

Б.Б. ОРАЗБАЕВ, Ш.К. КОДАНОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЯНОГО ПЯТНА В ПРОЦЕССЕ РАСТЕКАНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПО ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

(Представлена академиком НАН РК М.Д. Диаровым)

В статье исследованы и решены основные вопросы моделирования параметров нефтяного пятна в процессе растекания нефтепродуктов по водной поверхности в условиях Северного Каспия. Исследованы методики расчета изменения во времени радиуса нефтяного пятна, в качестве базовой выбрана методика Гау учитывающая последовательность смены фаз физических процессов в ходе растекания нефтяного пятна, данная методика модифицирована для учета действия ветра. Изучены этапы процесса распространения нефтяных пятен по морской поверхности по времени. По результатам моделирования построены графики изменения радиусов нефтяного пятна при растекании рассматриваемых нефтепродуктов различных объемов для изменения времени растекания от 30 мин до 5 часов.

В современной научно-технической литературе, посвященной исследованию физических процессов и моделирования растекания нефти по водной поверхности [1,2,3], наиболее апробированными являются три методики расчета изменения во време-

ни радиуса нефтяного пятна. В этих методиках радиус пятна представлен функцией трех аргументов: плотности нефтепродукта c_H объема разлива и времени растекания t . Плотность воды c_B принимается равной 1000 кг/м^3 для воды Северного Каспия.

Таблица 1. Время (мин) изменения фаз распространения нефтяного пятна

Объем разлива, м ³	Мазут М 40		Мазут 100		Дизельное топливо	
	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂
до 10	10,3	11,6	-	3,8	7,5	22,1
50	17,6	99,4	-	32,4	12,8	189,3
100	22,2	250,4	39	81,7	16,1	477
300	33,1	1083,6	56	353	23,2	2063,8

По 1-методике (методика Bernulli [1]) радиус нефтяного пятна определяется по формуле:

$$r(t, V, \rho_H) = \left[4 \cdot \xi \cdot g \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho_B} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \cdot V^{\frac{1}{4}} \cdot t^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

По 2-методике (методика Buckminster [1], [2]):

$$r(t, V, \rho_H) = \left[4 \cdot \xi \cdot g \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho_B} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \cdot V^{\frac{1}{4}} \cdot t^{\frac{3}{6}} \cdot \nu^{-\frac{1}{8}} \quad (2)$$

3-методика (методика Fay [3,4]) процесса распространения нефтяных пятен по морской поверхности по времени разделяет на три этапа.

Первый этап характеризуется действием сил тяжести и инерции:

$$R(t) = k_t \cdot \left[g \cdot V \cdot \left(\frac{\rho_B - \rho_H}{\rho_B} \right) \cdot t^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Второй этап методики Fay характеризуется гравитационно-вязкостными условиями распространения:

$$R(t) = k_v \cdot \left[g \cdot V^2 \cdot \left(\frac{\rho_B - \rho_H}{\rho_B} \right) \cdot t^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{\nu_\omega^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{1}{6}} \quad (4)$$

Третий этап распространение пятна характеризуется действием сил поверхностного натяжения [5]:

$$R(t) = k_\sigma \cdot \left[\sigma^2 \cdot t^3 \cdot \frac{1}{\rho_H^2 \cdot \nu_\omega} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

В приведенных выражениях методики оценки радиуса *R(t)* распространения нефтяного пятна использованы следующие обозначения: *t* – время распространения, с; *g* – ускорение силы тяжести, м/с²; ρ_B – плотность морской воды, кг/м³; ρ_H – плотность нефти (нефтепродукта), кг/м³; *V* – объем разлитых нефти и нефтепродуктов, м³; ν_ω – коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с; $k_t = 1.14$; $k_v = 1.14$; $k_\sigma = 2.3$;

$$\sigma = \sigma_\omega - \sigma_o = \sigma_{\omega\omega} \quad (6)$$

где σ – результирующее поверхностное натяжение; σ_ω – поверхностное натяжение на границе вода-воздух; σ_o – поверхностное натяжение на границе воздух – нефть (нефтепродукт); $\sigma_{\omega\omega}$ – поверхностное натяжение на границе вода-нефть (нефтепродукт).

Особенностью выбранной методики является необходимость определения времени перехода от первой стадии растекания (инерционной) ко второй (гравитационно-вязкостной) и от второй – к третьей (сил поверхностного натяжения).

Для определения момента перехода, в расчетах радиуса пятна, по методике Fay от первой стадии распространения нефтяного пятна ко второй необходимо приравнять правые части зависимостей (3) и (4) и разрешить полученное уравнение относительно аргумента *t*.

