

УДК 504.53.064.4

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СЛОЯ НЕФТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОТОКА С БОНОВЫМ ЗАГРАЖДЕНИЕМ

*Д.П. КОМАРОВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент В.К. ЛИПСКИЙ,
доктор техн. наук, профессор М.В. ЛУРЬЕ*

Установлено, что при взаимодействии слоя нефти на поверхности водотока с боновым заграждением могут наблюдаться два режима: поверхностно-гладкий и поверхностно-волновой. Унос нефти, главным образом, зависит от соотношения трех параметров: глубины погружения бонового заграждения, скорости потока и объема нефти. Предложены безразмерные комплексы, позволяющие определить условия уноса нефти, и аналитическая модель.

Введение. Аварии на магистральных нефтепроводах часто приводят к залповому сбросу разлившейся нефти в водные объекты. Вероятность такого развития аварии особенно велика для нефтепроводов Беларуси, все трассы которых проложены в водосборных бассейнах больших рек, территории которых насыщены большим количеством разнообразных водных объектов. Практически единственным техническим средством, позволяющим прекратить растекание нефти по поверхности водоёма или её движение по поверхности водотока, является боновое заграждение (бон).

Применение боновых заграждений для локализации слоя нефти на поверхности водоёма не создаёт серьезных проблем. Использование боновых заграждений для предотвращения распространения слоя нефти по поверхности водотока ограничено тем, что при определенных условиях происходит перетекание нефти под нижней кромкой бонового заграждения (унос нефти).

В реальных условиях процесс взаимодействия движущегося потока, имеющего на свободной поверхности слой нефти, с боновым заграждением представляет собой сложное гидродинамическое явление. Схематично его можно представить как процесс обтекания открытым потоком воды плоской пластины, расположенной поперек течения и частично погруженной вертикально в поток, на свободной поверхности которого находится слой нефти.

Задачи такого класса, связанные с отрывным обтеканием, достаточно сложны. В рассматриваемом случае задача осложняется тем, что на свободной поверхности имеется слой нефти. Известные аналитические решения, полученные для этого случая [1 – 5], построены на весьма упрощенных схемах, не учитывают ряд важных факторов и дают приблизительные результаты.

Более полное исследование взаимодействия потока со слоем нефти на свободной поверхности с боном может быть осуществлено путём проведения на сравнительно небольших лабораторных стендах [5, 6] экспериментальных исследований, которые должны быть направлены на изучение физической картины уноса нефти, определения основных факторов, влияющих на механизм уноса и установление их количественных соотношений. Для обработки результатов таких экспериментов широко используются методы теории размерностей и подобия [7 – 9].

Экспериментальные исследования. Исследования проводились на лабораторной установке [10], основной частью которой является гидродинамический канал длиной 4 м, с размерами поперечного сечения 0,3×0,26 м и с прозрачными боковыми стенками рабочего участка. В качестве модели бонового заграждения была принята модель типа «вертикальная стенка», представляющая собой плоскую пластину из органического стекла толщиной 3 мм, вертикально установленную поперек потока воды на глубину h .

Экспериментальные исследования включали в себя визуальные наблюдения за поведением нефтяного пятна и инструментальные измерения. В ходе экспериментов изменялись значения таких величин, как скорость потока (0,12 – 0,22 м/с), глубина погружения пластины (1 – 5 см), объём нефти, находящейся перед пластиной (200 – 1000 мл), которые устанавливались при настройке экспериментальной установки, и толщина слоя нефти δ и длина нефтяного пятна перед пластиной L , которые измерялись инструментально.

Визуальные наблюдения за поведением слоя нефти и процессом перетекания нефти через нижнюю кромку пластины показали, что продольный профиль слоя нефти перед боном может принимать две различные формы. При небольших значениях скоростей продольный профиль принимает форму «клина», для которого характерно постепенное увеличение толщины слоя по длине от его свободного края до поверхности пластины, где толщина слоя имеет максимальное значение δ_{max} (рис. 1).

