

УДК 628.16:665.6"324"

В.Е. Савенок, В.К. Липский,  
Г.П. Бровка

### **АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ, ПОКРЫТЫХ ЛЬДОМ**

Круглогодичная транспортировка нефти и нефтепродуктов, в том числе в зимних условиях, как водным, так и трубопроводным транспортом, заставила обратить серьезное внимание на проблему ликвидации аварийных разливов нефти на водных объектах в зимних условиях.

Для принятия эффективных мер по ликвидации аварий в зимних условиях на водных объектах актуальным является определение характера распространения нефтяных загрязнений подо льдом. Наличие ледяного покрова на водном объекте усложняет определение поведения нефтяного загрязнения подо льдом, оценка которого есть сложная задача, для решения которой необходим целый комплекс исследований. Ряд научных работ различных авторов посвящен определению

характера распространения нефтяных загрязнений на водных объектах и влияния ледяного покрова на это распространение.

Лабораторные испытания распространения нефти в воде при низких температурах ( $t \sim 0^\circ\text{C}$ ), в том числе подо льдом, проводились норвежскими [1,6], канадскими [2, 3, 5, 6], американскими [4] учеными. Однако, ограниченная база данных, обусловленная относительно узкими рамками лабораторных экспериментов, позволяет, по мнению самих исследователей, оценивать полученные результаты как приблизительные. Получение натуральных данных, характеризующих распространение нефтяных загрязнений на водных объектах, в естественных зимних условиях весьма затруднено, поэтому исследователи при составлении математических моделей, описывающих эти процессы, использовали результаты лабораторных испытаний. Так, в работах [7-9] впервые обосновывается предположение, что поверхностное натяжение нефти препятствует ее распространению. А канадскими учеными С. Венкатешем и Х. Таханом [10-12] разработана математическая модель, которая определяет зависимость радиуса распространения нефтяного пятна в холодных водах ( $t \sim 0^\circ\text{C}$ ) от коэффициента поверхностного натяжения нефти:

$$R_p = \frac{K \cdot \sigma^{0.5}}{(\rho_w^2 \cdot \nu_w)^{0.25}} \cdot t^{0.75}, \quad (1)$$

где  $R_p$  - эквивалентный радиус;

$\rho_w$  - плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\nu_w$  - кинематическая вязкость воды,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\alpha$  - коэффициент поверхностного натяжения для данного типа нефти,  $\text{Н/м}$ ;

$K = 2,3$  - постоянный коэффициент;

$t$  - время распространения нефти фиксированного объема, с.

Авторы [10] определяют основные величины, влияющие на распространение нефти на воде. Это вязкость и плотность воды, коэффициент поверхностного натяжения нефти, а так-

же время растекания нефти по поверхности воды без учета времени всплытия нефти под действием силы тяжести. При этом ими также введен эмпирический коэффициент  $K$ . Сравнивая полученную величину радиуса распространения нефти в холодной воде ( $t \sim 0^\circ\text{C}$ ) с радиусом распространения, полученным Фэем в 1971 году [13] для теплой летней воды из соотношения:

$$\hat{R} = 10^3 \cdot F^{0.75}, \quad (2)$$

авторы делают вывод, что радиус распространения в холодной воде в несколько раз меньше для одинаковых фиксированных объемов нефти, чем в теплой воде и, соответственно, толщина пятна нефти в несколько раз больше в холодной воде, чем в теплой.

Рассматривая модель Шульца, предложенную в 1984 г. [14], можно отметить, что в ней вообще не учитывается коэффициент поверхностного натяжения при определении радиуса распространения нефтяного пятна, а лишь определяется зависимость его от вязкости воды

$$R_s = K_s \cdot \{A g V Y \nu\}^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $K_s = 1,45$  - эмпирический коэффициент;

$A$  - относительная плотность (отношение плотности нефти к плотности воды).