В результате выполнения такой процедуры, получим:

$$t_1 = 2.6173 \cdot V^{\frac{1}{3}} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho_B} \right) \cdot g \right\}^{\frac{1}{3}} \cdot \nu^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

где *t*₁ – момент времени, начиная с которого следует применять выражение (4) для определения радиуса нефтяного пятна.

Аналогично, приравнивая радиусы растекания нефтяного пятна при переходе от второго этапа к третьему, получим значение момента времени *t*₂, начиная с которого необходимо пользоваться для расчета радиуса нефтяного пятна выражение (5):

$$t_2 = \frac{1.02 \cdot V^{\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho_B} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \nu^{\frac{1}{3}} \cdot \rho_B}{\sigma} \quad (8)$$

В таблице 1 приведены расчетные значения времени (мин) перехода процесса растекания нефтяного пятна от первой фазы ко второй (*t*₁) и от второй фазы к третьей (*t*₂).

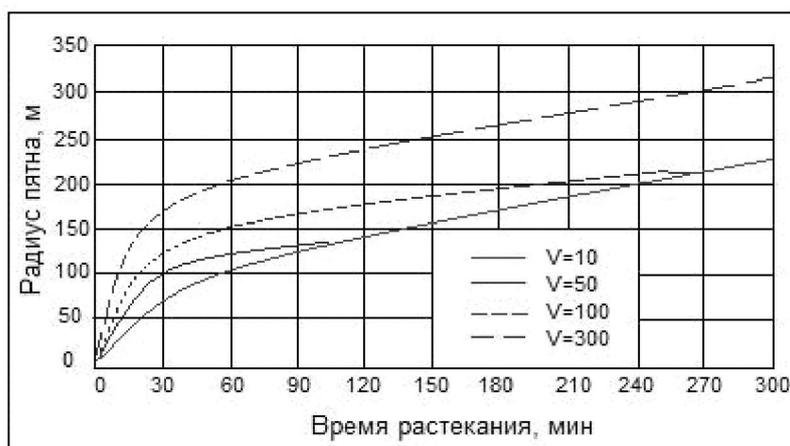


Рис. 1. Изменение радиусов нефтяного пятна мазута М40 в зависимости от времени растекания для разных объемов сброса

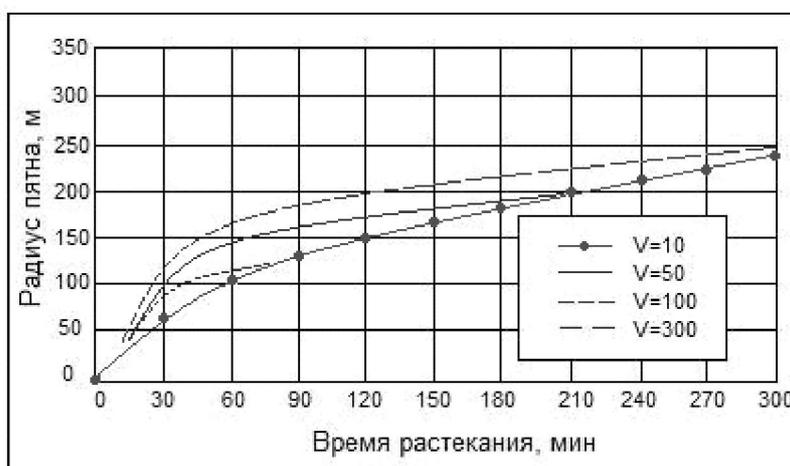


Рис. 2. Изменение радиусов нефтяного пятна мазута М100 в зависимости от времени растекания для разных объемов сброса

Анализ проведенных расчетов показывает, что для малых объемов сброса (до 10 м³) первый и второй этапы растекания нефтяного пятна продолжают не более 30 минут для всех рассматриваемых нефтепродуктов.

При аварийном сбросе объемов 10 м³-100 м³ продолжительность гравитационно-вязкостного этапа растекания может составить от 30 мин до 477 мин в зависимости от вида нефтепродукта.

При крупных авариях с разлитием нефтепродуктов объемом более 100 м³ время перехода от гравитационно-вязкостного этапа растекания к этапу сил поверхностного натяжения составляет, примерно 350 мин для самого плотного, нефтепродукта, (мазут М 100) и превышает 34 часа при растекании дизельного топлива.

Реально, при ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов на акватории Северного Каспия время от момента сброса до начала работ по сбору нефтеводяной смеси составляет не менее 30 мин, т.е. в дальнейшем первый этап растекания (3) может быть исключен из рассмотрения.

