет изменить гидродинамическую картину обтекания потоком воды бонового заграждения. Суть способа заключается в том, что к нижней кромке юбки бонового заграждения присоединяется свободно висящее гибкое полотно 3 (рис. 1), выполненное из гибкого материала и обладающее необходимой жесткостью, которое потоком воды отклоняется, принимая форму плавной кривой. При ее обтекании возникает водоворотная область 4, а линия тока 5 основного потока отклоняется от внутренней поверхности пятна, уменьшая свое воздействие на него [8].

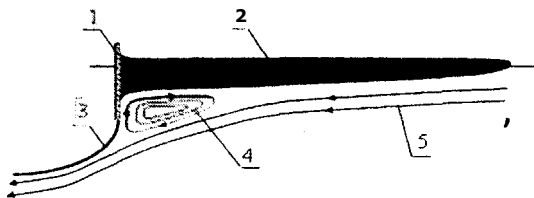


Рис. 1. Обтекание нефтяного профиля:
1 - боновое заграждение; 2 - нефтяное пятно; 3 - гибкое полотно;
4 - водоворотная область; 5 - линия тока

Циркуляционное течение в водоворотной области вдоль поверхности бона и на границе «нефть – вода» направлено таким образом, что препятствует накоплению нефти и сгоняет ее в противоположную сторону от бонового заграждения, тем самым уменьшая вероятность наступления уноса нефти.

Установлено, что объем нефти V_n , удерживаемый боновым заграждением, обратно пропорционален скорости потока воды, нормальной к поверхности бона. На этом основаны методы повышения удерживающей способности бонового заграждения, заключающиеся в уменьшении нормальной составляющей скорости течения реки к поверхности бона.

Один из них состоит в том, что боновые заграждения устанавливаются под углом α к направлению течения реки (рис. 2, а) [9 – 12]. Это позволяет уменьшить нормальную составляющую скорости течения относительно бонового заграждения (рис. 2, б). Принято считать, что допустимая нормальная составляющая скорости течения к боновому заграждению не должна превышать 0,3...0,35 м/с [10, 12], тогда угол α рассчитывается по формуле:

$$\sin \alpha = \frac{\vec{v}_{дон}}{\vec{v}} = \frac{0,3...0,35}{\vec{v}}, \quad (9)$$

где $\vec{v}_{дон}$ – допустимая скорость потока, направленная перпендикулярно бону, принимается 0,3...0,35 м/с; \vec{v} – скорость течения реки, м/с; \vec{v}_n – скорость перемещения нефтяного пятна вдоль бона, м/с.

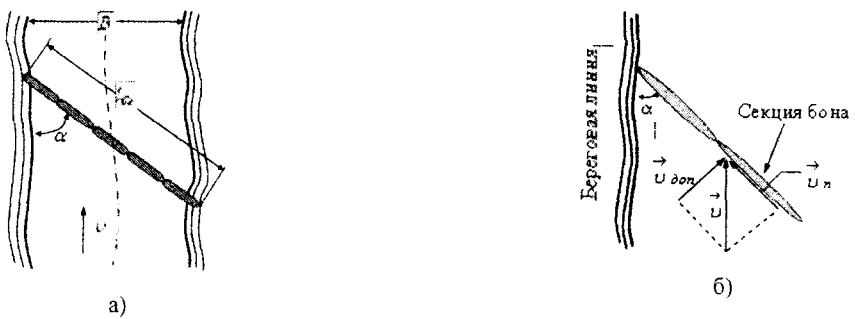


Рис. 2. Установка бонового заграждения под углом α к потоку

Длину бонового заграждения $l_{бз}$ можно определить по формуле (10):

$$l_{бз} = \frac{B}{\sin \alpha}, \quad (10)$$

где B – ширина реки в месте установки бонового заграждения, м.

Другой метод позволяет изменить направление течения поверхностного слоя воды за счет установки перед боновым заграждением направляющих лопаток (рис. 3).