Проведя теоретические исследования, основанные на имеющихся в его распоряжении данных о разливах различных типов нефти, Росс [2] усовершенствовал модель Шульца, заменив в ней кинематическую вязкость воды на кинематическую вязкость конкретного типа нефти:

$$R_s = K_s \cdot (A g V > . t'' . \nu_n ; f^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где  $\nu_n$  - кинематическая вязкость нефти,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Правомерность своих теоретических расчетов С. Росс подтвердил затем в лабораторных исследованиях с различ-

ными типами нефти. В этих лабораторных опытах автор также исследовал зависимость времени распространения нефти от вылитого объема для различных типов нефти и время распространения фиксированных объемов различных нефтей на расчетную площадь.

Основываясь на выводах, сделанных в работе Р. Берда [15], определяющих, что вязкость увеличивается с уменьшением температуры и устанавливающих эту зависимость, С. Росс оценивает толщину нефтяного пятна в холодной воде. Для определения толщины нефтяного пятна, образующегося в холодной воде ( $t \sim 0$  °С) в результате разлива в ней нефти, им была предложена приближенная эмпирическая формула, полученная путем корреляции опытных данных

$$\delta = \sqrt[4]{125}, \quad (5)$$

где  $\delta$ , -толщина нефтяного пятна, м;

//-динамическая вязкость нефти, тПа-с.

В этой же работе самим автором признается приближенный характер данной линейной зависимости ввиду ограниченного числа опытных и статистических данных. Для нефти, распространяющейся в холодной воде под ледяным покровом, формула (5) была уточнена в работе [4], которая, также является эмпирической и носит приблизительный характер:

$$\delta = 0,0316 \sqrt[4]{\eta}. \quad (6)$$

Анализ формул (5) и (6) позволяет сделать вывод, что несмотря на то, что вязкость нефти при температуре близкой к 0° одинакова как для нефти, находящейся в холодной воде, так и для нефти под ледяным покровом характер ее распространения различен. Толщина нефтяного пятна и, следовательно, ее площадь может отличаться приблизительно в три раза при одинаковых объемах нефтяного загрязнения. Исходя из этого анализа, можно утверждать, что зависимость толщины нефтяного пятна только от вязкости нефти при ее распространении в холодной воде, особенно под ледяным покровом

вом', носит весьма приблизительный характер и нуждается в корректировке, путем введения дополнительных величин в формулу (6).

В работах [16-18] делается попытка установить площадь распространения нефтяного пятна в холодной воде, покрытой битым льдом, паковым льдом или ледяной шугой. Авторы данных работ устанавливают зависимость площади распространения нефтяного пятна от вида льда и его концентрации, при отсутствии сплошного ледяного покрова, предусматривающую использование известных величин, характеризующих толщину нефтяного пятна

$$S_p = \frac{v}{S, c}, \text{ тогда } K_9 = \sqrt{\frac{f s \bar{7}}{u}}, \quad (7)$$

где  $S_p$  - площадь нефтяного пятна, м<sup>2</sup>;

$S$  - эмпирический коэффициент.

Эмпирический коэффициент  $S$  определяет концентрацию и тип льда в холодной воде. Толщина нефтяного пятна  $\delta_n$  рассчитывается на основании известных данных, а также с учетом концентрации и типа льда.

Математическая модель, определяющая характер распространения нефтяного загрязнения подо льдом, предложена М. Сайдом [6]. Данная модель устанавливает зависимость радиуса распространения нефти от ее удельного веса и от поверхностного натяжения. Кроме того, эта модель учитывает тип ледяного покрытия.

$$K; \quad \frac{v \cdot \sqrt{V}}{a \cdot B} \quad (8)$$

где  $v$  - удельный вес нефти, Н/м<sup>3</sup>;

$a$  - поверхностное натяжение, Н/м;

$B$  - коэффициент, учитывающий тип льда, м<sup>11,5</sup> (от  $3 \cdot 10^4$  до  $4 \cdot 10^{14}$  м<sup>11,5</sup> для всех типов льда).

