

В.А. Шлычков

## Влияние обменных процессов в системе «атмосфера – водоем» на эволюцию поверхностной нефтяной пленки

*Институт водных и экологических проблем СО РАН (Новосибирский филиал)*

Поступила в редакцию 8.07.2002 г.

Численная модель турбулентного взаимодействия приводного слоя воздуха и верхнего слоя водоема с учетом волнения применяется для расчета касательных напряжений на поверхностях раздела и термического режима пленки с учетом испарения легких фракций. Поле ветровых волн описывается в терминах спектральной плотности волновой энергии. Акцент сделан на детализацию вертикального массопереноса между воздушным потоком, вязкой пленкой и водой. Дан пример модельного расчета параметров течения при суточном ходе солнечной радиации.

Аварийные разливы нефти на воде являются весьма опасным фактором экологического загрязнения природных водоемов. Для разработки практических мер по ликвидации последствий аварии необходимо располагать информацией о параметрах нефтяной пленки – конфигурации, толщине, температуре, компонентном составе смеси и т.п., которые могут значительно меняться со временем под влиянием метеорологических и гидрофизических процессов.

Теоретические модели растекания, дрейфа и диффузии разлитой нефти дают приемлемую для практики точность в условиях океана [1, 2], с большими разгонами ветра, слабо выраженной стратификацией пограничных слоев воды и воздуха, невысокой изменчивостью метеорологических параметров (в масштабах пятна). По отношению к внутренним водоемам с ограниченной площадью акватории асимптотические оценки могут оказаться сравнительно грубыми вследствие неучета явлений локального масштаба, таких как взаимодействие приповерхностных турбулентных слоев с тонкой вертикальной структурой.

Для получения количественных характеристик диффузии легких фракций к поверхности и их испарения важным является описание теплообмена через границы раздела «вода – нефтяная пленка – воздух». В процессе образования капельной эмульсии «нефть – вода» существенную роль играет поверхностное взбалтывание, обусловленное ветровыми волнами и потоком турбулентной энергии в воду. Напряжения ветра формируют вертикальный сдвиг скорости дрейфа в пленке, что приводит к вытягиванию слика в направлении ветра и уменьшению его толщины [3]. Теплообмен и связанное с ним испарение низкомолекулярных фракций способствуют истончению пленки и убыванию суммарной массы нефти. Экмановский поворот скорости в водоеме вызывает отклонение поверхностного дрейфа от направления ветра в приводном слое с соответствующим изменением траектории движения слика. Перечисленные механизмы

обуславливают эволюцию нефтяного пятна в водоеме на стадии «турбулентной диффузии», следующей за стадией «поверхностного натяжения» [1].

Ниже сформулирована трехслойная численная модель теплопереноса в воздухе, нефтяной пленке и водоеме с детализацией процессов по вертикали и учетом генерации ветровых волн на ограниченной акватории. Модель используется для получения количественных оценок параметров нефтяного пятна на внутрисуточных масштабах времени при умеренных ветрах.

### Постановка задачи

Направим ось  $x$  по горизонтали вдоль скорости ветра  $U_a$ , а ось  $z$  – вертикально вверх, причем уровень  $z = 0$  совместим с поверхностью раздела «воздух – пленка». Движение воздушного потока будем рассматривать в области  $0 \leq z \leq h_{10}$ , где  $h_{10}$  – уровень, на котором заданы значения метеорологических величин. В этой области выделим переходный слой толщиной  $h_s$ , занятый движущимися волнами. Для описания турбулентного движения воздуха рассмотрим систему

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} K_a \frac{\partial U_a}{\partial z} &= \gamma_L |U_a - C| (U_a - C), \\ \frac{\partial}{\partial z} K_a \frac{\partial \Theta}{\partial z} &= 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} K_a \frac{\partial Q}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} K_a \frac{\partial N_j}{\partial z} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $K_a$  – коэффициент вертикального турбулентного обмена;  $\Theta$ ,  $Q$  – температура и удельная влажность воздуха;  $N_j$  ( $j = 1, \dots, J$ ) – удельное содержание пара  $j$ -го компонента нефтяной смеси в воздухе;  $C$  – фазовая скорость волн;  $\gamma_L$  – параметр аэродинамического сопротивления. Величина  $\gamma_L$  характеризует соотношение нормального и касательного напряжений ветра и в значительной степени влияет на интенсивность поверхностного теплообмена, так как последний обусловлен только касательным компонентом.

