

УДК 551.465.553:529.2+541.144.8

## ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИЙ ЛЕНГМЮРА И ЭНЕРГООБМЕН МЕЖДУ ВОДОЕМОМ И АТМОСФЕРОЙ

Н.С. Блохина, А.Е. Орданович

*(кафедра физики моря и вод суши; кафедра прикладной математики и управления)*

С помощью оригинальной математической модели исследуется влияние нефтяных загрязнений на характеристики циркуляций Ленгмюра, на потоки скрытого и явного тепла из водоема в атмосферу. Расчеты проведены в широких диапазонах скорости ветра над водоемом и числа Дальтона, зависящего от загрязнений поверхности воды. Выявлен интервал значений этих параметров, при которых циркуляции Ленгмюра исчезают. Проведены оценки перепада температуры между поверхностью воды и воздухом и поверхностью воды и дном в зависимости от скорости ветра и числа Дальтона.

Увеличение добычи нефти на континентальном шельфе и морских перевозок нефтепродуктов приводит к возрастающему поступлению их в Мировой океан. В результате на поверхности воды образуются нефтяные пленки, которые кардинально меняют физические свойства зоны контакта вода-воздух. В частности, пленки способствуют изменению альбедо, гашению капиллярных и мелких гравитационных волн, изменению температуры поверхности воды и др. Наиболее сильно пленки влияют на испарение. По оценкам [1-4] оно может уменьшиться более чем на 60%. Таким образом, нефтяные загрязнения могут оказывать глобальное влияние на процесс поступления влаги в атмосферу, существенно изменять потоки скрытого тепла, охлаждающие верхний слой водных бассейнов, и тем самым значительно влиять на климат в целом.

Наибольшее влияние на процессы испарения оказывает температура поверхности воды. В свою очередь эта температура определяется балансом потоков тепла, необходимых для испарения, и потоков тепла, подводимых из нижележащих сильно турбулизованных слоев воды. Указанные процессы, определяющие температуру поверхности воды, существенно зависят от наличия нефтяных пленок на ее поверхности. В данной работе рассматривается математическая модель термогидродинамических процессов в водоеме, позволяющая оценить влияние нефтяной пленки на процессы обмена между водоемом и атмосферой.

Известно [5], что при скоростях ветра до 16 м/с и различных гидрометеорологических условиях в верхних слоях водоемов могут возникать веретенообразные структуры (циркуляции Ленгмюра - ЦЛ) с осями, направленными вдоль направления ветра. Вертикальные размеры таких вихрей могут достигать сотен метров, охватывая весь квазиоднородный слой и участвуя в его перемешивании. Как показывает анализ физических факторов, определяющих возникновение и существование ЦЛ, нефтяные за-

грязнения, изменяя характеристики зоны контакта вода-воздух, могут существенным образом влиять на интенсивность и другие характеристики ЦЛ. В свою очередь ЦЛ, формируя термическую и динамическую структуры верхнего слоя океана, в значительной мере определяют поступление тепла и влаги из океана в атмосферу.

Ранее в ряде работ [6,7] авторы сформулировали математическую модель циркуляций Ленгмюра, провели серию контрольных расчетов [8-11] и выполнили ее верификацию по данным натурных наблюдений [12]. В настоящей работе с помощью этой модели исследуется влияние нефтяных пленок на характеристики ЦЛ, потоки явного и скрытого тепла из водоема в атмосферу при различных метеоусловиях.

Основные положения теории циркуляций Ленгмюра подробно описаны в работах [6,7]. По мнению авторов этих работ, основной причиной возбуждения циркуляций служит неустойчивая термическая стратификация, возникающая при радиационном выхолаживании поверхности водоема, а также при охлаждении поверхности водоема вследствие явного потока тепла и испарения. При этом дрейфовое течение, возникающее в результате воздействия ветра, выстраивает конвективные структуры в вихревые циркуляции с осями, ориентированными по направлению ветра.