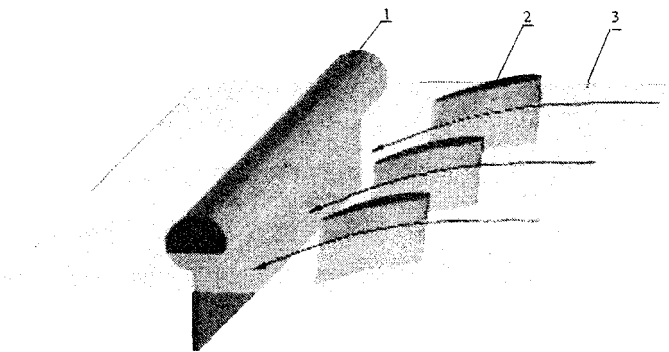


Рис. 3. Использование направляющих лопаток перед боновым заграждением: 1 - боновое заграждение; 2 - направляющие лопатки; 3 - свободная поверхность воды

Как и в случае с установкой бонового заграждения под углом α к направлению течения реки, использование направляющих лопаток позволяет уменьшить нормальную составляющую скорости течения к боновому заграждению, что увеличивает удерживающую способность бона.

Проведенные исследования позволили также усовершенствовать технологию сбора нефтесборными устройствами нефти, удерживаемой боновым заграждением.

Как было выяснено в ходе исследований [2, 3, 7], продольный профиль слоя нефти принимает форму с отчетливо сформированной выпуклой областью (рис. 4). Унос нефти может происходить за счет отрыва нефтяных шариков от этой выпуклой области, имеющей максимальную толщину слоя нефти [2].

Для уменьшения уноса нефти предлагается устанавливать нефтесборные устройства в месте максимальной толщины слоя нефти на расстоянии $(3...5)h$ (см. рис. 4) либо использовать улавливающие бонны, способные вместе с удержанием нефтяного пятна собирать нефть за счет установки на них нефтесборных элементов. Эти элементы могут быть конструктивно вынесены в зону максимальной толщины слоя нефти.

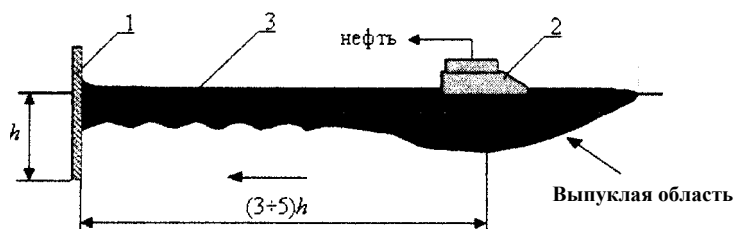


Рис. 4. Установка нефтесборного устройства в месте максимальной толщины слоя нефти:
1 - боновое заграждение; 2 - нефтесборное устройство; 3 - слой нефти

И наконец, в случаях, когда при больших скоростях потока (более 1 м/с) прорыв части нефти под боновое заграждение неизбежен, рекомендуется устанавливать вторую (при необходимости и третью) линию боновых заграждений, перекрывающую все русло реки [13, 14]. Линии располагают на расстоянии 20...30 м друг от друга. Всю задерживаемую бонами нефть необходимо сразу же откачивать нефтесборными устройствами.

Закключение

1. Разработан метод расчета удерживающей способности бонового заграждения, позволяющий определить объем нефти, удерживаемый боновым заграждением, глубину погружения бонового заграждения и установить скорость потока, при которой происходит унос нефти за боновое заграждение.

2. Предложены пути повышения удерживающей способности бонового заграждения, включающие следующие технические решения:

- увеличение глубины погружения бонового заграждения;
- применение свободно висящего гибкого полотна, присоединяемого к нижней кромке юбки бонового заграждения;
- установка бонового заграждения под углом α к направлению течения реки;
- применение направляющих лопаток для изменения направления течения поверхностного слоя воды перед боновым заграждением.