В области  $z > h_s$  считается  $\gamma_L = 0$ , а для расчета  $\gamma_L$  в переходном слое привлекается уравнение эволюции волновой энергии в спектральной форме [4]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + C_x \frac{\partial S}{\partial x} + C_y \frac{\partial S}{\partial y} = I - D - G_p, \quad (2)$$

где  $S(\sigma, \varphi, x, y, t)$  – частотно-угловой спектр ветровых волн;  $\sigma$  – частота и  $\varphi$  – направление распространения;  $I$  – поток энергии к волнам;  $D$  – диссипация за счет обрушения волн;  $G_p$  описывает гасящее действие пленки (на свободной воде  $G_p = 0$ ). Из анализа энергетических потоков в системе «атмосфера – ветровые волны – водоем» вытекает следующее соотношение [5]:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho_w g \int_0^{\infty} d\sigma \int_0^{2\pi} I d\varphi = \\ & = \rho_a \gamma_L \int_0^{h_s} C |U_a - C| (U_a - C) dz, \end{aligned} \quad (3)$$

которое дает явное выражение для  $\gamma_L$ . В (3) обозначено:  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_w$ ,  $\rho_a$  – плотность воды и воздуха.

При описании вертикального обмена в пленке ( $h_p < z < 0$ ) будем считать движение нефти ламинарным [3]. В этом предположении для составляющих скорости дрейфа  $U_p$ ,  $V_p$ , распределения температуры  $T_p$  и концентрации жидких компонентов смеси  $H_j$  запишем

$$\begin{aligned} \nu_p \frac{\partial^2 U_p}{\partial z^2} = 0, \quad \nu_p \frac{\partial^2 V_p}{\partial z^2} = 0; \\ \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} + \frac{1 - \delta_p}{\rho_p c_{pp}} \frac{\partial R_0}{\partial z}, \quad \frac{\partial H_j}{\partial t} = \eta_j \frac{\partial^2 H_j}{\partial z^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $R_0$  – поток солнечной радиации;  $\delta_p$  – доля поверхностного поглощения;  $\rho_p$ ,  $\nu_p$ ,  $\lambda_p$  – плотность, молекулярная вязкость и температуропроводность нефти;  $c_{pp}$  – удельная изобарическая теплоемкость пленки;  $\eta_j$  – коэффициент диффузии  $j$ -го компонента. В (4) принята гипотеза о малости отношения вертикального размера пленки к горизонтальному, в силу чего направление скорости дрейфа не меняется в пределах толщины пленки [3].

Уравнения, определяющие течение в верхнем слое водоема при  $H_w < z < h_p$ , запишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_w}{\partial t} &= l V_w + \frac{\partial}{\partial z} K_w \frac{\partial U_w}{\partial z}, \\ \frac{\partial V_w}{\partial t} &= -l U_w + \frac{\partial}{\partial z} K_w \frac{\partial V_w}{\partial z}, \\ \frac{\partial T_w}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} K_w \frac{\partial T_w}{\partial z} + \frac{(1 - \delta_p)(1 - \delta_w)}{\rho_w c_{pw}} \frac{\partial R_0}{\partial z}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $U_w$ ,  $V_w$  – компоненты скорости дрейфа;  $T_w$  – температура воды;  $l$  – параметр Кориолиса;  $K_w$  – коэффициент вертикального турбулентного обмена;

$\delta_w$  характеризует долю поглощения солнечной радиации на границе раздела «нефть – вода». Для расчета характеристик турбулентности в воде используются следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial b}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} K_w \frac{\partial b}{\partial z} + K_w J_w - \varepsilon, \quad K_w = c_1 \frac{b^2}{\varepsilon}, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} K_w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + c_2 \frac{\varepsilon}{b} K_w J_w - c_3 \frac{\varepsilon^2}{b} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $b$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  – скорость ее диссипации;  $J_w = (U_w)_z^2 + (V_w)_z^2 - g\beta_T T_z$ ,  $\beta_T$  – коэффициент термического расширения воды;  $c_i$  – универсальные постоянные [6].