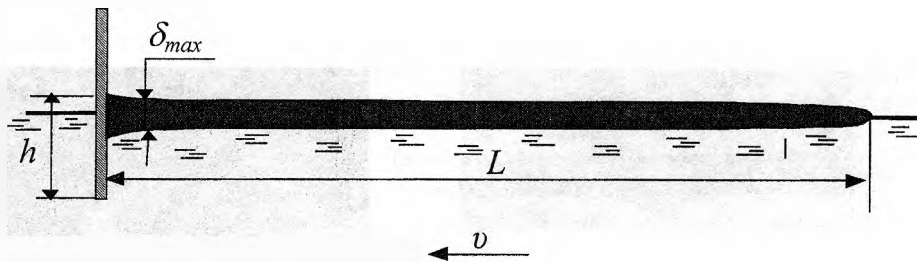


Рис. 1. Профиль нефтяного пятна в форме «клина»

С увеличением скорости потока нижняя поверхность слоя нефти приобретает волнообразную форму (рис. 2) с образованием отчётливо выраженной выпуклой в сторону потока областью. Максимальная толщина слоя находится в точке M .

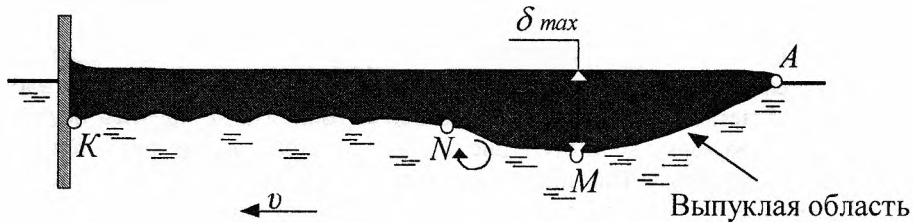


Рис. 2. Волнообразная форма пятна

Изменение формы продольного профиля слоя нефти является следствием изменения характера взаимодействия двух фаз «вода – нефть» на границе их раздела при относительном движении воды. При сравнительно небольших скоростях поток воды увлекает за собой слой нефти, движению которой препятствует пластина, вследствие чего толщина слоя нефти перед пластиной возрастает. При увеличении скорости потока взаимодействие двух фаз на границе становится более сложным. Поток теряет устойчивость, вследствие чего на поверхности раздела фаз возникают колебания, создающие межфазные волны. Есть все основания констатировать, что при взаимодействии слоя нефти на поверхности водотока с боновым ограждением могут существовать поверхностно-гладкий режим (ПГР) и поверхностно-волновой режим (ПВР). При обоих режимах могут существовать две стадии: а) бон удерживает слой нефти без уноса; б) нефть, удерживаемая боном, перетекает через нижнюю кромку пластины (бонового ограждения).

При наблюдениях отмечено, что при ПГР с уменьшением глубины погружения пластины h толщина слоя δ увеличивается, а его длина L уменьшается. При некоторой глубине h толщина слоя становится равной глубине погружения пластины (рис. 3). Этот случай соответствует началу уноса нефти при поверхностно-гладком режиме и является критическим ($\delta_{кр} = h_{кр}$). Устойчивый унос нефти наступает, когда глубина погружения пластины меньше критического значения ($h < h_{кр}$) и связан с перетеканием нефти через нижнюю кромку пластины (рис. 4).

