

УДК 628.16:665.6

**ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ
НА ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ**

*канд. техн. наук, доц. В.Е. САВЕНКО, В.Р. ИЗМАЙЛОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Наибольшую опасность для окружающей среды представляют аварии, приводящие к разливу нефти и нефтепродуктов на водных объектах. При аварийных разливах нефти на водных объектах первоочередной задачей является локализация нефтяного пятна. В данной работе нами рассмотрены технические аспекты локализации аварийных разливов нефти на водных объектах в сложных климатических условиях. Разработаны и предлагаются к эксплуатации различные модификации зимних механических бонов, работа которых более эффективна за счет технического решения, обеспечивающего совмещение функций улавливания, локализации и сбора нефтяных загрязнений одним устройством, и технология локализации нефтяных загрязнений на водотоках во время ледохода. Представлена методика расчета сил и средств, необходимых для ликвидации аварии. Данная методика реализована в разработанной компьютерной программе расчета технических средств для ликвидации аварийных разливов нефти.

Введение. Углеводородные природные ресурсы в современном мире играют огромную роль, но их добыча, транспортировка и использование значительно ухудшают окружающую экологическую обстановку. Наибольшую опасность для окружающей среды представляют аварии, приводящие к разливу нефти и нефтепродуктов на водных объектах. Нефть и нефтепродукты легко растекаются по поверхности воды и занимают огромную площадь. Это влечет колоссальные финансовые затраты на ликвидацию последствий нефтяного загрязнения. Первоочередная задача при аварийных разливах нефти на водных объектах – локализация нефтяного пятна.

К одним из механических средств борьбы с нефтяными загрязнениями водных объектов относятся боновые заграждения. Боновые заграждения предназначены: для локализации нефти при ее разливах и увеличения толщины нефтяного слоя путем уменьшения его площади; изменения направления дрейфа нефтяного пятна; защиты береговой полосы. Их также применяют для окружения пирсов, производящих нефтеналивные операции и перекрытия входов в порты, гавани и другие участки закрытой акватории. В настоящее время известно более 150 видов боновых заграждений, и как техническое средство они довольно подробно испытаны и описаны [1].

В данной работе нами рассмотрены технические аспекты локализации аварийных разливов нефти на водных объектах в сложных климатических условиях.

Локализация нефтяных загрязнений на водных объектах с помощью боновых заграждений в летний период не представляет особой технической сложности. Значительно усложняется задача по локализации нефтяных загрязнений зимой и в переходный климатический период, во время ледохода. Нами разработаны и предлагаются к эксплуатации различные модификации зимних механических бонов, работа которых более эффективна за счет технического решения, обеспечивающего совмещение функций улавливания, локализации и сбора нефтяных загрязнений одним устройством [2 – 4].

Механический улавливающий бон [2] включает несколько соединенных между собой секций, каждая из которых состоит из фартука и размещенного перед ним нефтеприемника, сообщающегося с нефтесборной емкостью и имеющего внутри одну или несколько нефтеприемных труб с входными отверстиями. Фартук установлен с возможностью вертикального перемещения относительно нефтеприемника, на одном торце которого размещен внутренний, а на другом внешний патрубки для соединения нефтеприемников соседних секций в коллектор, при этом входное отверстие каждой нефтеприемной трубы размещено снизу. Секция имеет два опорных элемента, представляющих собой рамную конструкцию и для удобства переноски снабжена ручками.