Чтобы дать исчерпывающую оценку характера распространения нефти в холодной воде, в том числе под ледяным

покровом, при использовании эмпирической математической модели, нужен полный комплекс данных, необходимый для моделирования, включая и лабораторные.

Ниже проведен сравнительный анализ характера распространения различных сортов нефти на водных объектах, покрытых льдом, для проведения которого использовались результаты собственных лабораторных исследований. Исследовались сорта нефти, транспортируемые трубопроводным транспортом Беларуси из Российских месторождений, а также Речицкого месторождения Беларуси. В таблице представлены параметры, характеризующие свойства сортов нефти при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ . Для их сравнительной оценки определялась зависимость радиуса распространения нефтяных загрязнений под ледяным покровом водоема от свойств нефти. Для расчетов, с использованием модели Сайда, принимались фиксированные объемы каждого из сортов нефти, и для них определялся эквивалентный радиус по формуле (8). Значение эквивалентного радиуса позволяет оценить площадь распространения нефтяного загрязнения и его толщину, которые характеризуют каждый конкретный сорт нефти.

#### Сорта нефти, "фанс"портнруемые трубопроводным транспортом Беларуси

Сорт нефти/ месторождение	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> , $t = 0^{\circ}\text{C}$	$\mu$ 10*, м <sup>2</sup> /с, $t = 0^{\circ}\text{C}$	$\gamma$ , Н/м <sup>3</sup> , $* = 0^{\circ}\text{C}$	$\sigma \cdot 10^3$ , Н/м, $/ = 0^{\circ}\text{C}$
1. Арлатанская (Башкирия)	906	205	8887	44,5
2. Ромашкинская (Татария)	880	100	8632	45,9
3. Сургутская (Тюменская обл.)	875	28	8583	46,0
4. Козловская (Куйбышевская обл.)	863	118	8466	46,7
5. Речицкая (Беларусь)	846	168	8299	47,1
6. Советская (Саратовская обл.)	831	79,8	8152	48,1

По результатам расчетов построены графические зависимости радиуса распространения нефтяного пятна для различных сортов нефти от поверхностного натяжения нефти на границе раздела фаз вода-нефть и от отношения удельного веса нефти к поверхностному натяжению для фиксированных объемов нефти и различных типов ледяного покрытия. На рис. 1, 2 показаны зависимости радиуса распространения нефтяного пятна от поверхностного натяжения и отношения  $U$  для объемов ( $V= 0,001 \text{ м}^3$ ) различных сортов нефти.

Оценивая полученные зависимости, можно сделать следующие выводы. Поверхностное натяжение на границе раздела двух фаз нефть-вода оказывает заметное влияние на характер распространения нефтяного загрязнения подо льдом. С увеличением поверхностного натяжения на границе раздела двух фаз нефть-вода радиус распространения нефти уменьшается, в свою очередь, поверхностное натяжение нефти зависит от ее плотности. С увеличением плотности нефти поверхностное натяжение на границе раздела фаз нефть-вода уменьшается. Для сорта нефти, имеющего наименьшую плотность при температуре близкой к  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  по сравнению с другими сортами нефти, поверхностное натяжение наибольшее на границе с водой, при этом радиус распространения нефтяного пятна - наименьший, т.е. зависимость - обратная. Вместе с тем, с увеличением плотности нефти возрастает ее удельный вес, при этом увеличение радиуса распространения нефтяного пятна подо льдом прямо пропорционально увеличению удельного веса нефти. Таким образом, считаем, что более целесообразно было бы определять характер распространения нефти подо льдом в зависимости не от каждой из указанных выше величин в отдельности, а от отношения удельного веса к поверхностному натяжению. При этом, чем больше это отношение, тем больше возрастает радиус распространения нефти подо льдом, т.е., влияние изменения поверхностного натяжения больше, чем влияние изменения удельного веса, поэтому с возрастанием поверхностного натяжения нефти уменьшается отношение удельного веса к поверхностному натяжению, а радиус распространения нефти уменьшается.