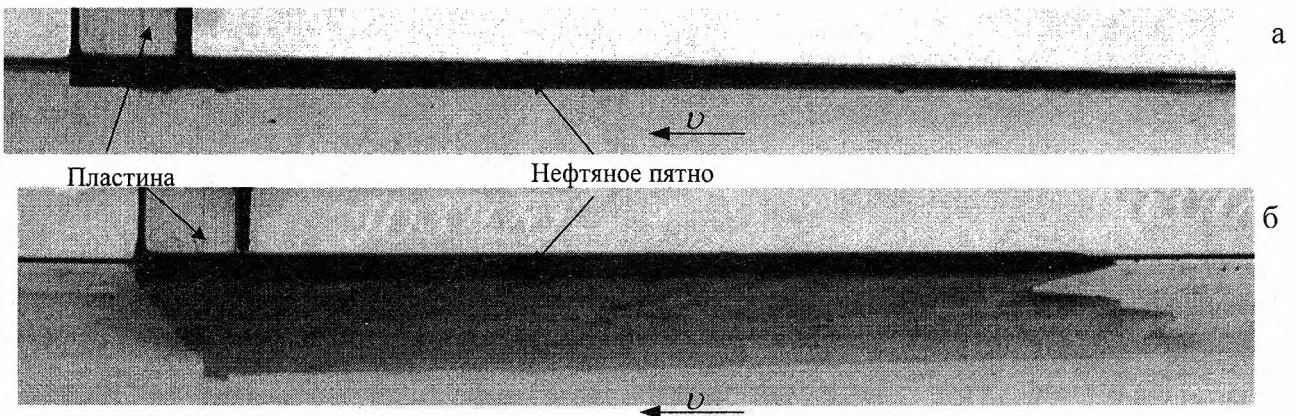


Рис. 3. Начало уноса нефти ($V = 400$ мл; $v = 0,15$ м/с, $\delta_{кр} = h_{кр}$): а – вид сбоку; б – вид снизу

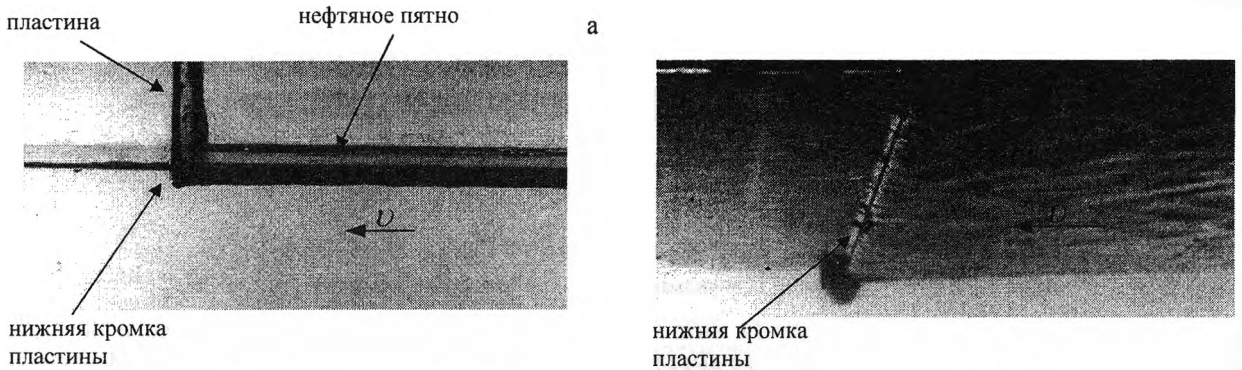


Рис. 4. Перетекание нефти через нижнюю кромку пластины ($V = 400$ мл; $v = 0,12$ м/с; $h < h_{кр}$):
а – вид сбоку; б – вид снизу

При переходе ПГР в ПВР можно наблюдать, что образующаяся выпуклая область представляет собой своеобразное «препятствие», которое обтекает потоком жидкости, за которым вдоль участка $M-N$ образуется вихревая область с циркуляцией по часовой стрелке. По внутренней поверхности пятна на участке $N-K$ движутся межфазные волны (см. рис. 2 и рис. 5). Волны возникают у точки N и распространяются по направлению течения к пластине. При приближении к пластине высота волны увеличивается, а ее длина уменьшается. Высота волн и их период изменяются случайным образом, поэтому межфазные волны можно отнести к нерегулярным.