Изменение радиусов нефтяного пятна при растекании рассматриваемых нефтепродуктов различных объемов для изменения времени растекания от 30 мин до 5 часов представлены на рисунках 1-3.

Таким образом, расчет по методике F_{ay} сводятся в рамках решаемой задачи к определению радиус нефтяного пятна по формуле (4) на втором этапе растекания для малых (до 10 м³) объемов сброса и по формулам (4), (5) для больших объемов сброса нефтепродуктов.

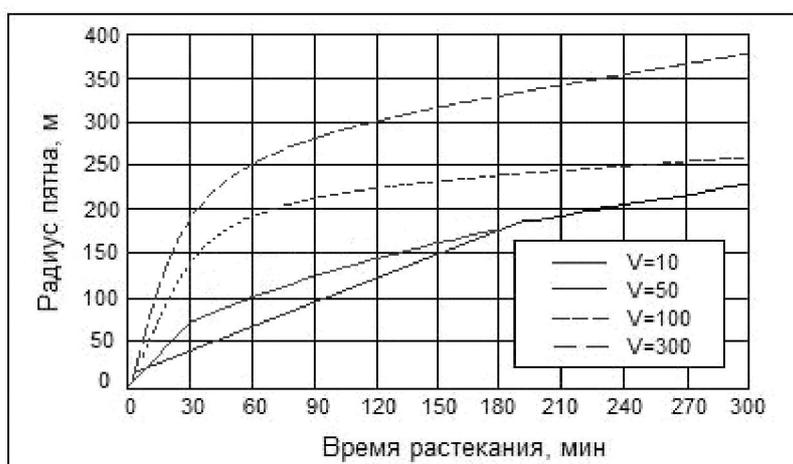


Рис. 3.3. Изменение радиусов нефтяного пятна дизельного топлива в зависимости от времени растекания для разных объемов сброса

Таблица 2. Сравнение радиусов нефтяного пятна мазута М40, рассчитанных по различным методикам через 3 часа растекания

Объем разлива, м ³	Радиус, м через 10800 с растеканием ($c=946 \text{ кг/м}^3$)		
	Fay	Bukmeister	Bernulli
10	177,8	45,8	180
50	177,8	102,4	269
100	192,2	144,9	320
300	278,2	250,9	422

Таблица 3. Сравнение радиусов нефтяного пятна мазута М100, рассчитанных по различным методикам через 3 часа растекания

Объем разлива, м ³	Радиус, м через 10800 с растеканием ($c = 994 \text{ кг/м}^3$)		
	Fay	Bukmeister	Bernulli
10	177,8	26,4	104,0
50	177,8	59,1	155,6
100	177,8	83,6	185,0
300	192,7	144	243,5

Таблица 4. Сравнение радиусов нефтяного пятна дизельного топлива, рассчитанных по различным методикам через 3 часа растекания

Объем разлива, м ³	Радиус, м через 10800 с растеканием ($c = 850 \text{ кг/м}^3$)		
	Fay	Bukmeister	Bernulli
10	177,8	30,2	232
50	181,4	132	348
100	228,6	187	413,7
300	330	323	544

Из анализа полученных поверхностей, характеризующих изменений площади пятна во времени [5] следует что, характер изменения нефтяного пятна для всех методик идентичен.

Для сравнения рассматриваемых методик оценим результаты расчетов, радиусов нефтяного пятна, для чего, зададимся конкретными значениями сброшенного объема (от 10 м³ до 300 м³)

Таблица 5. Значения и площадей нефтяного пятна, рассчитанных без учета ветра и с учетом скорости ветра

Объем сброса, м ³	Время растекания, с	Площадь пятна, методика Гау (4) м ²	Площадь пятна, методика (9) м ²
Скорость ветра 0 м/с			
10	1800	29038	17794
50	3600	41066	25164
100	1800	46201	28312
100	3600	65339	40039
Скорость ветра 10 м/с			
10	1800	29038	18343
50	3600	41066	26263
100	1800	46201	29004
300	3600	65339	41423
Скорость ветра 20 м/с			
10	1800	29038	18718
50	3600	41066	27012
100	1800	46201	29475
300	3600	65339	42367

и временем растекания 3 часа (10800 с). Результаты расчетов радиусов нефтяного пятна, выполненные для плотности воды 1000 кг/м³, коэффициенте кинематической вязкости, воды 1,306 сСт, по различным методикам сведены в таблицы 2, 3 и 4.

Несмотря на расхождения в результатах расчетов размеров нефтяных пятен, на практике считаются наиболее корректной методика Гау. В дальнейшем все расчеты строим, на основе методики Гау, выбирая соответствующие формулы (3), (4), (5) в зависимости от конкретных условий решаемой задачи.