Механический улавливающий бон работает следующим образом. По всей ширине водотока изготавливают траншею во льду шириной, равной ширине устройства. К фартуку каждой из секций спереди (относительно течения водотока) закрепляют нефтеприемник, на требуемой (в зависимости от толщины льда) высоте. Необходимое количество секций устройства соединяют между собой, причем нефтеприемники каждой из секций также соединяют между собой, образуя общий коллектор. Нефтеприемник последней секции соединяют с насосным оборудованием или непосредственно с нефтесборной емкостью, в которой устанавливают откачивающий насос. Собранный механический улавливающий бон опускают в траншею во льду на водную поверхность на такую глубину, чтобы разность высот между верхними отверстиями входных нефтеприемных труб и поверхностью льда обеспечивала необходимый напор исте-

чения из нефтеприемных труб улавливаемой нефти. Заданную глубину погружения бона в воду и его расположение относительно верхней поверхности льда обеспечивают опорные элементы. Более точную регулировку напора истекающей из нефтеприемных труб нефти производят навинчиванием регулировочных муфт. Включают насосное оборудование и нефть откачивают из общего коллектора.

Достоинством данного устройства является то, что размеры площади локализации нефтяных загрязнений существенно не снижают качество их сбора, а собираемая из-под льда нефть имеет положительную температуру, что облегчает работу нефтесборного оборудования. При эксплуатации устройства нефтесборная емкость и насосное оборудование могут располагаться на берегу водного объекта.

Для заранее оборудованной стационарной площадки, используемой в качестве постоянного рубежа локализации и сбора аварийных разливов нефти и располагаемой на водотоках вблизи потенциально опасных объектов, разработан механический улавливающий бон зимний шнекороторного типа (МУБЗ-Ш) [3]. Бон изготавливается секциями, которые при установке на водоток механически соединяются между собой. Каждая из секций МУБЗ-Ш включает корпус, на котором имеется две нефтеприемные щели. Внутри корпуса располагается шнек, на обоих концах которого расположены полумуфты с крестовинами. В корпусе на обоих его концах сварены штуцеры с втулкой подшипника скольжения. Вокруг штуцеров обрабатывается резиновая соединительная прокладка, закрепляемая хомутами. В центральной части корпуса, симметрично закрепляются два поплавка. Кроме того, секции устанавливаются под ледяным покровом водотока, поэтому толщина льда не влияет на эффективность работы защитного бонового заграждения, в отличие от аналогов, которые устанавливаются в слое льда и не выполняют свои функции при вморзании в лед и когда лед достигает значительных толщин. Необходимо отметить, что скорость подледного слоя воды, переносящего нефтяные загрязнения, мала, поэтому высоты бонового заграждения, которая зависит от диаметра корпуса секции, вполне достаточно для улавливания нефтяных загрязнений.

Гибкое соединение секций бона между собой с помощью крестовин и резинового соединительного листа обеспечивает плотное прилегание бона к нижней поверхности льда с требуемой ориентировкой приемных окон, даже при неравномерной толщине льда по ширине водотока.

Разработан комбинированный механический бон, который можно использовать при улавливании, локализации и сборе нефти и нефтепродуктов с поверхности водных объектов как в летних, так и в зимних условиях [4]. Комбинированный механический бон изготавливают секциями. Каждая из секций содержит задний фартук, прикрепляемый к поплавку, внутри которого встроен нефтеприемный модуль, имеющий патрубок отвода нефти с гидромеханическим клапаном на верхнем торце и соединенный с общим коллектором, сообщаемым с нефтесборной емкостью. На уровне нижней кромки входных каналов нефтеприемных модулей закреплен сборно-разборный фартук. При работе в зимних условиях передний сборно-разборный фартук в собранном виде представляет собой зимний нефтеприемник; при работе в летних условиях фартук раскладывают, его нефтеприемные трубы закрывают заглушками и он выполняет свою основную функцию – локализацию нефтяных загрязнений. При установке в водный объект секции механически соединяют между собой, вариант их сборки зависит от состояния водного объекта.

Комбинированный механический бон могут устанавливать в сочетании с обычными бонами, которые применяют только для улавливания нефтяных загрязнений, в этом случае допускаются различные варианты стыковки.