Рис. 5. Межфазные волны на внутренней поверхности пятна (вид снизу): $v = 0,20$ м/с; $V = 400$ мл; $h = 2,0$ см

С уменьшением глубины погружения пластины h интенсивность волнообразования возрастает, высота волны становится больше, волны все сильнее набегают на пластину. При некотором значении h наступает *критический случай*, при этом в отличие от критического случая для пятна в форме «клина» (см. рис. 3) толщина пятна меньше критической глубины погружения пластины ($\delta_{кр} < h_{кр}$).

При дальнейшем уменьшении глубины погружения пластины ($h < h_{кр}$) происходит унос нефти (рис. 6), связанный с тем, что межфазные волны, перемещающиеся по внутренней поверхности пятна, подходя к пластине, увеличивают свою высоту и перехлестывают через нижнюю кромку пластины.

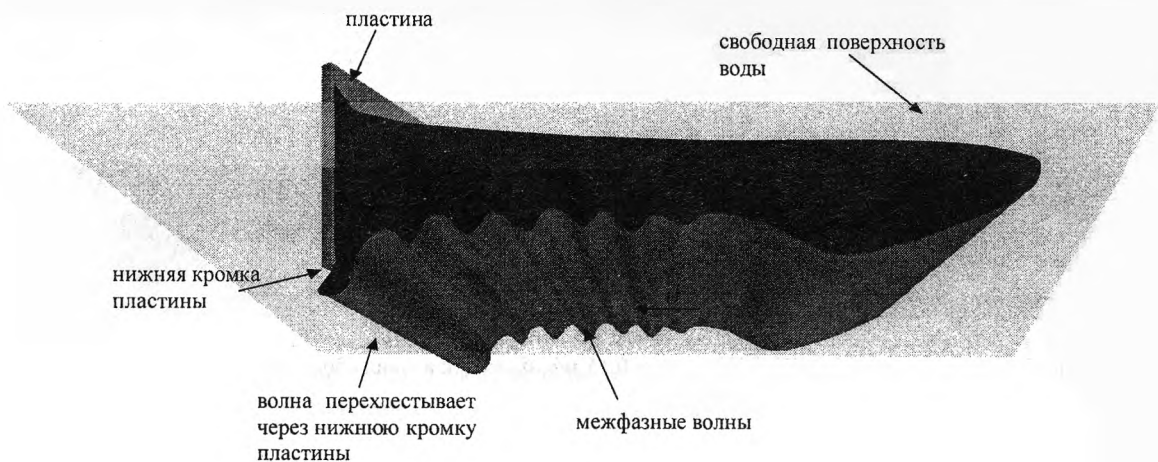


Рис. 6. Перехлестывание нефти через нижнюю кромку пластины (вид снизу)

Наблюдения показали, что процесс взаимодействия слоя нефти на поверхности потока с боновым заграждением (удержание или унос нефти) может происходить при разных переходящих (при изменении условий) один в другой режимах. Для иллюстрации явления существования двух режимов может быть допустима некая внешняя аналогия с существованием двух режимов течения жидкости (ламинарного и турбулентного), двух режимов течения безнапорных потоков в открытых руслах (спокойных и бурных) или двух режимов обтекания плохообтекаемых тел (безотрывных и отрывных).

Существование ПГР, по всей видимости, определяется соотношением сил вязкости и сил инерции. Зарождение ПВР также связано с действием этих сил, однако появление неустойчивости приводит к волнообразованию, что влечёт за собой, с одной стороны, включение в действие гравитационных сил, с другой – переход к стохастическому характеру взаимодействия, присущего нерегулярным волновым процессам. Это существенно усложняет характер гидродинамических процессов, происходящих при поверхностно-волновом режиме взаимодействия слоя нефти с боном, а, следовательно, создаёт трудности в изучении этого режима.