Для расчета радиуса растекания жидкости по полной поверхности с учетом действия ветра модифицируем формулу Гау:

$$S(t, V, \rho_H, w) = 227 \cdot \left[1 - \frac{\rho_H}{\rho_B} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot V^{\frac{2}{3}} \cdot t^{\frac{1}{2}} + 0.04 \cdot \left[1 - \frac{\rho_H}{\rho_B} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot V^{\frac{1}{3}} \cdot w^{\frac{3}{4}} \cdot t \quad (9)$$

где $S(t, V, c_H, w)$ – площадь, нефтяного пятна, м²; t – время растекания, с; V – объем разлива нефти (нефтепродуктов) на водную поверхность, м³; c_H и c_B – плотность нефтепродуктов и воды соответственно, кг/м³; w – скорость ветра, м/с.

Сравнение площади растекания нефтяного пятна на примере мазута М40 (плотность $c_H=946$

кг/м³), рассчитанных по методике Гау без учета, ветра (4) и с учетом ветра (9) представлено данными таблицы 5.

Приведенные результаты свидетельствуют о незначительном влиянии скорости ветра на площадь нефтяного пятна.

Таким образом, вывод о дальнейшем: использовании методики Гау в виде (3), (4), (5) и модифицированной методики (9) при расчетах радиуса или площади нефтяного пятна представляется обоснованным.

Выводы: Исследованы и решены основные вопросы моделирования параметров нефтяного пятна в процессе растекания нефтепродуктов по водной поверхности в условиях Северного Каспия. Произведен анализ последних достижений в области оценки параметров нефтяного пятна при его растекании по водной поверхности. Исследованы методики расчета изменения во времени радиуса нефтяного пятна, в качестве базовой выбрана методика Гау учитывающая последовательность смены фаз физических процессов в ходе растекания нефтяного пятна, данная методика модифицирована для учета действия ветра. Изучены этапы процесса распространения нефтяных пятен по морской поверхности по времени. Произведены расчеты значения времени (мин) перехода процесса растекания нефтяного пятна от первой фазы ко второй и от второй фазы к третьей, полученные результаты сведены в таблицы. Для расчета радиуса растекания жид-

кости по полной поверхности с учетом действия ветра модифицирована формула Fay. По результатам моделирования построены графики изменения радиусов нефтяного пятна при растекании рассматриваемых нефтепродуктов различных объемов для изменения времени растекания от 30 мин до 5 часов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев В.В. Нефть. Газ. Последствия аварийных ситуаций, -СПб., 2003.
2. Альхименко А.И. Аварийные разливы нефти в море и борьба с ними. СПб, 2004. -157 с.
3. Альхименко А.И. Предотвращение загрязнения воды нефтью и нефтепродуктами. Методические указания, СПбГТУ, 1992, -89 с.
4. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea // Oil on the sea.-New York: Plenum Press. 1989. P.53-63.
5. Березин И.К. Оптимизация природоохранных мероприятий при ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов// Дисс. на соискание уч.степени канд.наук., -СПб, 2005. -166.

Резюме

Солтүстік Каспий жағдайында су бетінде төгілген

мұнайдың жайылуы процесінде мұнай дақтарының параметрлерін модельдеудің негізгі мәселелері зерттеліп, шешілген. Мұнай дақтары радиусының уақыт бойынша өзгеруін есептеу әдістемелері талқыланды, негізгі әдістеме ретінде, мұнай дақтарының жайылуы кезінде физикалық процестердің фазаалмасуы өзгеруін ескеретін Fay әдістемесі алынған, жел әсерін ескеру үшін аталған әдістеме модификацияланды. Уақыт бойынша мұнай дақтарының теңіз бетінде таралу процесінің кезеңдері зерттелген. Модельдеу нәтижелерінде 30 минуттан 5 сағатқа дейінгі уақыт аралығында берілген мұнай өнімдерінің түрлі көлемдерінің дақтары радиустарының өзгеруі графиктері тұрғызылған.

Summary

In clause are investigated and the basic questions of modeling of parameters of a petroleum stain in process of petroleum on a water surface in conditions Northern are decided (solved). The techniques of account of change in time of radius of an oil spillage investigated, as base the technique Fay a taking into account sequence of change of phases of physical processes in a course of races of an oil spillage chosen the given technique is modified for the account of action of a wind. The stages of process of distribution of oil spillages on a sea surface on time are investigated. By results of modeling the diagrams of change of radiuses of an oil spillage are constructed at of considered (examined) petroleum of various volumes for change of time from 30 mines till 5 hours.