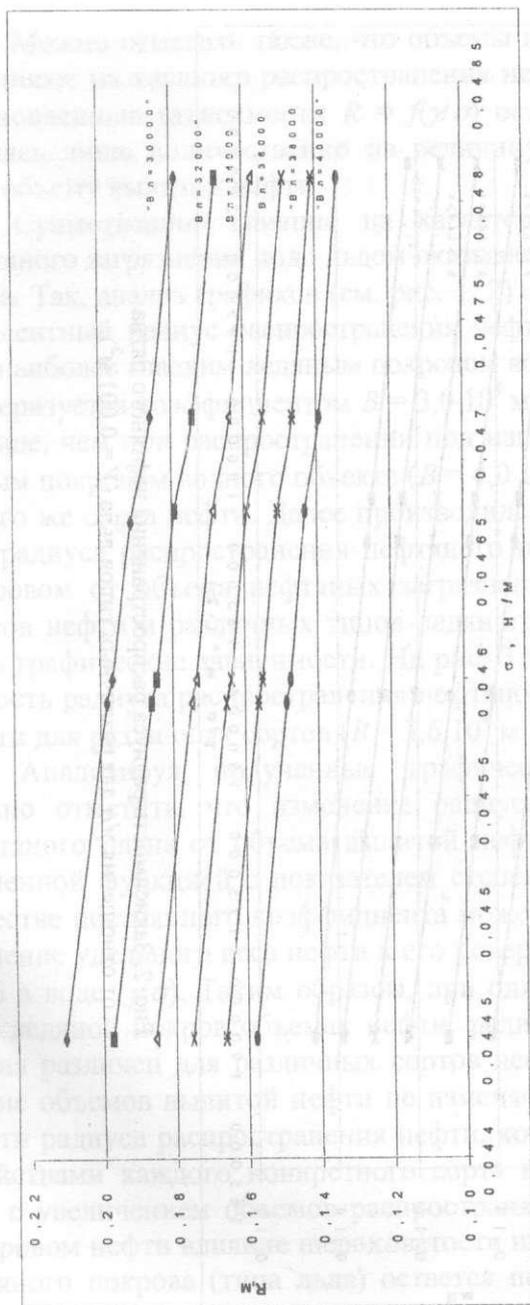


Рис. 1. Зависимость радиуса распространения нефтяного пятна от поверхностного натяжения для различных типов льда ( $V = 0,001 \text{ м}^3$ )