Краевые условия сформулируем следующим образом:

$$\begin{aligned} U_a &= U_{10}; \quad \Theta = \Theta_{10}; \quad Q = Q_{10}; \\ N_j &= f_{10} N_{j0} \quad \text{при } z = h_{10}, \end{aligned} \quad (7)$$

где величины с индексом «10» считаются заданными;  $f_{10}$  – безразмерная характеристика концентрации паров нефти на уровне наблюдений по отношению к приповерхностному значению  $N_{j0}$ . Если принять предположение о подобии профилей концентрации паров нефти над пленкой и поля влажности над открытой водой, то  $f_{10}$  является аналогом относительной влажности в приводном слое. Поскольку измерение величины  $f_{10}$  в натуральных условиях связано с техническими трудностями, то ее значение можно оценить по характерной величине относительной влажности над водоемом, полагая, например,  $f_{10} = 0,85$ . Для уровня, соответствующего верхней границе пленки, запишем

$$U_a = U_p; \quad \rho_a K_a \frac{\partial U_a}{\partial z} = \rho_p \nu_p \frac{\partial U_p}{\partial z}; \quad \frac{\partial V_p}{\partial z} = 0;$$

$$\rho_p c_{pp} \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} = \rho_a c_{pa} K_a \frac{\partial \Theta}{\partial z} + \sum_j L_j E_j + \delta_p R_0 - R_F, \quad (8)$$

$$\Theta = T_p, \quad E_j = \rho_{pj} \eta_j \frac{\partial H_j}{\partial z} \quad \text{при } z = 0,$$

где  $L_j$  – теплота парообразования;  $E_j = \rho_a K_a \frac{\partial N_j}{\partial z}$  – поток массы пара летучих фракций нефти;  $\rho_{pj}$  – индивидуальная плотность жидких фракций в пленке ( $\rho_p = \sum_j \rho_{pj} H_j$ );  $R_F$  – длинноволновое излучение.

Последнее равенство в (8) выражает покомпонентный баланс массы на границе раздела «воздух – пленка».

При описании механизма испарения нефти в воздух следует учесть ограниченность скорости диффузионного переноса жидких фракций к испаряющей поверхности. Это важно для легких низкомолекулярных соединений, когда интенсивность их испарения ограничивается низкими темпами поступления вещества из нижних слоев пленки. Запишем эти условия в виде

$$\begin{cases} N_j = N_{j0}, & H_j > 0 \\ H_j = 0, & H_j < 0 \end{cases} \text{ при } z = 0, \quad (9)$$

где  $N_{j0} = e_j M_j / (p_a M_a)$  – насыщающее значение пара [7];  $M_a, M_j$  – молекулярные веса воздуха и нефтегазовых составляющих;  $e_j$  – парциальное давление газа с номером  $j$ ;  $p_a$  – атмосферное давление. Соотношения (9) означают, что в условиях дефицита жидкого компонента ( $H_j < 0$ ) на поверхности принудительно полагается  $H_j = 0$ , что дает необходимые условия для расчета концентрации и потока пара данной фракции в атмосферу.

Условия на границе раздела «нефть – вода» сформулируем в виде

$$\begin{aligned} U_p &= U_w; \quad V_p = V_w; \quad T_p = T_w; \\ \rho_p \nu_p \frac{\partial U_p}{\partial z} &= \rho_w K_w \frac{\partial U_w}{\partial z} - \frac{\rho_w g}{2U_w} \int_0^\infty d\sigma \int_0^{2\pi} G_p d\varphi, \\ \rho_p \nu_p \frac{\partial V_p}{\partial z} &= \rho_w K_w \frac{\partial V_w}{\partial z}; \quad K_w \frac{\partial b}{\partial z} = D_1, \quad K_w = h_s \sqrt{b}; \quad (10) \\ \rho_w c_{pw} K_w \frac{\partial T_w}{\partial z} &= \rho_p c_{pp} \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} + \delta_p \delta_w R_0; \\ \frac{\partial H_j}{\partial z} &= 0 \quad \text{при } z = h_p, \end{aligned}$$

