

УДК 551.465

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ НЕФТЯНОГО РАЗЛИВА В МОРЕ И ПАРАМЕТРИЗАЦИИ НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2018 г. С. Н. Зацепа^{1, *}, А. А. Ивченко¹, К. А. Коротенко²,
В. В. Солбаков^{1, 3}, В. В. Становой⁴

¹Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва, Россия

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

³Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” РАН, Москва, Россия

⁴Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: zatsepa@gmail.com

Поступила в редакцию 22.06.2016 г.

После доработки 17.04.2017 г.

В работе предложена новая параметризация процесса диспергирования нефтяного разлива в море за счет разрушения нефтяной пленки волнами и проникновение капель нефти в воду. Проведены оценки доли объема нефти, возвращающейся к поверхности за промежуток времени между обрушениями ветровых волн вследствие положительной плавучести. Показана роль вертикального турбулентного обмена, как фактора, лимитирующего поток нефтяных капель от поверхности в водную толщу.

DOI: 10.1134/S0030157418060163

Среди процессов выветривания нефтяного разлива [3] важную роль играет процесс вертикального переноса капель нефти в приповерхностном слое моря за счет ее дисперсии. Дисперсия нефтяных капель в воде образуется в результате разрушения нефтяной пленки на поверхности ветровыми волнами и за счет ее дробления в турбулированном верхнем слое океана, главным образом в слое волнового перемешивания. В недавнем обзоре обсуждаемой проблемы [14] было отмечено, что модели диспергирования [8, 12, 19] концентрируются на проникновении капель нефти в воду и не уделяют должного внимания процессам всплытия капель. Процесс диспергирования описывается как одномоментное событие, в то время как капли нефти могут продолжать дробление и при дальнейшем распространении в морской среде.

В работе [3] предложена новая параметризация для оценки потока нефти в водную толщу в результате естественного диспергирования нефтяного разлива, основанная на современных результатах исследований ветрового волнения и лабораторных экспериментов по дроблению нефтяной пленки на капли в достаточно широком диапазоне изменения свойств различных типов нефти и нефтепродуктов. Для определения пер-

вичного потока капель нефти в воду предложено использовать скорость оборачивания поверхности моря (turnover rate – TOR) – характеристику ветрового волнения, впервые введенную в работе [22]. На основании результатов экспериментов [10, 17, 24] проведены расчеты параметра масштаба логнормального распределения (медианы) распределения количества капель нефти по размерам в широком диапазоне изменения ее плотности, вязкости, межфазного натяжения и скорости ветра.

В итоге, основное соотношение для оценки потока нефти от поверхности в водную толщу может быть записано в виде

$$\frac{\partial h_{\text{oil}}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_{\text{oil}}} Q_{\text{disp}} = -h_{\text{oil}} \text{TOR} F_{\text{up}}(d_{50}^N), \quad (1)$$

где h_{oil} – толщина пленки нефти на поверхности моря, t – время, ρ_{oil} – плотность нефти, Q_{disp} – первичный поток капель нефти в водную толщу, $\text{TOR} \approx 1.4 \times 10^{-2} u_*^3 g c_T^{-4}$, c_T – пороговая фазовая скорость волн, при которой начинается обрушение, u_* – динамическая скорость в приводном слое атмосферы, g – гравитационное ускорение, d_{50}^N – параметр масштаба (медиана) логнормаль-

Таблица 1. Оценка скоростей Стоксова подъема капель (см/с) в зависимости от размера

Плотность нефти, кг/м ³	d_{lim} , мкм	Диаметр капли нефти, мкм							
		1	5	10	50	100	500	1000	2000
700	780	0.000013	0.00033	0.0013	0.033	0.13	3.3	9.1	13
800	880	0.0000091	0.00023	0.00091	0.023	0.091	2.3	7.6	11
900	1100	0.0000050	0.00013	0.00050	0.013	0.050	1.3	5.0	8.0
1000	1900	0.0000010	0.000024	0.00010	0.0024	0.010	0.24	0.97	3.5

ного распределения количества капель по размерам. Множитель $F_{up}(d_{50}^N)$ необходим для того, чтобы перейти от первичной оценки потока от поверхности к результирующему потоку, учитывая уход капель нефти в слой волнового перемешивания и далее, в более глубокие слои моря, и возврат капель на поверхность за счет положительной плавучести.

В данной работе в фокусе нашего внимания будут процессы всплытия капель как на временных промежутках порядка периода волны, так и долгопериодные оценки. В заключении проведено сравнение основных распространенных подходов к описанию диспергирования.

ОЦЕНКА ВСПЛЫТИЯ КАПЕЛЬ МЕЖДУ ОБРУШЕНИЯМИ ВОЛН

С учетом результатов, полученных в [3], оценим долю q_{down} объема нефти, проникающего в воду за счет единичного обрушения волн

$$q_{down} = \int_0^{\infty} f_V(\zeta)(1 - \rho(\zeta))d\zeta = 1 - \int_0^{\infty} f_V(\zeta)\rho_r(\zeta)d\zeta, \quad (2)$$

где $f_V(\zeta)$ – функция плотности распределения объема нефти по размерам капель, ζ – диаметр капли нефти, $\rho_r(\zeta)$ – функция, соответствующая доле возвращающихся на поверхность капель в диапазоне размеров капель от $\zeta - \frac{1}{2}d\zeta$ до $\zeta + \frac{1}{2}d\zeta$.

Здесь и далее ζ используется в подинтегральных выражениях вместо переменной d , соответствующей диаметру капель диспергированной нефти.