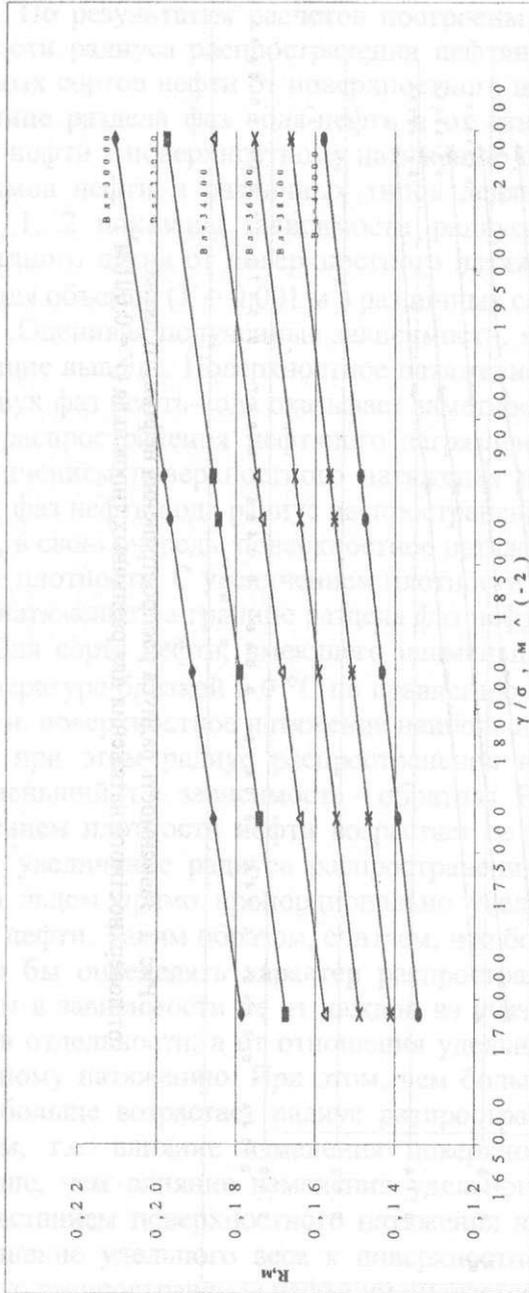


Рис. 2. Зависимость радиуса распространения нефтяного пятна от отношения  $U/\sigma$  для различных типов льда ( $V = 0,001 \text{ м}^3$ )

Можно отметить также, что объемы выливаемой нефти не влияют на характер распространения нефти подо льдом и установленные зависимости  $R = j\ddot{y}lcr$  остаются прежними, меняясь лишь количественно на величину, пропорциональную объему вылитой нефти.

Существенное влияние на характер распространения нефтяного загрязнения подо льдом оказывает тип ледяного покрова. Так, анализ графиков (см. рис. 1, 2) показывает, что эквивалентный радиус распространения нефтяного загрязнения под наиболее гладким ледяным покровом водного объекта (характеризуется коэффициентом  $B = 3,0 \cdot 10^4 \text{ м}^{115}$ ) в 1,3 ~ 1,4 раза больше, чем при распространении под наименее гладким ледяным покровом водного объекта ( $B = 4,0 \cdot 10^4 \text{ м}^{15}$ ) для одного и того же сорта нефти. Далее производился расчет зависимости радиуса распространения нефтяного пятна под ледяным покровом от объема нефтяных загрязнений для различных сортов нефти и различных типов ледяного покрова и строились графические зависимости. На рис. 3 представлена зависимость радиуса распространения нефтяного пятна от объема нефти для различных сортов ( $B = 3,6 \cdot 10^4 \text{ м}^{15}$ ).

Анализируя полученные графические зависимости, можно отметить, что изменение радиуса распространения нефтяного пятна от объема вылитой нефти характеризуется степенной функцией с показателем степени 0,5. При этом в качестве постоянного коэффициента может быть принято отношение удельного веса нефти к его поверхностному натяжению в воде ( $\gamma/a$ ). Таким образом, при одинаковых, вылитых под ледяной покров объемах нефти, радиус его распространения различен для различных сортов нефти. Однако, изменение объемов вылитой нефти не изменяет характер зависимости радиуса распространения нефти, которая определяется свойствами каждого конкретного сорта нефти. Характерно, что с увеличением объемов распространяемой под ледяным покровом нефти влияние шероховатости нижней поверхности ледяного покрова (типа льда) остается постоянным и находится в указанных выше пределах.



Результаты проведенных исследований могут быть использованы при прогнозировании ситуаций, связанных с аварийными разливами нефти, транспортируемой трубопроводным транспортом Беларуси в зимних условиях, и сопровождающихся загрязнением водного объекта. Представленная методика позволяет оценивать масштабы чрезвычайной ситуации, связанной с аварийными нефтеразливами, что позволит выработать систему эффективных мер, снижающих экологический ущерб для региона, в котором произошла авария.