Критическая глубина погружения. Наблюдения показали, что удерживающая способность бонового заграждения определяется соотношением трех параметров, а именно: глубины погружения боны h , скорости потока v и объема нефти V перед боновым заграждением. Унос нефти происходит, когда глубина бонового заграждения меньше некоторого критического значения $h_{кр}$, которое является минимально необходимой глубиной, обеспечивающего полное удержание нефти.

Для определения зависимости $h_{кр} = f(V, v)$ были проведены инструментальные измерения, результаты которых представлены на рис. 7 и 8.

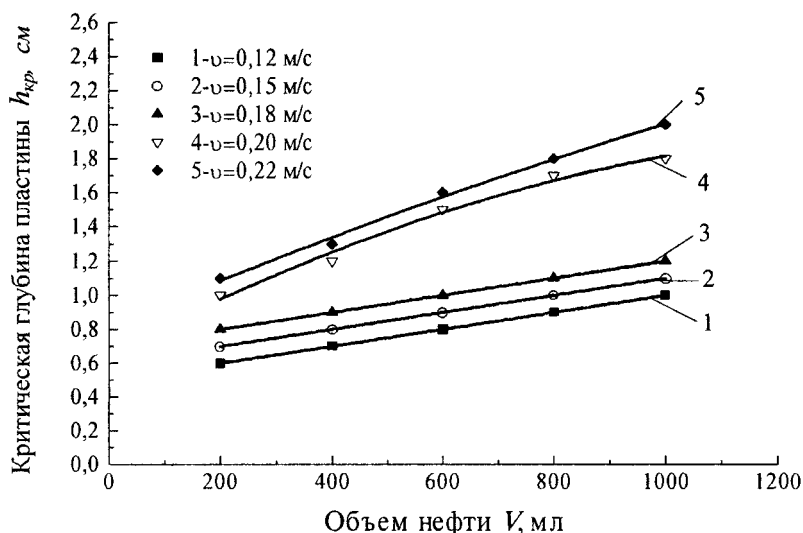


Рис. 7. График зависимости критической глубины погружения пластины $h_{кр}$ от объема нефти V

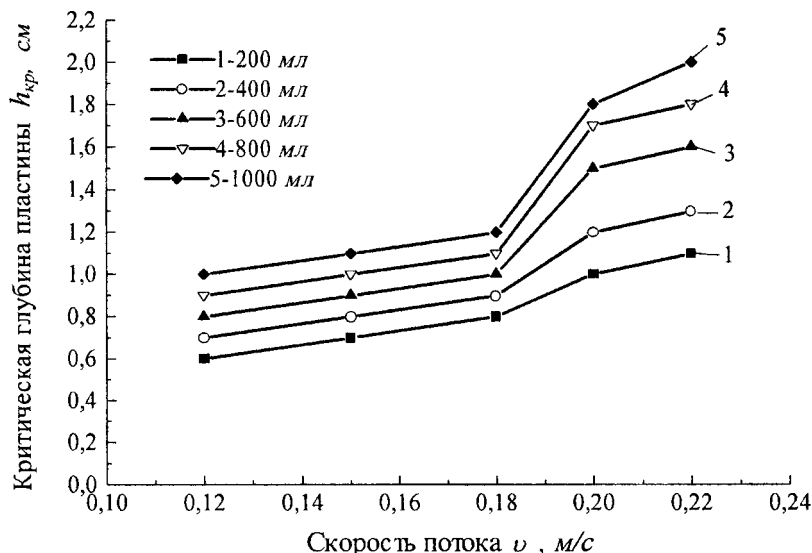


Рис. 8. График зависимости критической глубины погружения пластины $h_{кр}$ от скорости потока v

Как видно из рис. 7, с увеличением объема нефти критическая глубина $h_{кр}$ увеличивается, причем кривые при меньших значениях скоростей проходят выше и круче, чем кривые, соответствующие большим значениям. Это объясняется тем, что с увеличением объема нефти увеличивается толщина пятна, а при скоростях 0,2 и 0,22 м/с возникают межфазные волны, что дополнительно оказывает влияние на значение критической глубины.