Скорость подъема в воде капель нефти с диаметром d можно описывать зависимостями типа соотношения Стокса:

$$w_d = \begin{cases} g'd^2/18\nu_w, & d < d_{lim} \\ \left(\frac{8}{3}g'd\right)^{1/2}, & d \geq d_{lim}, \end{cases} \quad (3)$$

где пороговое значение размера капель $d_{lim} = 9.52\nu_w^{2/3}/g'^{1/3}$, после которого наступает турбулентный режим движения капели, $g' = g(\rho_w - \rho_{oil})/\rho_w$, ν_w, ρ_w – вязкость и плотность воды, соответственно [13]. В табл. 1 приведены рассчитанные по соотношению (3) скорости подъема капель нефти в морской воде, для различных значений плотности и диаметра капель и значения вязкости воды, соответствующей температуре 10°C. Оценка d_{lim} дает значения в пределах от 0.78 до 1.9 мм (табл. 1).

В результате акта обрушения волны в перемешанном слое глубиной H_{bw} оказываются капли диспергированной нефти, имеющие логнормальное распределение по размерам капель. Предположим, что капли нефти равномерно распределены в перемешанном слое. Время всплытия капель между последовательными актами обрушения волн, по-видимому, по порядку величины равно 10 волновым периодам (и более), что следует из того факта, что вероятность обрушения волн P_{bw} с предельной крутизной приближается к 1/10 [9]. Обозначим это время подъема капель как $T_{bw} = \frac{1}{P_{bw}}T_w$, где T_w – основной волновой период.

Используя (3) оценим $\rho_r(d)$ в (2), предположив, что доля вернувшихся на поверхность капель пропорциональна отношению высоты подъема капель за промежуток времени между последовательными обрушениями к глубине перемешанного слоя:

$$\rho_r(d) = \min(1, w_d T_{bw}/H_{bw}) = \begin{cases} \min(1, k_{w1}d^2), & d < d_{lim} \\ \min(1, k_{w2}d^{1/2}), & d \geq d_{lim}, \end{cases} \quad (4)$$

где $k_{w1} = g'/(18\nu_w)T_{bw}/H_{bw}$, $k_{w2} = \left(\frac{8}{3}g'\right)^{1/2}T_{bw}/H_{bw}$.

Капли, которые успевают всплыть от нижней границы перемешанного слоя к поверхности,

имеют диаметр выше “критического” d_{cr} , который определится по критической скорости всплытия w_{cr} из соотношения $w_{cr}(d_{cr}) = H_{bw}/T_{bw}$.

В таком случае соотношение (2) можно записать в виде

$$q = F_V(d_{cr}) - k_{wl} \int_0^{d_g} f_V(\zeta) \zeta^2 d\zeta - k_{w2} \int_{d_g}^{d_{cr}} f_V(\zeta) \zeta^{1/2} d\zeta, \tag{5}$$

где $d_g = \min(d_{cr}, d_{lim})$.

Упростим (5), приняв, что d_{cr} больше, чем максимальный диаметр капель в ансамбле $d_{max} = d_{50}^N e^{3S}$ [3], где S – параметр формы (дисперсия) логнормального распределения. Тогда первый член в (5) приближенно равен единице, третий – нулю и доля капель нефти, вернувшихся к поверхности за время между обрушениями волн, может быть рассчитана из соотношения:

$$q_{up} = k_{wl} \int_0^{d_{max}} \zeta^2 f_V(d_{50}^V, S, \zeta) d\zeta = \frac{1}{w_{cr}} k_{Sr} (d_{50}^N)^2 (e^{3S^2})^2 \underbrace{\int_0^{e^{3(S-S^2)}} \zeta^2 f_{norm}(1, S, \zeta) d\zeta}_{K_{up}}, \tag{6}$$

где коэффициент $k_{Sr} = -\frac{g'}{18v_w}$, $f_{norm}(1, S, d)$ – логнормальное распределение для размеров капель, нормированных на d_{50}^V – медианный диаметр распределения объема нефти по размерам капель [3]. Выражение, обозначенное в (6) как коэффициент K_{up} , зависит только от дисперсии логнормального распределения количества капель по размерам, значения которой, на сегодняшний день, могут быть выбраны с большой долей субъективизма. Для значений дисперсии логнормального распределения $S = 0.7$ и $S = 0.9$ коэффициент $K_{up} = 27.5$ и $K_{up} = 46.2$ соответственно.

Как было отмечено в работе [2], в области больших размеров капель степенные законы распределения частиц по размерам могут использоваться, так же как и логнормальные распределения. Если заменить в (6) логнормальное распределение степенным законом, при котором

количество капель с размером d определяется как $N(d) \propto d^s$ с показателем степени $s = -2.3 - -3$ [3], то выражение (6) существенно упростится:

$$q_{up} = \frac{1}{w_{cr}} k_{Sr} a_n \int_0^{d_{max}} \zeta^2 \zeta^{s+3} d\zeta = \frac{s+4}{s+6} (e^{3S})^2 \frac{1}{w_{cr}} k_{Sr} (d_{50}^N)^2 = K_{up} \frac{1}{w_{cr}} k_{Sr} (d_{50}^N)^2, \tag{7}$$

где a_n – нормировочный коэффициент для степенного закона распределения диспергированных капель нефти по размерам.