Наиболее сложной является задача локализации нефтяных загрязнений в весенний (осенний) период во время ледохода. Нами разработана технология локализации нефтяных загрязнений на водотоках во время ледохода [5]. Данной технологией предусмотрено изменение направления движения льдин, для чего на водотоке устанавливается клиновидная рама. Клиновидная рама состоит из трех полых балок (двух боковых и одной продольной), которые обеспечивают ее плавучесть. Фиксацию рамы в заданном месте водотока обеспечивают якоря. Боковые полые балки жестко соединяются между собой под углом, образуя клин навстречу течению водотока, а их задние концы соединены между собой продольной полой балкой. Снизу к балкам крепится стальной перфорированный лист, опущенный в воду. К обоим стыкам шарнирно крепятся две поворотные секции. Секция снабжена верхним надводным фартуком и нижним перфорированным подводным фартуком. Второй конец поворотной секции крепится под углом к берегу. Оба конца секции снабжены дополнительными якорями. Ниже, по течению от рамы, устанавливается многосекционное боновое заграждение любой известной конструкции под углом к водотоку. Установка боновых заграждений перпендикулярно к течению водотока возможна при скорости течения до 0,3 м/с. При скоростях течения больше чем 0,3 м/с боновые заграждения устанавливаются под углом [5]. Предполагается что льдины, скользя по раме, прижимаются к берегу и задерживаются поворотной секцией клиновидной рамы, а нефть проходит беспрепятственно через перфорацию.

Далее технологией предусмотрено два варианта действий. Для малых рек с небольшой скоростью течения предлагается первый вариант, согласно которому, прибывшие к берегу льдины задерживаются поворотной секцией. Затем они затягиваются на берег, где происходит их механическое измельчение, а

осколки битого льда и снежной массы, загрязненные нефтью, направляются в заранее подготовленный отстойник, где после обработки их паром, происходит отстаивание воды с отделением нефти и последующей откачкой нефти нефтесборным устройством. Нефть, прошедшая сквозь перфорированные листы, закрепленные на боковых стойках рамы и нижнего перфорированного фартука поворотной секции, улавливается боновым заграждением, расположенным ниже по течению от рамы, с последующим ее сбором нефтесборным устройством.

Для больших рек (широких водотоков), характеризующихся значительными скоростями течения или значительным удельным покрытием поверхности водотока плавающего льда и его толщиной, предлагается второй вариант. Так как большая скорость подхода льдин к клиновидной раме и их масса не позволяет оперативно извлекать их на берег, поэтому речь идет лишь об удержании льда на определенный период времени с периодическим пропуском его вниз по течению водотока, путем открытия поворотной секции рамы и дополнительного ряда бонового заграждения. В этом случае нефть, проходящая через перфорированные листы рамы и перфорированный фартук поворотной секции, локализуется боновым заграждением с последующим ее улавливанием и откачкой нефтесборными устройствами. Однако это возможно только на период закрытия поворотной секции рамы.

Для использования предлагаемых нами технических средств локализации и ликвидации аварийных нефтеразливов предлагается методика расчета, включающая в себя:

- расчет расстояния установки боновых заграждений;
- расчет количества вылившейся нефти;
- расчет отстойника (котлована);
- расчет сил и средств.

Расстояние от места попадания нефти в реку до места установки бонового заграждения может быть определено по формуле [1]:

$$L = \frac{3600vt}{1000}, \text{ км}, \quad (1)$$

где v – скорость течения реки, м/с, t – время с момента аварии до момента прибытия аварийно-восстановительной бригады (АВБ) и окончания установки бонового заграждения, мин.

Время t определяется следующим образом:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \text{ ч},$$

где t_1 – время с момента аварии до поступления сигнала на аварийно-восстановительный пункт (АВП), ч; t_2 – время на сборы и подготовку аварийных бригад с момента поступления сигнала об аварии до момента выезда на трассу, ч; t_3 – время в пути аварийной бригады от АВП до места установки бонового заграждения, ч; t_4 – время на разворачивание и установку бонового заграждения и нефтесборных устройств, ч.