Зависимость критической глубины от скорости потока (см. рис. 8) показывает, что с увеличением скорости критическая глубина также увеличивается, особенно резкое увеличение наблюдается для скоростей 0,2 и 0,22 м/с и объемов 600, 800 и 1000 мл, что также связано с межфазными волнами. Подобные эксперименты были проведены также с бензином.

Безразмерные комплексы. Полученные экспериментальные данные для критического случая ППР представлены в безразмерном виде. В этом случае условия наступления уноса определяются следующими параметрами:

$$V = f(h_{кр}, v, V, \rho_n, \mu_n, B_n, g), \quad (1)$$

где $h_{кр}$ – критическая глубина погружения бонового заграждения; v – скорость потока; V – объем нефти перед боновым заграждением; ρ_n – плотность нефти; μ_n – динамическая вязкость нефти; B_n – ширина нефтяного пятна; g – ускорение свободного падения.

Размерность всех входящих в зависимость (1) величин можно выразить с помощью трех основных переменных M , L и T (масса, длина, время) следующим образом:

$$\begin{aligned} [h_{кр}] &= [L]; & [v] &= [L][T]^{-1}; & [V] &= [L]^3; & [\mu_n] &= [M][L]^{-1}[T]^{-1}; \\ [\rho_n] &= [M][L]^{-3}; & [B_n] &= [L]; & [g] &= [L][T]^{-2}. \end{aligned}$$

В (1) входит семь переменных $n = 7$ при трех основных величинах $m = 3$ (масса, длина, время). Согласно π -теореме можно составить $7 - 3 = 4$ безразмерных комплекса, описывающих зависимость (1)

$$f\left(\frac{h_{кр}}{B_n}; \frac{V}{h_{кр}^2}; Fr_{кр}; Re\right) = 0. \quad (2)$$

Два первых безразмерных комплекса, составленные только из геометрических параметров, удобно объединить в один

$$f\left(\frac{V}{h_{кр}^2 \cdot B}; Fr_{кр}; Re\right) = 0, \quad (3)$$

где $\bar{V} = \frac{V}{B_n \cdot h_{кр}^2}$ – представляет собой безразмерный объем (можно также интерпретировать, как безразмерную толщину слоя);

$$Fr_{кр} = \frac{v^2}{g \cdot h_{кр}} - \text{число Фруда};$$

$$Re = \frac{v \cdot h_{кр} \cdot \rho_n}{\mu_n} = \frac{v \cdot h_{кр}}{\nu_n} - \text{число Рейнольдса}.$$

Полученные комплексы могут быть представлены в виде критериальной зависимости

$$Fr_{кр} = f\left(\frac{Re}{\bar{V}}\right) \quad (4)$$

Результаты экспериментов, проведенных с нефтью и бензином, представленные в виде безразмерных комплексов в соответствии с соотношением (4), даны на рис. 9.