Коэффициент K_{up} для “степенного закона” распределения частиц для различных значений параметров s и S оценивается как:

$$K_{up}|_{s=-2.3} = \begin{cases} 32, & S = 0.7 \\ 101, & S = 0.9 \end{cases}, \tag{8}$$

$$K_{up}|_{s=-3} = \begin{cases} 22, & S = 0.7 \\ 74, & S = 0.9. \end{cases}$$

Уменьшение количества возвращающихся к поверхности капель нефти объясняется тем, что степенной закон с показателем $s = -3$ соответствует равномерному распределению объема нефти по размерам капель, в то время как для распределения с показателем степени $s = -2.3$ характерно сосредоточение большей части объема нефти в каплях крупного размера.

В естественных условиях диапазоны изменения характеристик волнения, свойств нефти и соответствующие им безразмерные числа (Вебера и Рейнольдса) шире по сравнению с аналогичными значениями безразмерных параметров, чем в лабораторных экспериментах. В работе [17] плотность различных сортов нефти изменялась от 902 до 1007 кг/м³, динамическая вязкость – от 56 до 5940 мПа с, межфазное натяжение на границе нефть–вода – от 10 до 25 мН/м, высота волны – от 10 до 30 см, толщина слоя нефти от 5 до 15 мм. При этом модифицированное число Вебера изменялось от 183 до 1583.

В табл. 2 приведены значения чисел вязкости (Vi) и Вебера (We) для различных условий, в которых может происходить распространение разлива нефти в море, в табл. 3 – значения медианы функции распределения числа капель в зависимости от их размера. При этом приняты: плотность нефти – 860 кг/м³, плотность морской воды – 1024 кг/м³, межфазное натяжение нефти – 25 дин/см.

Таблица 2. Оценка значений числа вязкости и числа Вебера в зависимости от скорости ветра, вязкости и толщины пленки нефти

W_{10}	Vi			We				
	μ , мПа с			h_{oil} , мм				
	10	100	1000	1	0.5	0.1	0.01	0.001
6	1.52	15.2	152	495	248	50	5.0	0.50
8	2.02	20.2	202	881	440	88	8.8	0.88
10	2.53	25.3	253	1376	688	138	14	1.4
12	3.04	30.4	304	1981	991	198	20	2.0
14	3.54	35.4	354	2697	1348	270	27	2.7
16	4.05	40.5	405	3523	1761	352	35	3.5

Известно, что высоковязкие нефти, например, мазуты, по крайней мере, при умеренно сильных ветрах, не трансформируются в дисперсию.

В данной модели это реализуется через механизм образования очень крупных капель, которые быстро возвращаются к поверхности моря.

Анализируя данные, представленные в табл. 3, можно сделать вывод, что тонким пленкам нефти на поверхности моря соответствуют капли малых размеров, которые практически не возвращаются на поверхность моря.

В табл. 4 приведены результаты оценки доли возвращающейся к поверхности нефти q_{up} согласно (6) с использованием двух вариантов функции распределения: I – логнормальная с верхним пределом; II – степенная с показателем степени -2.3 . При расчетах использовались оценки глубины перемешивания $H_{bw} = 1.5H_w$ [12, 18], где $H_w = 0.2W_{10}^2/g$ – высота ветровых волн [21], $T_w = 2\pi/gW_{10}\beta_1$ [7], β_1 характеризует стадию раз-

Таблица 3. Оценка медианы d_{50} (мкм) распределения количества капель по размерам от скорости ветра, вязкости и толщины пленки нефти

W_{10} , м/с	We*	d_{50}	d_{max}	We*	d_{50}	d_{max}	We*	d_{50}	d_{max}	We*	d_{50}	d_{max}	We*	d_{50}	d_{max}
	h_{oil} , мм														
	1			0.5			0.1			0.01			0.001		
$\mu = 10$ мПа с															
6	468	56	459	234	43	348	47	22	183	4.7	8.9	73	0.47	3.6	29
8	823	40	327	412	30	248	82	16	130	8.2	6.4	52	0.82	2.5	21
10	1274	31	252	637	23	191	127	12	100	13	4.9	40	1.27	1.9	16
12	1819	25	203	910	19	154	182	10	81	18	3.9	32	1.8	1.6	13
14	2456	21	170	1228	16	129	246	8.3	68	25	3.3	27	2.5	1.3	11
16	3184	18	145	1592	13	110	318	7.1	58	32	2.8	23	3.2	1.1	9.2
$\mu = 100$ мПа с															
6	399	62	505	200	47	383	40	25	201	4.0	9.8	80	0.40	3.9	32
8	684	45	366	342	34	277	68	18	146	6.8	7.1	58	0.68	2.8	23
10	1033	35	286	517	27	217	103	14	114	10	5.5	45	1.0	2.2	18
12	1444	29	234	722	22	177	144	11	93	14	4.5	37	1.4	1.8	15
14	1911	24	198	956	18	150	191	10	79	19	3.8	31	1.9	1.5	12
16	2433	21	171	1216	16	130	243	8.3	68	24	3.3	27	2.4	1.3	11
$\mu = 1000$ мПа с															
6	239	84	688	119	64	522	24	34	274	2.4	13	109	0.24	5.3	43
8	381	64	520	190	48	394	38	25	207	3.8	10	82	0.38	4.0	33
10	543	51	420	272	39	318	54	20	167	5.4	8.2	67	0.54	3.2	27
12	722	43	354	361	33	269	72	17	141	7.2	6.9	56	0.72	2.7	22
14	914	38	307	457	29	233	91	15	122	9.1	6.0	49	0.91	2.4	19
16	1119	33	272	559	25	206	112	13	108	11	5.3	43	1.1	2.1	17

Таблица 4. Оценка доли нефти, возвращающейся к поверхности (%) за период времени между последовательными обрушениями волн