где  $D_1$  – поток турбулентной энергии в воду за счет обрушения волн, определяемый посредством функции  $D$  [5]. Слагаемое с  $G_p$  в (10) отражает механизм передачи энергии волн дрейфовому течению при вязком демпфировании пленкой. В целом можно показать, что сформулированные условия на поверхностях раздела обеспечивают баланс энергии в системе «воздушный поток – нефтяная пленка – ветровые волны – течение в водоеме».

На нижней границе области в водоеме делается предположение о затухании движений:

$$U_w = V_w = 0; \quad \frac{\partial T_w}{\partial z} = \gamma_H; \quad b = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = H_w, \quad (11)$$

где  $\gamma_H$  – устойчивая температурная стратификация воды на глубине.

## Численный эксперимент

Задача (1) – (11) решалась методом конечных разностей по геометрическим переменным и времени. Использованы численные схемы со вторым порядком аппроксимации.

Рассмотрим результаты модельного расчета термодинамического режима нефтяной пленки при  $U_{10} = 7$  м/с, когда кромка нефтяного слика с начальной толщиной  $|h_p| = 1$  см находится на расстоянии 1 км от берега. Рис.1 показывает распределение параметров волнения вдоль оси  $x$  спустя 3 ч после начала инте-

рирования. Среднеквадратическое возвышение волновой поверхности  $h_0 = \int_0^\infty d\sigma \int_0^{2\pi} S d\varphi$  увеличивается с рас-

стоянием от берега, достигая значения 4,2 см у переднего края слика (кривая 1), и начинает уменьшаться при  $x > 1$  км. Аналогичный характер имеет распределение параметра шероховатости  $z_0$  водной поверхности (кривая 2).

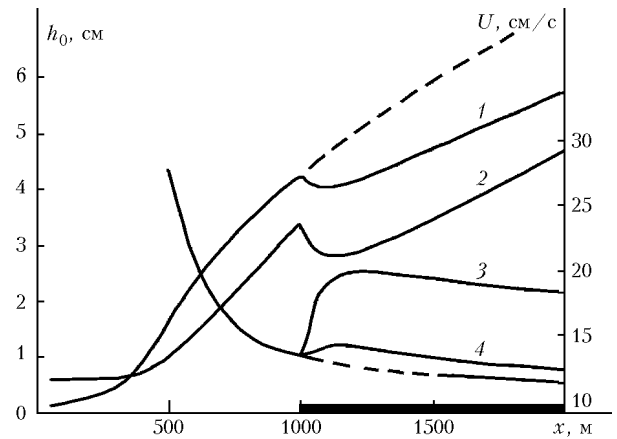


Рис. 1. Горизонтальное распределение среднеквадратического возвышения (кривая 1), параметра шероховатости (кривая 2) и скоростей дрейфа пленки (кривая 3) и воды (кривая 4). Пунктирные линии соответствуют параметрам задачи без пленки

Максимальное значение  $z_0$  на рис. 1 равно 0,4 мм. Для сравнения отметим, что параметрические формулы для открытого океана [8] дают при тех же условиях значение  $z_0 = 0,9$  мм. Представление о скорости дрейфа на поверхности  $z = 0$  дает кривая 3 (шкала на правой вертикали рис. 1). Движение в области, занятой пленкой, происходит быстрее, чем на открытой воде, что видно по скачку кривой 3 на кромке слика при  $x = 1000$  м. Это связано с большей гладкостью поверхности, покрытой нефтью, и меньшими значениями  $z_0$  на ней, а также передачей волнового импульса дрейфовому течению. По кривой 4, которая показывает распределение  $U_p$  на поверхности раздела «нефть – вода», можно судить о перепаде скорости по толщине пленки.