Проведенные расчеты расстояния от места попадания нефти в реку до места установки бонового заграждения по формуле (1) для различных скоростей течения реки представлены в таблице 1. Принималось расчетное время с момента начала аварии до момента окончания установки бонового заграждения – 3 часа.

Таблица 1

Расстояние установки бонового заграждения (при $t = 3$ ч)

$v_{\text{меч}}, \text{ м/с}$	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1
$t, \text{ ч}$	3	3	3	3	3	3
$L, \text{ км}$	1,08	2,16	3,24	5,4	8,64	10,8

Крайне важным при локализации и ликвидации аварийного разлива нефти является расчет объема нефти, вытекшей из нефтепровода во время аварии. Общий объем нефти V , вытекшей из нефтепровода с момента возникновения аварии до момента закрытия задвижки, проводим по формуле [6]:

$$V = V_1 + V_2, \quad (2)$$

где $V_1 = Q_1\tau_1 = Q_1(\tau_0 - \tau_a)$ – объем нефти, вытекшей до остановки перекачки; $V_2 = Q_2\tau_2 = Q_2(\tau_3 - \tau_0)$ – объем нефти, вытекшей от момента остановки перекачки до закрытия задвижки; τ_a – время возникновения аварии; τ_0 – время остановки перекачки; τ_3 – время закрытия задвижки; Q_1 – расход нефти через место повреждения в промежутке времени $\tau_0 - \tau_a$; Q_2 – расход нефти через место повреждения в промежутке времени $\tau_3 - \tau_0$.

Алгоритм расчета:

1. Если $Q' - Q_0 < 0,015$, то расчет Q_1 производим по формуле:

$$Q_1 = \mu \omega \sqrt{2gh^*}, \quad (3)$$

где h^* – перепад давления в точке истечения; μ – коэффициент расхода отверстия; ω – площадь отверстия; Q_0 – расход нефти в исправном трубопроводе, м³/ч; Q' – расход нефти в поврежденном трубопроводе при работающих нефтеперекачивающих станциях (НПС), м³/ч.

Перепад давления в точке истечения:

$$h^* = \frac{p'}{\rho g} - i_0 x^* - h_T, \quad (4)$$

где x^* – протяженность трубопровода от НПС до места повреждения, м; p' – давление в начале поврежденного участка при работающих НПС, Па; ρ – плотность перекачиваемого продукта, кг/м³; $g = 9,81$ м/с²; i_0 – гидравлический уклон трубопровода; h_T – глубина заложения нефтепровода, м.

2. Если $Q' - Q_0 \geq 0,015$ и при условии $0 \leq N \leq 1,02$, расчет Q_1 производим по формулам (5), (6):

$$Q_1 = Q' - Q_0 \cdot N^{\frac{1}{2-m_0}}; \quad (5)$$

$$N = \frac{z_1 - z_2 + \frac{(p' - p'')}{\rho g} - i_0 x^* \left(\frac{Q'}{Q_0} \right)^{(2-m_0)}}{(l - x^*) \cdot i_0}, \quad (6)$$

где l – протяженность поврежденного участка трубопровода, заключенного между двумя НПС, м; z_1, z_2 – геодезические отметки (м) начала и конца участка l соответственно; p', p'' – давление в начале и конце поврежденного участка l при работающих НПС соответственно, Па; m_0 – показатель режима движения нефти по нефтепроводу согласно [6] $m = 0,25$, тогда $2 - m_0 = 1,75$; $1/(2 - m_0) = 0,571$.

3. Вычисляем общий объем нефти V по формуле (2) с учетом того, что $V_1 = Q_1 \cdot \tau_1 = Q_1(\tau_0 - \tau_a)$, а $V_2 = Q_2 \tau_2 = Q_2(\tau_3 - \tau_0)$.

Нами проведены расчеты объемов утечки по формулам (2) – (6) для рабочих диапазонов давлений на предшествующей и следующей за аварийным участком НПС (рис. 1, 2).