W_{10} , м/с	Вариант									
	I					II				
	h_{oil} , мм					h_{oil} , мм				
	1	0.5	0.1	0.01	0.001	1	0.5	0.1	0.01	0.001
$\mu = 10$ мПа с										
6	11	6.4	1.8	0.28	0.04	18	10	2.9	0.45	0.07
8	4.3	2.5	0.68	0.11	0.02	6.9	4.0	1.1	0.17	0.03
10	2.0	1.2	0.32	0.05	0.01	3.3	1.9	0.52	0.08	0.01
12	1.1	0.63	0.17	0.03	0.00	1.8	1.0	0.28	0.04	0.01
14	0.66	0.38	0.10	0.02	0.00	1.1	0.61	0.17	0.03	0.00
16	0.42	0.24	0.07	0.01	0.00	0.68	0.39	0.11	0.02	0.00
$\mu = 100$ мПа с										
6	14	7.8	2.2	0.34	0.05	22	13	3.5	0.55	0.09
8	5.3	3.1	0.85	0.13	0.02	8.6	4.9	1.4	0.22	0.03
10	2.6	1.5	0.41	0.07	0.01	4.2	2.4	0.66	0.11	0.02
12	1.5	0.83	0.23	0.04	0.01	2.3	1.3	0.37	0.06	0.01
14	0.89	0.51	0.14	0.02	0.00	1.4	0.82	0.23	0.04	0.01
16	0.58	0.33	0.09	0.01	0.00	0.94	0.54	0.15	0.02	0.00
$\mu = 1000$ мПа с										
6	25	14	4.0	0.63	0.10	41	23	6.4	1.0	0.16
8	11	6.2	1.7	0.27	0.04	17	10	2.8	0.44	0.07
10	5.6	3.2	0.89	0.14	0.02	9.1	5.2	1.4	0.23	0.04
12	3.3	1.9	0.53	0.08	0.01	5.4	3.1	0.85	0.14	0.02
14	2.2	1.2	0.34	0.05	0.01	3.5	2.0	0.55	0.09	0.01
16	1.5	0.85	0.23	0.04	0.01	2.4	1.4	0.38	0.06	0.01

вития волнения ($\beta_1 \approx 0.8$). $H_{bw}/T_{bw} \approx 0.006W_{10}$, $T_{bw}/H_{bw} \approx 1.68 \times 10^2/W_{10}$.

Поскольку из тонких пленок нефти продуцируются мелкие капли, фактически не возвращающиеся к поверхности, можно оценить “время жизни” нефтяного разлива. При уменьшении средней толщины пятна нефти на поверхности до значений порядка 10 мкм и менее, нефтяной разлив трансформируется во внутриводное загрязнение за время порядка $T_R = 1/TOR$ [3].

В табл. 4 приведены промежуточные оценки, необходимые для расчета потока капель в водную толщу. Обращает на себя внимание уменьшение процента всплывающих капель при усилении ветра. В работе [3] приводится оценка скорости обораживания поверхности моря и соответствующие временные масштабы. Например, время полного оборота поверхности моря при скорости 6 м/с составляет 9 ч, при том, что время между последова-

тельными обрушениями в точке – на несколько порядков меньше. Также, при усилении ветра увеличивается глубина перемешивания, существенно усиливается турбулентность и, соответственно, уменьшаются размеры капель (см. табл. 3).

При уменьшении толщины нефтяного слика основное расчетное соотношение, определяющее поток нефти \tilde{Q}_{disp}^1 в водную толщу за счет обрушения волн

$$\tilde{Q}_{disp} = -\rho_{oil}TORh_{oil}F_{up}(d_{50}^N), \tag{9}$$

должно измениться на выражение

$$\tilde{Q}_{disp} = -\rho_{oil}TORh_r, \tag{9a}$$

где h_{oil} – количество нефти на поверхности, $F_{up}(d_{50}^N)$ – функция, определяющая “эффектив-

¹ Надстрочная тильда использована для обозначения промежуточного результата оценки потока.

ность” переноса нефти с поверхности в водную толщу, которая зависит от количества возвращающихся к поверхности капель, h_T – пороговая толщина нефти на поверхности моря, при достижении которой капли нефти при проникновении в водную толщу уже не возвращаются к поверхности, например, 10 мкм.

$$F_{\text{up}}(d_{50}^N) = 1 - q_{\text{up}}, \quad (10)$$

где q_{up} определено выражением (6).

Пороговое значение в 10 мкм достаточно условно и этот вопрос требует обсуждения. Важно, что, начиная с некоторого значения толщины, нефть с поверхности моря будет “уходить” не по экспоненциальному закону (9), а с постоянной скоростью (9а). Косвенным подтверждением этого вывода могут служить наблюдения за нефтяными проявлениями на поверхности моря в регионе Южного Каспия. На основании обработки результатов аэрофотосъемки и радиолокационных изображений в работах [5, 4] сделан вывод, что пленки нефти субмикронной толщины (порядка 0.04–0.3 мкм) (визуально цвет варьируется от радужного в месте всплытия до серебристо-серого на периферии) существуют на поверхности моря 12–24 ч.

О РОЛИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА

Схематизировано процесс проникновения капля нефти в водную толщу можно представить как обмен веществом между поверхностью моря (ПМ), слоем волнового перемешивания (СВП) и нижележащими слоями воды (НСВ). Обрушение ветровых волн приводит к разрушению пленки нефти на поверхности моря и формированию области нефтяного загрязнения в виде ансамбля капель различного размера в приповерхностном слое до глубины порядка полутора высот значительных волн. В промежутках между обрушениями волн капли нефти стремятся возвратиться к поверхности за счет положительной плавучести.