Вертикальный сдвиг скорости в пленке обуславливает эффект продольного вытягивания нефтяного пятна и уменьшения его толщины [3]. Другим фактором, приводящим к изменению  $h_p$ , является потеря массы нефти при испарении. В совокупности эти процессы способствуют ослаблению воздействия пленки на поверхностные волны и ветровой дрейф, так что закономерности миграции нефти по ограниченной акватории оказываются сложнее, чем при учете только динамических факторов [3]. В частности, существенную роль может играть тепломассоперенос между пленкой и смежными средами.

При задании термического режима системы определим начальный момент как 10 ч утра летнего дня и примем  $\Theta_{10} = 20$  °C,  $\gamma_H = 0,2$  °C/м,  $\delta_p = 1$  (нулевая

прозрачность нефтяной пленки). Качественный состав нефтяной смеси схематизируем путем задания трех компонентов из ряда метановых углеводородов (легкий, средний и высокомолекулярный) с равным долевым содержанием и молекулярными весами  $M = 86, 114, 198$  г/моль. Температура кипения фракций равна соответственно 60, 99, 190 °С. Необходимые физико-химические константы и зависимости выбирались из табличных данных [9].

Тепломассообмен в системе развивается по следующей схеме. В период солнечной инсоляции происходит прогрев нефтяной массы, который сопровождается интенсивным испарением легких фракций и поглощением тепла на парообразование. Рис. 2 показывает изменение со временем скорости испарения трех рассматриваемых фракций (кривые 1, 2, 3) а также суммарный поток газов от поверхности (кривая 4).

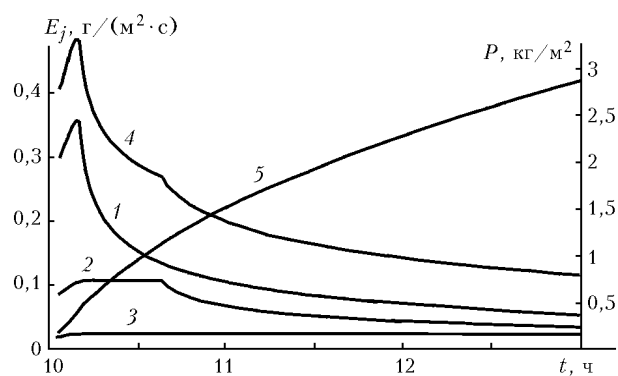


Рис. 2. Изменение со временем потока нефтяных паров для компонентов 1, 2, 3 (кривые 1, 2, 3), их суммы (кривая 4) и общей потери массы (кривая 5)

У наиболее подвижного компонента 1 смеси можно выделить два качественно различных периода: вначале (до момента  $t \approx 10,10$ ) развиваются процессы свободного испарения, когда первоначальный запас жидкой фазы обеспечивает состояние насыщенности паров у поверхности. Дальнейшее испарение лимитируется механизмом диффузионного транспорта вещества к поверхности, и поток пара уменьшается со временем. У более тяжелой фракции 2 вследствие меньшей скорости испарения первый период увеличивается до 40 мин (кривая 2 на рис. 2), после чего интенсивность парообразования также уменьшается. Ввиду низкой испаряемости компонента 3 диффузионный механизм не препятствует установлению насыщенного режима на поверхности и поток массы практически не меняется со временем (кривая 3).

Суммарный поток газов  $E$  демонстрирует кривая 4 на рис. 2. Интегрирование этой величины по времени дает зависимость потерь нефтяной массы  $P$  с единицы площади с момента начала испарения (кривая 5 на рис. 2, шкала справа). В целом за 3-часовой интервал испарилось 2,84 кг/м<sup>2</sup>, в том числе 1,5 кг/м<sup>2</sup> за первый час. Расчеты показывают, что в течение 24 ч суммарная масса нефти уменьшается на 4,8 кг/м<sup>2</sup>. С учетом того, что неиспаряющиеся фракции (парафины, смолы) не включены здесь в рассмотрение, полу-

ченная оценка близка к реальным объемам испарения разлитой нефти [1].

Рис. 3 иллюстрирует вертикальное распределение концентрации по толщине пленки при  $t = 13,00$ .