Важным положением теории признается тот факт, что как дрейфовое течение, так и крупномасштабные конвективные циркуляции существуют в условиях развитой турбулентности (характерные числа Рейнольдса  $Re$  и Грасхофа  $G_r$  равны  $10^6$  и  $10^{12}$  соответственно). Такие упорядоченные вихревые образования рассматриваются как когерентные структуры [13], и для построения данной модели используется методика [6]. Эта методика опирается на неоднократно указывавшееся различными авторами сходство упорядоченных движений в условиях развитой турбулентности (когерентных структур) и

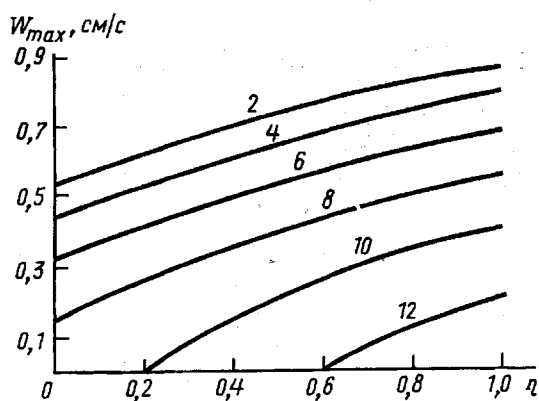


Рис. 1. Зависимость вертикальной максимальной скорости  $W_{\max}$  движения жидкости в циркуляциях от параметра  $\eta$ . Цифрами на кривых обозначены значения скорости ветра (м/с)

вторичных течений, возникающих при потере устойчивости в аналогичных условиях в ламинарных потоках.

Процессы в водоеме описываются полной нелинейной системой уравнений термогидродинамики в приближении Буссинеска. Будем считать, что поверхность водоема является свободной и над ней дует постоянный по величине и направлению ветер со скоростью  $V$ . На свободной верхней границе водоема учитывается его взаимодействие с атмосферой и задается поток количества движения (напряжение трения ветра)  $\tau_0$  и поток тепла  $Q_0 = Q_T + Q_q + Q_r$ , где  $Q_r$  – радиационный поток тепла – считается заданным, а напряжение трения  $\tau_0$ , поток явного тепла  $Q_T$  и затраты тепла на испарение  $Q_q$  определяются соотношениями

$$\tau_0 = \rho_a C_U V^2, \quad (1)$$

$$Q_T = c_p \rho_a C_T (T - T_a) V, \quad (2)$$

$$Q_q = L \rho_a C_q (q - q_a) V. \quad (3)$$

Здесь  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $c_p$  – теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $L$  – удельная теплота парообразования;  $C_U, C_T, C_q$  – коэффициент трения ветра, числа Стентона и Дальтона для переноса тепла и водяного пара соответственно;  $T_a, q_a$  – температура и удельная влажность воздуха;  $T, q$  – температура воды и удельная влажность вблизи ее поверхности.

В данной работе исследовалось влияние изменения характеристик обмена, прежде всего числа Дальтона  $C_q$  (см. (3)), на характеристики ЦЛ, потоки скрытого и явного тепла из водоема в атмосферу.

В работе использовались данные реальных наблюдений ЦЛ на Можайском водохранилище 22 мая 1979 г. [12] и следующие значения гидрометеорологических параметров: глубина верхнего перемещенного слоя  $H=3$  м, относительная влажность воздуха  $f=87\%$ , температура воздуха  $T_a=6,5^\circ\text{C}$ , температура воды на нижней границе области существования циркуляций Ленгмюра  $T_b=12,77^\circ\text{C}$ . Исследования проводились в интервале скоростей ветра  $V$  от 2 до 14 м/с при различных значениях коэффициента

Дальтона  $C_q$ . При этом считалось, что наличие нефтяной пленки может уменьшить коэффициент Дальтона. Номинальные значения коэффициентов обмена  $C_{Tn}, C_q^n$  и  $C_{un}^n$ , как и в работе [12], принимались равными  $1,5 \cdot 10^{-3}, 1,5 \cdot 10^{-3}$  и  $1,025 \cdot 10^{-3}$  соответственно. При этом в расчетах задавалось  $C_q = C_q^n \cdot \eta$ , где  $\eta$  принимало значения 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0.

В результате расчетов были получены поля распределения температуры, функции тока и скорости для упорядоченных структур, профили температуры и скорости для дрейфового (среднего) течения, коэффициенты турбулентной вязкости и некоторые другие характеристики циркуляций Ленгмюра.