Турбулентный обмен приводит к увлечению капель нефти в глубокие слои моря. Без турбулентной диффузии капли нефти любых размеров останутся в СВП, сформировав область высокой концентрации диспергированной нефти, которая будет находиться в динамическом равновесии с поверхностной нефтяной пленкой, так что поток нефти от ПМ будет уравниваться потоком всплывающих капель от СВП. Рассмотрим возможные следствия турбулентного перемешивания между СВП и НСВ. Простая оценка турбу-

лентного потока капель нефти Q_{dif} может быть записана как [26]:

$$Q_{\text{dif}} \approx -\frac{D}{L_D}(C_e - C_D), \quad (11)$$

где C_e – средняя концентрация капель в СВП, C_D – концентрация диспергированной нефти на нижней границе слоя диффузионного перемешивания с характерным масштабом L_D , D – коэффициент вертикального турбулентного обмена веществом. В [26] предполагается, что на нижней границе слоя диффузионного перемешивания в глубоком море концентрацию диспергированной нефти можно положить равной нулю: $C_D|_{z=L_D} = 0$.

Характерные значения коэффициента вертикальной турбулентной диффузии вблизи границы раздела океан–атмосфера $D \approx 10^{-3} - 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ ([23, 27]). Вертикальный масштаб перемешивания зависит от характеристик ветрового волнения и сдвиговых течений в верхнем слое моря и в работах [15, 27] оценивается в 10–20 м. В [20] коэффициент для турбулентного обмена теплом и веществом предлагается использовать в виде

$$K(z) = \kappa v_w^* z \text{Pr}^{-1} e^{-k_d z} f(\text{Ri}), \quad (12)$$

где κ – постоянная Кармана, v_w^* – динамическая скорость в воде, z – глубина, Pr – турбулентное число Прандтля, k_d – коэффициент затухания турбулентных напряжений с глубиной, $f(\text{Ri})$ – функция, учитывающая стратификацию в верхнем слое моря.

Максимального значения коэффициент обмена достигает на глубине $z = 1/k_d$:

$$K_{\text{max}} = \frac{\kappa}{e} \frac{1}{k_d} v_w^*. \quad (13)$$

Чтобы сделать оценки роли турбулентного обмена в процессе разрушения поверхностного нефтяного пятна, выберем в качестве масштаба для процессов турбулентного обмена $L \propto 1/k_d$ и назовем “скоростью диффузии” величину

$$v_d = \frac{K_{\text{max}}}{L} = \frac{\kappa}{e} v_w^* \frac{1}{e} = 0.14 v_w^* \propto W_{10}. \quad (14)$$

При выбранной параметризации (14) для вертикального профиля коэффициента турбулентного обмена “скорость диффузии” оказывается пропорциональной скорости ветра.

В первые моменты времени, пока концентрация диспергированных капель в верхнем слое ма-

ла, будет происходить “накачка” диспергированной нефти в слой перемешивания. С течением времени диффузионный поток капель вниз может стать сравнимым с потоком нефти из поверхностного слоя, и тогда рост концентрации нефтепродуктов в верхнем слое прекратится.

При стационарных гидрометеорологических условиях можно считать, что концентрация в СВП квазипостоянна, т.е. процесс поступления капель от поверхности в СВП балансируется двумя потоками, стремящимися уменьшить концентрацию капель, — всплытием к поверхности моря и турбулентным обменом с нижележащими водными массами. Баланс потоков массы нефти в СВП записывается в виде

$$0 = Q_{\text{down}} + Q_{\text{up}} + Q_{\text{dif}}, \quad (15)$$

где Q_{down} — поток капель от поверхности в водную толщу за счет оборачивания поверхности моря обрушивающимися ветровыми волнами, Q_{up} — поток капель к поверхности моря за счет положительной плавучести. Здесь обратим внимание, что ранее в соотношениях (7)–(10) мы уже провели оценку доли объема нефти, сосредоточенную в крупных каплях, которые успевают вернуться к поверхности моря за время между обрушениями ветровых волн и $Q_{\text{down}} = \rho_{\text{oil}} h_{\text{oil}} \underbrace{TOR F_{\text{up}}(d_{50}^N)}_{TOR}$. По-

скольку $F_{\text{up}}(d_{50}^N)$ представляет интегральную оценку коррекции потока нефти с поверхности моря, не дифференцированную по поддиапазонам размеров капель, то можно записать $Q_{\text{down}} = \rho_{\text{oil}} h_{\text{oil}} TOR'$.

Обозначим как c_d концентрацию капель нефти с диаметром от $d - \frac{1}{2}\Delta d$ до $d + \frac{1}{2}\Delta d$ в перемешанном верхнем слое моря. Поток нефти к поверхности воды будет складываться из потоков за счет капель всех размеров.

$$Q_{\text{up}} = \sum_d w_d c_d. \quad (16)$$

Из условия (15) концентрация капель нефти c_d в слое волнового перемешивания определится как

$$\underbrace{f_V(d)\Delta d}_{P(d)} \rho_{\text{oil}} TOR' h_{\text{oil}} = c_d (w_d + v_d), \quad (17)$$

где v_d — скорость диффузии на нижней границе слоя, $P(d)$ — доля объема нефти, сосредоточенная в интервале размеров капель в диапазоне от

Таблица 5. Оценка доли потока нефти (%) от поверхности моря, распространяющейся в водную толщу

Скорость ветра, м/с	Максимальный размер капель, мкм				
	1000	500	100	50	10
6	8	20	78	93	100
8	10	23	82	94	100
10	11	26	85	95	100
12	13	29	87	96	100
14	14	32	88	97	100
16	15	34	90	97	100