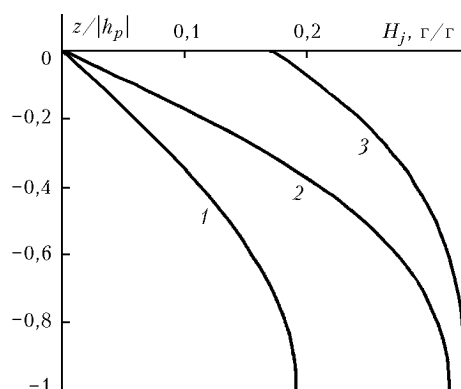


Рис. 3. Вертикальные профили концентрации компонентов 1, 2, 3 нефти в пленке при  $t = 13$  ч

Самая легкая фракция (кривая 1), миновав стадию максимально возможного испарения, находится в состоянии лимитированного режима ( $H_1 = 0$  при  $z = 0$ ), причем ее потеря за 3 ч составила 60% от первоначальной массы. То же относится и к средней фракции (кривая 2), однако доля испарившейся части здесь составляет 34%. Диффузионный перенос наиболее тяжелой фракции (кривая 3) и невысокая скорость парообразования обуславливают ненулевые значения  $H_3$  на поверхности, так что этот компонент находится в стадии свободного испарения.

## Заключение

Представлена численная модель для описания основных термодинамических механизмов, определяющих эволюцию нефтяной пленки на поверхности водоема с ограниченной акваторией. В рамках модели могут быть получены такие важные характеристики, как температура пленки, перепад скорости в слое нефти, фракционный состав смеси, концентрация газовых компонентов у поверхности. Последний параметр позволяет, например, решать задачу сжигания нефти на месте разлива в целях ликвидации экологического ущерба, так как возможность воспламенения смеси связана с концентрацией газовой фазы у поверхности. Модель не описывает явно ряд значимых процессов в пленке — например, фотохимическое разложение, биодеградацию, растворение и нефтекапельное диспергирование в воде и т.п. Вместе с тем набор воспроизводимых параметров физической системы допускает существенное расширение функциональных возможностей модели. Так, поток турбулентной энергии за счет поверхностного взбалтывания ( $D_1$ ) является важным при образовании водно-нефтяной эмульсии, коэффициент турбулентного обмена определяет скорость диффузии пятна и вовлечение фракций с малой плавучестью в вертикальный обмен с распространением нефти в глубинные слои водоема.

Модель дает физически разумные результаты и является функционально замкнутой. В связи с этим она может применяться как для расчета разовых разливов нефти, так и в виде составной части экспертной системы при решении задач охраны и рационального использования водных ресурсов.

Работа поддержана грантом № 00-05-98542 «Ведущие научные школы».

1. *Журбас В.М.* Основные механизмы распространения нефти в море // Итоги науки и техники. МЖГ. Т. 12. М.: ВИНТИ, 1978. С. 144–159.
2. *Озмидов Р.В.* Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 280 с.
3. *Исаев Г.В., Овсиенко С.Н.* Распространение вязкой пленки на поверхности моря при ветровом дрейфе // Ме-

теорол. и гидрол. 1983. № 2. С. 74–81.

4. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 375 с.
5. *Шлычков В.А.* Модель локального динамического взаимодействия водоема и атмосферы при поверхностном волнении // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 10. С. 961–965.
6. *Роди В.* Модели турбулентности окружающей среды // Методы расчета турбулентных течений / Под ред. В. Кольмана. М.: Мир, 1984. С. 227–322.
7. *Дьярмати И.* Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1974. 304 с.
8. *Филлипс О.М.* Динамика верхнего слоя океана. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 319 с.
9. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1963. 708 с.

***V.A. Shlychkov. Influence of exchange processes in «atmosphere – water body» system on evolution of surface oil film.***

A numerical model of turbulent interaction in the near-surface air layer and the top water layer accounting for surface roughness is applied to calculation of tangent stresses on the air/water interface and thermal conditions of an oil film with allowance for evaporation of light fractions. The wind wave field is described in terms of the spectral density of wave energy. An emphasis is on details of the vertical mass and energy exchange between air flows, viscous film, and water. Model calculation of current parameters at the diurnal behavior of the solar radiation is exemplified.