### Литература

1. Metge M. and Telford A.S.(1979) Oil in moving pack ice study // Proceedings of the Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions(POAC), Oslo,Norway, August 13-18, 1979, Vol. 3. -P. 255-264.
2. Ross S.L. and Energetex Engineering (1985) In-situ Burning of Uncontaminated Oil Slicks // Environment Canada - C&P, Ottawa, Ontario, K1A 0H3, Report No. EE-60.
3. Ross S.L. and Dickins D.F.(1987), Field Research Spills to Investigate the Physical and Chemical Fate of Oil in Pack Ice // Environmental Studies Revolving Fund Report No.062, Dept. of Energy Mines and Resources, Ottawa,Ontario. - P. 118.
4. Spaulding M.L.(1988), A State-of-the-Art Review of Oil Spill Trajectory and Fate Modeling// Oil and Chemical Pollution, Vol. 4. -P. 39-55.
5. Buist LA., Joyce S.P. and Ross S.L.(1987), Modelling oil spills in leads, wind / wave tank testing and preliminary results // Proceeding 10<sup>th</sup> Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Edmonton, Alberta, June 9-11, 1987. - P. 131-148.
6. Sayed M. and Loeset S. (1993), Laboratory Experiments of Oil spreading in Brash Ice // Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Off shore and Polar. Eng. Conf, Singapore, June 6-11 1993, Vol. 1, Golden (Colo), 1993.-P. 224-231.

7. Mackay D., Medir M. and Thornton D.E.(1976), Interfacial behaviour of oil under ice // The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 54, February/April 1976. - P. 72-74.

8. Yapa P.D. and Chowdhury T.(1990), Spreading of oil spilled under ice // Journal of Hydraulic Research, American Society of Civil Engineers, Vol. 116, No. 12, December, 1990. - P. 1468-1483, Paper No. 25344.

9. Belaskas D.P. and Yapa P.D.(1991), Oil spreading in broken ice // Report № 9 1-6 July 1991, Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, Potsdam, NY 13699-5710, USA.

10. Venkatesh S.(1988), The Oil Spill Behaviour Model of the Canadian Atmospheric Environment Service, Part I: Theory and Model Evaluation // Atmosphere-Ocean, Volume 26, No. 1. - P. 93-108.

11. Venkatesh S., Neralla V.R., Hume W., Parker N. and Thomson B.(1988), The Oil Spill Behaviour Model of the Canadian Atmospheric Environment Service, Part II: of Model Guidance for Emergency Response. Atmosphere-Ocean, Volume 26, No. 1. - P. 109-117.

12. Venkatesh,S., El-Tahan, H., Comfort,G. and Abdelnour, R.(199Q), Modelling The spread of oil spills in ice-infested water // Proc, 13<sup>th</sup> Arctic and Marine Oil Spills Program Technical Seminar, June 6-8 1990, Edmonton, Alberta, Canada. - P. 139-156.

13. Fay J.A.(1971), Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface // Proc. Joint Conference on prevention and Control of Oil Spills. American Petroleum Institute, Washington, D.C. -P. 463-467.

14. Shultz R.(1984), A Field Guide for Arctic Oil Spill Behaviour // Arctec Inc., Columbia, Maryland, USA.

15. Bird R.B., Stewart W.E. and Lightfoot E.N. (1960), Transport Phenomena // John Wiley&Sons, Inc., New York. - P. 780.

16. Kovaics A.(1981), Pooling of Oil Under Sea Ice// Proc. Conference on port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, Quebec City, Quebec, July 27-31 1981. - P. 43-48.

17. Comfort G.(1986), Under-Ice Roughness Measurements // Arctec Canada Limited Report No.2041-II submitted to the Environmental Studies Revolving Fund, Dept. of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Ontario.

18. Comfort G.(1987), Analytical Modelling of Oil and Gas Spreading Under Ice // Environmental Studies Revolving Fund Report 077, Dept. of Energy Mines and Resources, Ottawa, Ontario.

19. Comfort G.(1987), Analytical Modelling of Oil and Gas Spreading Under Ice // Environmental Studies Revolving Fund Report 077, Dept. of Energy Mines and Resources, Ottawa, Ontario.