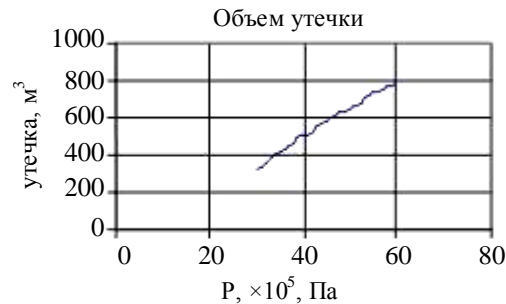


Рис. 1. Зависимость объема утечки от давления на нагнетательной линии станции, предшествующей аварийному участку

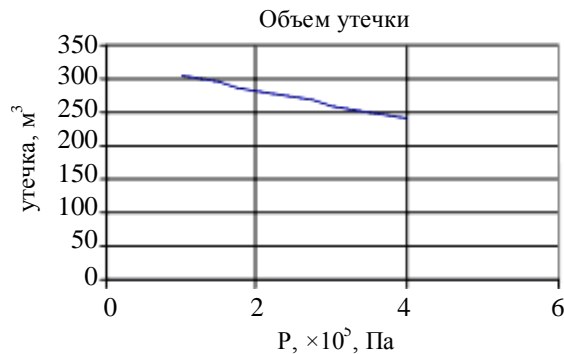


Рис. 2. Зависимость объема утечки от давления на приеме следующей за аварийным участком станции

Длина бонового заграждения для различных скоростей реки, следовательно, различных углов установки и различной ширины реки может быть определена по формулам [1]:

$$L_{\text{бв}} \approx l \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{f}{l} \right)^2 \right], \quad (7)$$

$$l = \frac{B}{\sin \alpha}, \quad (8)$$

где: l – длина пролета, м; B – ширина реки, м; α – угол установки бонового заграждения; f – величина прогиба, м, определяется из соотношения: $\frac{f}{l} = \frac{1}{20}$.

Проведенные расчеты длины бонового заграждения по формулам (7) и (8) для различных скоростей течения реки, различной ширины представлены в таблице 2.

Таблица 2

Длина бонового заграждения, м

$v_{\text{теч.}}, \text{ м/с}$	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1
Угол установки бона, α	90	90	90	30	30	20
Ширина реки, м	50	50,3	50,3	50,3	100,7	147,2
	60	60,4	60,4	60,4	120,8	176,6
	100	100,7	100,7	100,7	201,3	294,4
	150	151	151	151	302	441,5

Согласно предлагаемым нами технологиям для отстаивания и сбора локализованной и уловленной нефти необходим отстойник. В качестве отстойника может быть использован котлован, сооружаемый на берегу водотока, куда уловленная нефть может попадать естественным или принудительным путем. Размеры котлована будут определяться временем расслоения водонефтяной эмульсии. Учитывая непредсказуемость сочетания природных условий, формирующих водонефтяную эмульсию, для расчета котлована можно принять эффективность расслоения не менее 60 %. При строительстве необходимо также учесть, что в начале водотока эмульгированность водонефтяной смеси будет существенно ниже, чем в устье реки, т.е. время расслоения эмульсии будет возрастать по мере ее удаления от места аварии. Площадь поперечного сечения котлована предлагается рассчитывать по формуле [7]:

$$F_3 = \left(\frac{a+c}{2} \right) h_e, \quad (9)$$

где F_3 – сечение отстойника (котлована), м^2 ; a – ширина дна котлована, м; c – ширина котлована по урезу, м; $h_k = H - h_1$ – глубина котлована, м; H – высота дамбы; h_1 – превышение рельефа берега над уровнем воды.