3. Предложены технические решения по уменьшению уноса нефти за боновое заграждение, а именно:

- устанавливать нефтесборные устройства в месте максимальной толщины слоя нефти (см. рис. 4);
- при невозможности удержания всего объема нефти одной линией бонового заграждения устанавливать вторую, а при необходимости и третью, линию боновых заграждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Опыт разработки ПЛА для площадочных и линейных сооружений ЧПУП «Запад-Транснефтепродукт» / П.В. Коваленко, Д.П. Комаровский, М.Н. Маняк и др. // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: Тез. докл. IV межд. научно-тех. конф., Новополоцк, 8-11 окт. 2003 г. / Полоцкий государственный университет. - Новополоцк, 2003. - С. 154.
2. Комаровский Д.П., Липский В.К., Лурье М.В. Взаимодействие слоя нефти на поверхности потока с боновым заграждением // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. - 2002. - Т. 1, №2. - С. 28-34.
3. Комаровский Д.П., Липский В.К. Взаимодействие нефтяного пятна на поверхности водотока с боновым заграждением // Природные ресурсы. - 2002. № 4. - С. 113-116.

4. Комаровский Д.П., Липский В.К., Лурье М.В. Критерий для оценки эффективности работы бонового заграждения на водотоке // Транспорт и хранение нефтепродуктов. - 2002. - № 4. - С. 15-19.
5. Комаровский Д.П. Поведение нефтяного пятна, удерживаемого боновым заграждением: Сб. науч. тр. - Новополоцк: ПГУ, 2003. Вып. 3. - С. 171 - 179.
6. Типовой план ликвидации возможных аварий на магистральных нефтепродуктопроводах: РД 153-39.4-073-01: Утв. Приказом Минэнерго России от 06.06.01 № 165 / М-во энергетики РФ. - М., 2001. - 231 с.
7. Комаровский Д.П., Липский В.К., Лурье М.В. Исследование обтекания бонового заграждения // Безопасность и надежность трубопроводного транспорта: Сб. науч. тр. - Новополоцк: ПГУ, 2000 - Вып. 1. - С. 175 - 182.
8. Лурье М.В., Комаровский Д.П., Липский В.К. Повышение нефтеудерживающей способности бонов // Трубопроводный транспорт нефти. - 2003. - № 12. - С. 31 - 32.
9. Нунупаров С.М. Предотвращение загрязнения моря судами. - М.: Транспорт, 1979. - 336 с.
10. Безопасность пересечений трубопроводами водных преград / К.А. Забела, В.А. Красков, В.М. Москвич, А.Е. Соценко; Под общ. ред. К.А. Забелы. - М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. - 195 с.
11. Типовая технологическая инструкция по очистке загрязненных акваторий морских портов и ликвидации разливов нефти в портах: Проект 7031-000-007: Разработано ЦПКБ 05.04.83. - Одесса, 1983. - 132 с.
12. Инструкция по защите окружающей среды при авариях на нефтепроводах: Утв. приказом концерна «Белнефтехим» от 3.10.2002 г. № 480 / Белорусский государственный концерн по нефти и химии «Белнефтехим». - Мн., 2002. - 136 с.
13. Создание стационарной площадки для ликвидации нефтяного загрязнения на р. Западная Двина / П.В. Коваленко, Д.П. Комаровский, В.К. Липский, Л.М. Спириденко // Трубопроводный транспорт - сегодня завтра: Материалы междунар. науч.-техн. конф. - Уфа: УГНТУ, 2002. - С. 240 - 242.
14. Коваленко П.В., Комаровский Д.П., Спириденко Л.М. Технология и оборудование стационарной площадки для ликвидации нефтяного загрязнения на реке Западная Двина // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: Тез. докл., конф., Минск, 23 - 25 июля 2003 г. / НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь. - Мн., 2003. - Ч. 2. - С. 70 - 71.