$d - \Delta d/2$ до $d + \Delta d/2$. Тогда с учетом (17) уравнение для изменения толщины пленки нефти на поверхности (1) запишется в виде

$$\rho \frac{\partial h_{\text{oil}}}{\partial t} = -\rho h_{\text{oil}} TOR' \left(1 - \int_0^{d_{\text{max}}} f_V(\zeta) \frac{w_d}{(w_d + v_d)} d\zeta \right) = -\rho h_{\text{oil}} TOR' F_m(d_{\text{max}}, v_d), \quad (18)$$

где $F_m(d_{\text{max}}, v_d) = 1 - \int_0^{d_{\text{max}}} f_V(\zeta) \frac{w_d}{(w_d + v_d)} d\zeta = v_d \int_0^{d_{\text{max}}} \frac{f_V(\zeta)}{(w_d + v_d)} d\zeta$ — доля объема нефтяных капель, не возвращающихся после обрушения волн к поверхности и зависящая от вертикального перемешивания.

В табл. 5 приведены оценки для функции $F_m(d_{\text{max}}, v_d)$ и степенного закона распределения объема нефти в дисперсной фазе в зависимости от максимального размера капель и от скорости ветра.

Таким образом, поток нефти в воду в виде диспергированных капель можно записать в виде

$$Q_{\text{disp}} = -\rho_{\text{oil}} h_{\text{oil}} TOR' F(d_{\text{max}}, v_d) = \rho_{\text{oil}} h_{\text{oil}} TOR F_{\text{up}}(d_{50}^N) F(d_{\text{max}}, v_d). \quad (19)$$

Принятая параметризация турбулентного обмена через скорость диффузии v_d , безусловно, относится к разряду самых примитивных, однако дает основания для вывода о том, что вертикальный турбулентный обмен может стать лимитирующим фактором при проникновении капель нефти в воду. Обмен импульсом, веществом и теплом при неустойчивой стратификации верхнего слоя океана может быть параметризован иначе, чем принято в (16), однако в данной работе мы не стремились к построению “точных” пара-

Таблица 6. Сравнение параметризаций процесса диспергирования нефтяных разливов

	Основное расчетное соотношение	Комментарий
1	$Q_{Mc+} = K_A(W_{10} + 1)^2 \frac{1}{1 + K_B h_{oil} \mu_{oil}^{1/2} \sigma_{ow}}$ <p>где μ_{oil}, σ_{ow} – вязкость нефти и межфазное натяжение на границе раздела нефть–вода, K_A, K_B коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.</p>	Нет физической картины процесса (–) и зависимость потока Q_{Mc+} от W_{10} , μ_{oil} , σ_{ow} , ρ_{oil} не обоснована
2	$Q_{DS} = C_{oil}(\mu_{oil}) \underbrace{D^{0.57} f_s F_{wc}}_{F_{DS}(W_{10})} d_{max}^{1.7}$ <p>где Q_{DS} – поток нефти в воду в диапазоне размеров капель от $d_o - \frac{1}{2} \Delta d$ до $d_o + \frac{1}{2} \Delta d$; f_s – часть поверхности моря, покрытая нефтью; d_o – средний диаметр капель нефти в соответствующем интервале; C_{oil} – параметр, зависящий от вязкости нефти; D – диссипация энергии обрушивающихся волн на единицу площади в одиночном обрушении.</p>	Нет зависимости от плотности и межфазного натяжения (–) Не определен d_{max} (–) Нет физической картины процесса (–) Основана на лабораторных экспериментах (+)
3	$Q_{J+} = -\alpha M_S$ $\alpha = P^* WCC / T_m$ $P^* = P^*(D^*) = F(D^*, \mu, \sigma),$ <p>где M_S – масса нефти на поверхности; WCC – доля поверхности моря, покрытая пеной; T_m – средний период волн; $F(d, d_{50}, S)$ – логнормальная функция распределения, где $d_{50} = \mu_{50}(v_{oil}, \sigma_{oil}, \rho_{oil})$ – медиана распределения, зависящая от вязкости, поверхностного натяжения и плотности нефти; D^* – пороговое значения диаметра капель</p>	Есть зависимость распределения капель нефти от плотности и межфазного натяжения (+) Не определен D^* (–) Нет физической картины процесса (–) Основана на лабораторных экспериментах (+)
4	$Q_{Z^+} = \begin{cases} \rho_{oil} TOR h_{oil} F_{up}(d_{50}^N) F_m(d_{max}, v_d), & h_{oil} \geq h_T \\ \rho_{oil} TOR h_T, & h_{oil} < h_T, \end{cases}$ $d_{50}^N = A \frac{h_{oil}^{0.4} \sigma^{0.6} 1 + 0.02 \left(\frac{\mu W_{10}}{\sigma} \right)^{0.6}}{\rho^{0.6} 0.57 W_{10}^{1.2}},$ $F_{up}(d_{50}^N) = \left(1 - K_{up} \frac{1}{w_{cr}} k_{St} (d_{50}^N)^2 \right),$ $F_m(d_{max}, v_d) = v_d \int_0^{d_{max}} \frac{f_V(d')}{(w_d + v_d)} dd',$ $d_{max}^N = d_{50}^N e^{3S}.$	Оценка TOR основана на эксперименте (+) Оценка d_{50}^N основана на эксперименте (+) Оценка $F_{up}(d_{50}^N)$ и $F_m(d_{max}, v_d)$ основана на простых физических принципах (+)

¹Здесь и далее в обозначении потоков добавлен нижний индекс, который соответствует фамилиям авторов работ, где приведена параметризация: [19] – $Mc+$, [12] – DS , [17] – $J+$, эта работа – $Z+$.