Длину котлована предполагается рассчитывать следующим образом:

$$L = \frac{Q_3}{F_3} \cdot t = \frac{2Q_3 t}{(a+c) \cdot (H-h_1)}, \quad (10)$$

где Q_3 – расход водонефтяной эмульсии, поступающей в отстойник (котлован), $\text{м}^3/\text{с}$; t – расчетное время отстаивания, с.

Таким образом, длина котлована зависит от ширины дна котлована и ширины котлована по урезу, а также от времени расслоения водонефтяной эмульсии. Указанные параметры подбираются экспериментально с учетом климатических условий и естественных складок местности.

Для автоматизации и снижения временных затрат на проведение расчетов по определению сил и средств, необходимых для локализации и ликвидации аварийных разливов, нами разработана компьютерная программа расчета [8]. Перечень основных используемых качественных параметров, определяю-

ших работу программы: расходы нефтепродукта на исправном и аварийном нефтепроводе; плотность нефтепродукта; ширина водотока; скорость течения водотока; диапазон толщин пленки нефти; нефтеемкость сорбционного материала.

В зависимости от исходных данных программа позволяет определить:

- объем вылившейся нефти (нефтепродукта);
- суммарную производительность нефтесборных устройств;
- суммарную длину бонов при размещении их в один и более рядов;
- количество сорбента для различных этапов и вариантов ликвидации аварии.

Применение данной компьютерной программы позволит сократить подготовительный период ликвидации аварии, а также обеспечит более эффективное проведение аварийных работ.

Заключение. Разработанные нами технологии позволяют проводить локализацию и ликвидацию нефтяных загрязнений на водотоках в сложных климатических условиях: зимой и в переходный период года. Эффективность применения данных технологий во многом зависит от целого комплекса организационных и технических мероприятий. Данные мероприятия должны включать в себя предварительную подготовку к проведению аварийных работ по ликвидации нефтяных загрязнений на водотоках, учитывающую все технические аспекты. Оперативность этих работ будет влиять на итоговый результат, поэтому предложенная программа автоматизированного расчета сил и средств является актуальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Защита водных объектов: монография / Д.П. Комаровский [и др.]; под общ. ред. В.К. Липского. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2008. – 220 с.
2. Механический улавливающий бон: пат. 8168, ВУ, МПК E02B 15/04 / В.Е. Савенок, В.К. Липский, П.В. Коваленко; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № a20030085; заявл. 04.02.03; опубл. 30.09.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 3 – С. 102.
3. Защитное боновое ограждение: пат. 8170 C1 ВУ, МПК E02B 15/00, 3/00 / В.Е. Савенок, В.К. Липский, П.В. Коваленко, В.Л. Жук; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № a20030431; заявл. 15.05.2003; опубл. 30.12.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 3.
4. Комбинированный механический бон: пат. 10504, ВУ, МПК E02B 15/04 / В.Е. Савенок, П.В. Воронович; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № a20050790; заявл. 02.08.05; опубл. 30.04.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2.
5. Савенок, В.Е. Технология локализации нефтяных загрязнений на водотоках во время ледохода / В.Е. Савенок, В.Р. Измайлович, Д.В. Габелев // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2008. – Вып. 5. – С. 232 – 238.
6. Инструкция по защите окружающей среды при авариях на нефтепроводах: утв. конц. «Белнефтехим» 03.10.02, № 480 / разррб. В.К. Липский [и др.]. – Минск: Белнефтехим, 2002. – 136 с.
7. Сафаров, А.М. Оптимизация ликвидационных мероприятий при попадании нефти в горный водоток / А.М. Сафаров, Н.М. Миниغازимов // Нефтегазовое дело [Электронный ресурс]. – М., 2007. – Режим доступа: <http://www.ogbus.ru>. – Дата доступа: 25.08.2007.
8. Савенок, В.Е. Автоматизированный расчет технических средств для ликвидации аварийного нефте разлива / В.Е. Савенок, А.Г. Дудин, В.Р. Измайлович // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: материалы VI междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2007. – С. 244 – 245.

Поступила 21.05.2009