Наиболее сильно от коэффициента Дальтона  $C_q$  зависит интенсивность циркуляций. На рис. 1 представлены зависимости значения максимальной вертикальной скорости в циркуляциях ( $W_{\max}$ ) в зонах опускания воды от значения коэффициента  $\eta$  при различных скоростях ветра. Видно, что интенсивность движения в циркуляционных структурах максимальна при  $\eta=1$  и при уменьшении коэффициента Дальтона уменьшается. При больших скоростях ветра уменьшение коэффициента Дальтона может даже привести к срыву возбуждения циркуляционных структур.

На рис. 2 показаны вертикальные профили средней температуры в циркуляционных структурах в зависимости от скорости ветра и коэффициента Дальтона. Видно, что увеличение загрязнения (уменьшение коэффициента  $\eta$ ) существенно влияет на поле температуры воды. В частности, при наличии циркуляций Ленгмюра все существенные изменения температуры концентрируются вблизи поверхности водоема и нижней границы области существования циркуляций, а в центральной части вихря (ядре потока) образуется практически изотермический слой. Наиболее ярко это видно на рис. 2, а. При увеличении скорости ветра и уменьшении параметра  $\eta$  вихри исчезают, и профили температуры становятся практически линейными (рис. 2, б). Подробно причина образования такого профиля обсуждается в работах [8, 14]. Из рис. 3 видно, что уменьшение параметра  $\eta$ , а следовательно, и коэффициента Дальтона  $C_q$  при одной и той же скорости ветра приводит к уменьшению перепада температуры между дном и поверхностью водоема ( $T_b - T_s$ ), а увеличение скорости ветра при одном и том же значении  $\eta$  – к его увеличению. В первом случае происходит увеличение, а во втором – уменьшение устойчивости водных масс. При этом перепад температуры между поверхностью воды и воздухом ( $T_s - T_a$ ) (рис. 3) имеет обратную тенденцию и не превышает 1,5% от минимальной величины перепада при любых значениях метеопараметров.

На практике зависимость (рис. 1) можно использовать для косвенной оценки эффективного (с учетом изменчивости по акватории) коэффициента Дальтона по данным измерений характеристик циркуляций Ленгмюра при различных метеоусловиях.

Заметим, однако, что измерение параметров,

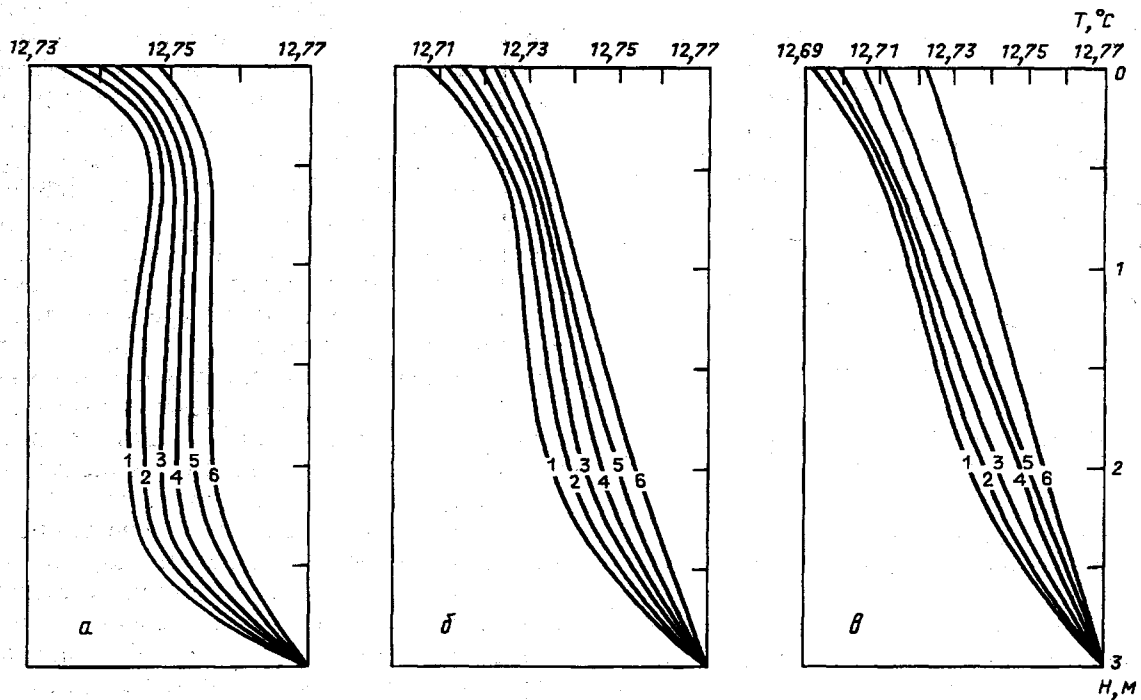


Рис. 2. Вертикальные профили средней температуры при скорости ветра  $V=4$  (а), 8 (б) и 10 м/с (в):  $\eta=1$  (1); 0,8 (2); 0,6 (3); 0,4 (4); 0,2 (5) и 0 (6)