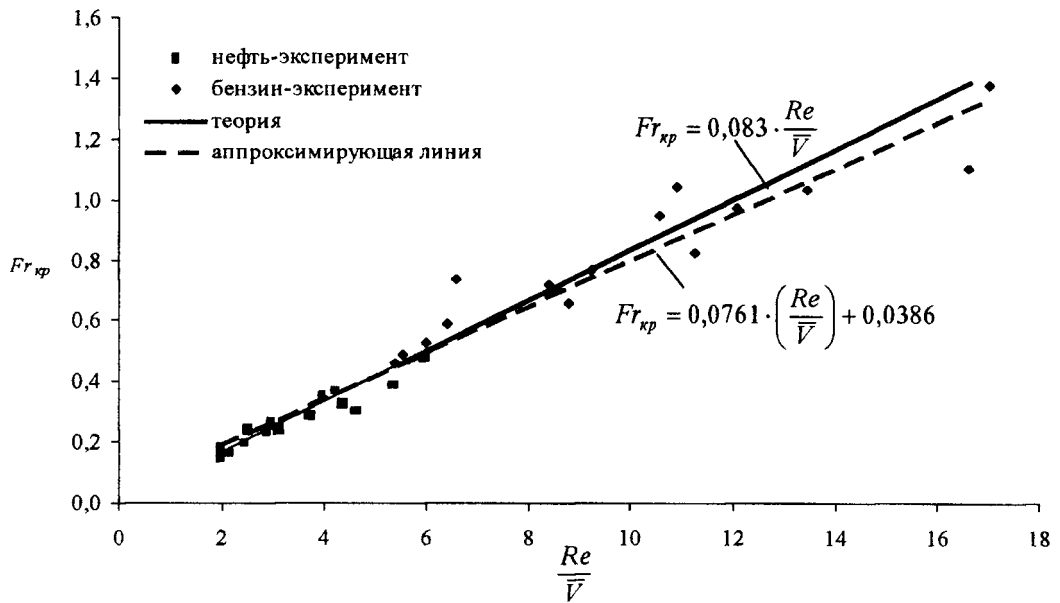


Рис. 9. График зависимости числа $Fr_{кр}$ от $\frac{Re}{\bar{V}}$

Как видно из графика, экспериментальные точки хорошо аппроксимируются линейной зависимостью (штриховая линия). С помощью регрессионного анализа получено уравнение этой линии

$$Fr_{кр} = 0,0761 \cdot \left(\frac{Re}{\bar{V}}\right) + 0,0386$$

Область над линией – область уноса, область под линией – область отсутствия уноса.

Полученные экспериментальные данные позволяют также установить эмпирическую зависимость для определения $h_{кр}$

$$h_{кр} = \frac{1,86 \cdot \nu^{0,26} \cdot V^{0,25} \cdot \nu_n^{0,25}}{g^{0,26} \cdot B_n^{0,25}} \quad (5)$$

Средняя относительная погрешность результатов эксперимента и значений, рассчитанных по формуле (5), составляет 6,5 %.

Критерий уноса. Для поверхностно-гладкого режима на основе уравнения Навье – Стокса получена аналитическая модель [11]. Модель позволила получить выражение для определения критического значения глубины погружения бона

$$h_{кр} = 4 \sqrt{\frac{12 \cdot V_n \cdot \nu_n \cdot \nu}{B_n \cdot g}}, \quad (6)$$

которое позволяет определить осадку бонового заграждения, если известна скорость потока ν объем V_n и вязкость ν_n нефти и ширина нефтяного пятна B_n .

Представим выражение (6) в безразмерном виде

$$1 = 3 \sqrt{\frac{12 \cdot \nu_n \cdot \nu^2 \cdot V}{B_n \cdot h_{кр} \cdot h_{кр}^2 \cdot \nu \cdot g}} = 3 \sqrt{\frac{12 \cdot Fr_{кр} \cdot V}{Re \cdot B_n \cdot h_{кр}^2}} \Rightarrow 1 = \frac{12 \cdot Fr_{кр} \cdot \bar{V}}{Re} \quad (7)$$

Выражение (7) можно записать как

$$K = \frac{Fr_{кр} \cdot \bar{V}}{Re} = \frac{1}{12} = 0,083 \quad (8)$$

Тогда равновесное состояние нефтяного пятна, удерживаемого боновым заграждением, описывается условием $K = 0,083$. Таким образом, безразмерный параметр (8) служит критерием уноса, показывающим, удерживается ли нефтяное пятно боновым заграждением или нет. Если $K \leq 0,083$, боновое загра-

ждение удерживает нефтяное пятно, если $K > 0,083$, то эффективность заграждения снижается и начинает наблюдаться унос нефти.