метризаций потока нефтяных капель в водную толщу, но поставили задачу оценить роль процессов контролируемых процесс разрушения нефтяной пленки на поверхности моря.

В предыдущем разделе данной работы мы приняли, что частички нефти, попавшие при обрушении волны в водную толщу, возвращаются к поверхности за время между обрушениями по-

верхностных волн, по порядку величины равное 10 волновым периодам. Однако по окончании этого времени, подъем капель, относящихся к первой порции, не закончится, хотя и за время между следующими обрушениями к поверхности поднимется меньше капель из первой порции, чем раньше. В итоге, при таком подсчете количества возвратившихся к поверхности капель мы вывели поток от поверхности. Корректирующий множитель $F_m(d_{max}, v_d)$ предназначен для учета роли долгопериодного всплытия капель и потока диспергированной нефти в нижележащие слои воды благодаря вертикальному градиенту концентрации и турбулентному обмену веществом, теплом и импульсом.

В табл. 6 приведены для сравнения параметризации процесса диспергирования нефтяного разлива с поверхности моря, обсуждаемые в данной работе и ранее в [3].

Отметим, что Q_{Mc+} стремится к постоянному и не зависящему от толщины пленки нефти значению при малых толщинах [19]. Увеличение вязкости нефти в параметризации Q_{Mc+} приводит к уменьшению потока капель. Похожий результат в параметризации Q_{DS} получается через экспериментально определенную зависимость $C_{oil}(\mu_{oil}) \propto \mu_{oil}^{-1}$ [11]. В параметризации Q_{Z+} , предложенной в данной работе, роль вязкости проявляется через увеличения размера капель, образующихся при дроблении пленки нефти обрушивающимися волнами. Тем самым возрастает доля капель, возвращающихся к поверхности за время между обрушениями волн, и уменьшается поток массы нефти с поверхности моря. В работе [17] было обращено внимание на необходимость замены параметризации потока капель за счет диспергирования Q_{DS} , не зависящего от количества нефти на поверхности моря, на соотношение

$$\frac{\partial M_S}{\partial t} = -\alpha M_S, \quad (20)$$

где M_S – масса нефти на единице площади поверхности моря. Ранее в работах [6, 16, 28] было предложено уравнение, описывающее изменение толщины нефти на поверхности воды за счет диспергирования

$$\frac{\partial h_{oil}}{\partial t} = -h_{oil}RF(r_0), \quad (21)$$

где h_{oil} – средняя толщина нефти, $F(r_0)$ – функция, показывающая, какая часть нефти из объе-

ма, проникшего под воду при обрушении, не вернется на поверхность, r_0 – условный максимальный размер капель нефти, R – скорость оборачивания поверхности без пленки нефти. Надо признать, что без серии экспериментов, осуществленных в проектах SINTEF [24, 10], не было достаточных оснований для оценки параметров распределения капель при диспергировании, их связи со свойствами нефти или нефтепродукта. Отличия параметризации [17] от используемой авторами данной работы в том, что определение скорости оборачивания поверхности моря как WCC/T_m требует интерпретации, в то время как оценка TOR как WCC/T_f соответствует изначальному определению [22] и физически обоснована [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы процессы возвращения капель нефти к поверхности моря за время между последовательными обрушениями волн с учетом неопределенности в выборе функции распределения капель нефти по размерам. Сделан вывод о том, что часто использующийся в моделях диспергирования степенной закон распределения капель с показателем степени $s = -2.3$ приводит к результатам, близким к использованию логнормального распределения капель с параметром формы $S = 0.7$.

Широко используемая и в настоящее время параметризация диспергирования нефти [12] сопряжена с необходимостью задания максимального размера капель, однако для выбора d_{max} не предлагалось достаточных оснований. В [3] на основе анализа результатов экспериментов [17, 24] предложено определение максимального размера капель нефти по правилу “трех сигм” с учетом закона распределения количества капель по размерам и результатов лабораторных экспериментов, устанавливающих связь параметров распределения размеров капель и свойств нефти, и проведены оценки параметров ансамбля диспергированных капель для различных сочетаний свойств нефти или нефтепродукта и скорости ветра.

В рамках данной работы было показано, что расчет проникновения капель нефти в водную толщу контролируется тремя процессами – вовлечением капель в слой волнового перемешивания за счет обрушения волн, дроблением пленки нефти на капли в турбулентном потоке и турбулентной диффузией ансамбля капель диспергированной нефти с учетом их положительной плавучести. Выбор пригодной параметризации коэффициента вертикального турбулентного об-

мена следует производить с учетом региональных гидрологических условий. Для проведения оценок в работе использовалась параметризация [20], которую следует рассматривать лишь как один из возможных вариантов описания.

Важным следствием анализа процесса возвращения капель нефти к поверхности в данной работе является вывод о том, что при достижении нефтяной пленкой критической толщины порядка 10 мкм, дальнейшее разрушение нефтяного слика будет происходить не по экспоненциальному закону, а с постоянной скоростью, зависящей только от скорости ветра.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-07-00513, № 14-07-00434 и № 15-07-04871.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бортковский Р.С.* Тепло- и влагообмен атмосферы и океана при шторме. Л.: Гидрометиздат, 1983. 160 с.
2. *Бровченко И.А.* Модель образования спектра нефтяных капель в приповерхностном слое океана // Прикладна гідромеханіка. 2004. Т. 6(78). № 2. С. 20–26.
3. *Зацева С.Н., Ивченко А.А., Коротенко К.А. и др.* “О роли ветрового волнения в процессе диспергирования нефтяного разлива в море // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. С. 556–564.
4. *Иванов А., Голубов Б., Евтушенко Н., Терлеева Н.* Картирование нефтепроявлений и признаков нефтегазоносности недр южного Каспия из космоса // Земля из космоса. 2015. № 4(20). С. 20–26.
5. *Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Затягалова В.В.* О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
6. *Овсиенко С.Н., Зацева С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти и оценка риска их воздействия на окружающую среду // Тр. ГОИН. 2005. Вып. 209. С. 248–271.
7. *Тумов Л.Ф.* Ветровые волны. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 294 с.
8. *Audunson T.* The fate and weathering of surface oil from the Bravo blowout // Marine Environmental Research. 1980. V. 3. № 1. P. 35–61.
9. *Babanin A.V.* Breaking of ocean surface waves // Acta Phys. Slovaca. 2009. V. 59. № 4. P. 305–535.
10. *Brandvik P.J., Johansen Ø., Farooq U. et al.* Sub-surface oil releases – Experimental study of droplet distributions and different dispersant injection techniques- version 2. A scaled experimental approach using the SINTEF Tower basin // SINTEF report No: A26122. Trondheim, Norway 2014. ISBN: 9788214057393.
11. *Delvigne G.A.L., Hulsen L.J.M.* Simplified laboratory measurements of oil dispersion coefficient – application in computations of natural dispersion. In: Proceeding of the 17th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar. 1994, Vancouver, BritishColumbia, V. 1. P. 173–187
12. *Delvigne G.A.L., Sweeney C.E.* Natural dispersion of oil // Oil and Chemical Pollution. 1988. V. 4. № 4. P. 281–310.
13. *Elliott A.J.* Shear diffusion and the spread of oil in the surface layers of the North Sea // Deutsche Hydrographische Zeitschrift. 1986. V. 39. № 3. P. 113–137.
14. *Fingas F.M.* A Review of Natural Dispersion Models // Proc. 37th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response. June, 3–5, 2013. P. 285–471.
15. *Forrester W.D.* Distribution of suspended oil particles following the grounding of the tanker Arrow // J. Marine Res. 1971. № 29. P. 151–170.
16. Helsinki Commission (HELCOM) An Updated Assessment of the Risk for Oil Spills in the Baltic Sea Area // 2002, Helsinki Commission (HELCOM), Finland. <http://www.helcom.fi/stc/files/shipping/RiskforOilSpillsReport2002.pdf>.
17. *Johansen O., Reed M., Bodsberg N.R.* Natural dispersion revisited // Marine Pollution Bulletin. 2015. V. 93. Issues 1–2. P. 20–26.
18. *Li M., Garrett C.*, The relationship between oil droplet size and upper ocean turbulence // Marine Pollution Bulletin. 1998. V. 36, P. 961–970.
19. *Mackay D., Buist I., Mascarenhas R., Paterson S.* Oil spill processes and models // Environment Canada Report No EE-8. Ottawa. Ontario, 1980. 96 p.
20. *Nakamura, Y., Hayakawa N.* Modelling of thermal stratification in lakes and coastal seas // Hydrology of Natural and Manmade Lakes (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991). IAHS Publ. 1991. № 206
21. *Neuman G., Pierson W.J.* Principles of Physical Oceanography Prentice-Hall, New Jersey, 1966. 545 p.
22. *Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // J. Fluid Mech. 1985. V. 156. P. 505–531
23. *Proctor R., Elliott A.J., Flather R.A.* Forecast and hindcast simulations of the Braer oil spill. Marine Pollution Bulletin. 1994. V. 28. P. 219–229.
24. *Reed M., Johansen Ø., Leirvik F., Brors B.* Numerical Algorithm to Compute The Effects of Breaking Waves on Surface Oil Spilled at Sea. Final Report Submitted to the Coastal Response Research Center. Report F10968, SINTEF, Trondheim, Norway, 131p. <https://crrc.unh.edu/sites/crrc.unh.edu/files/final_report_sintef_natural_dispersion_october-2009.pdf>.

25. *Stramska M., Petelski T.* Observations of oceanic white-caps in the north polar waters of the Atlantic // *J Geophys. Res.: Oceans.* 2003. V. 108. № C3. doi 10.1029/2002JC001321, 10p
26. *Tkalich P., Chan E.S.* Vertical mixing of oil droplets by breaking waves // *Marine Pollution Bulletin.* 2002. V. 44. № 11. P. 1219–1229.
27. *Thorpe S.A.* The effect of Langmuir circulation on the distribution of submerged bubbles caused by breaking wind waves // *J. Fluid Mech.* 1984. V. 142. P. 151–170.
28. *Zatsepa S., Ivchenko A., Ovsienko S.* A local operative model for oil drift and dispersion // *Proc. Combating Marine Oil Spills in Ice and Cold Conditions, Helsinki, Finland, 1992.* P. 189–192.

Phenomenological Model of Natural Dispersion of the Oil Spill in the Sea and Some Associated Processes Parameterizations

S. N. Zatsepa, A. A. Ivchenko, K. A. Korotenko, V. V. Solbakov, V. V. Stanovoy

A new parameterization of the natural dispersion of the oil spill in the sea due to the destruction of the oil slick by wind waves and the penetration of oil droplets into the water is proposed. Quantity of oil returning to the surface due to positive buoyancy over a period of time between wind wave overturns is estimated. The role of vertical turbulent exchange as a factor limited the oil droplets flux from the sea surface into the water column is discussed.