Полученный критерий (8) можно интерпретировать графически (рис. 9 – сплошная линия) в зависимости числа $Fr_{кр}$ от соотношения Re/\bar{V} , в этом случае зависимость будет иметь линейный характер, а уравнение линии примет вид

$$Fr_{кр} = 0,083 \cdot \frac{Re}{\bar{V}}. \quad (9)$$

Теоретическая линия – это критическая линия, область над линией – область уноса нефти, область под линией – область отсутствия уноса нефти. Как видно из рис. 9, теоретическая прямая хорошо описывает экспериментальные точки, коэффициент корреляции равен 0,98.

График на рис. 9 и выражения (5, 6, 8) получены для случая, когда пятно принимает форму «клина». Если пятно принимает волнообразную форму, то в этом случае на унос оказывают действие сложные волновые процессы, которые требуют более детального описания.

Выводы:

1. Установлено, что при взаимодействии слоя нефти на поверхности водотока с боновым заграждением могут существовать поверхностно-гладкий и поверхностно-волновой режимы. Выявлено, что при ПГР продольный профиль нефтяного слоя принимает форму «клина», а при ПВР – волнообразную форму.

2. Показано, что интенсивный унос нефти наступает, когда глубина бонового заграждения меньше критического значения: при ПГР унос происходит в виде перетекания нефти через нижнюю кромку бонового заграждения, а при ПВР – в виде перехлестывания межфазных волн, распространяющихся по внутренней поверхности пятна.

3. С использованием методов теории размерностей при обработке экспериментальных значений для критического случая ПГР получен критериальный график (см. рис. 9), позволяющий определить условия наступления уноса нефти, а также выражение (5) для определения критической глубины $h_{кр}$ погружения бонового заграждения.

4. Для критического случая ПГР разработана аналитическая модель (6) для расчета критической глубины $h_{кр}$ погружения бонового заграждения. На основе модели разработан критерий уноса нефти (8), позволяющий установить, произойдет унос нефти или нет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jones W. T. Instability at an Interface Between Oil and Flowing Water // Journal of Basic Engineering. – 1972. – Vol. 94. – P. 874 – 878.
2. Leibovich S. Oil Slick Instability and the Entrainment Failure of Oil Containment Booms // ASME Journal of Fluids Engineering. – 1976. – Vol. 98. – P. 98-105.
3. Kordyban E. The Behavior of the Oil-Water Interface at a Planar Boom // ASME Journal of Energy Resource Technology. – 1990. – Vol. 112. – P. 90 – 95.
4. Ertekin R. C., Sundararaghavan H. The calculation of the instability criterion for a uniform viscous flow past an oil boom // Trans. ASME. Journal Offshore Mech. and Arct. Eng. – 1995. – Vol. 117, № 1. – P. 24 – 29.
5. Sundararaghavan H., Ertekin R.C. Near-boom oil-slick instability criterion in viscous flows and of free-surface boundary conditions // Trans. ASME. Journal energy resource technology. – 1997. – Vol. 119, № 1. – P. 26 – 33.
6. Руденко С.В. Взаимодействие бонового заграждения с нефтяным пятном при локализации и сборе нефти на акватории портов: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.22.18 / Одесский ин-т инженеров морского флота. – Одесса, 1988. – 19 с.
7. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1972. – 440 с.
8. Эпштейн Л.А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов. – Л.: Судостроение, 1970. – 208 с.
9. Лурье М.В. Техника научных исследований. Размерность, подобие и моделирование явлений в проблемах транспорта и хранения нефти и газа. – М.: Нефть и газ, 2002. – 111 с.
10. Комаровский Д.П., Стеняева Ю.В. Экспериментальная установка для исследования моделей боновых заграждений // Безопасность и надежность трубопроводного транспорта. Сб. науч. тр. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – Вып. 2. – С. 159 – 172.
11. 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.