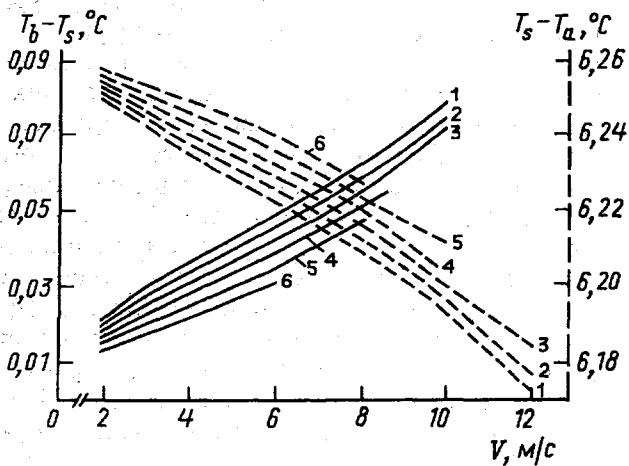


Рис. 3. Перепад температуры  $T_b - T_s$  между дном водоема (сплошная кривая) и  $T_s - T_a$  между поверхностью водоема и атмосферой (штриховая) в зависимости от скорости ветра  $V$  при  $\eta = 1$  (1); 0,8 (2); 0,6 (3); 0,4 (4); 0,2 (5) и 0 (6)

характеризующих интенсивность циркуляций, и сопоставление этих параметров с результатами модельных расчетов весьма сложны, поскольку поле температуры в вихре имеет значительную пространственную изменчивость, сопоставимую с ожидаемыми результатами измерений, а сами значения измеренных величин очень малы (порядка сотых долей градуса Цельсия). Это хорошо иллюстрирует рис. 4 (из работы [12]), где показаны профили температуры в разных областях циркуляции Ленгмюра: в зонах конвергенции, дивергенции и в средней части вихря. Видно, что значения в различных зонах существенно отличаются. Так, разница температур в зонах конвергенции и дивергенции на поверхности

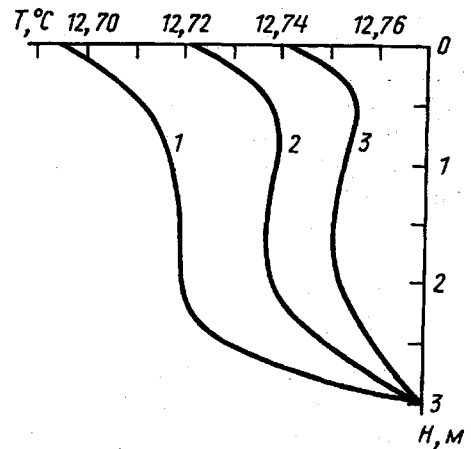


Рис. 4. Рассчитанные по модели профили температуры  $T$ : в зоне конвергенции (1); в центре вихря (2) и в зоне дивергенции (3). Скорость ветра  $V=6$  м/с;  $\eta=1$

воды составляет приблизительно  $0,04 ^\circ\text{C}$ , что одного порядка с разницей температуры между верхней и нижней границами моделируемой области.

Выполненные расчеты позволяют оценить потоки скрытого и явного тепла, а также количество влаги, поступившей из океана в атмосферу, в зависимости от загрязнения поверхности воды. Как следует из графиков рис. 5, зависимость эта сильная для потока скрытого тепла. В исследуемом диапазоне скоростей ветра уменьшение  $\eta$  в два раза уменьшает поток скрытого тепла из водоема в атмосферу  $Q_q$ , а следовательно, и потоков влаги в атмосферу за счет испарения воды также в два раза. При значительных скоростях ветра (8–12 м/с) наличие загрязнений может существенно изменить энергетический

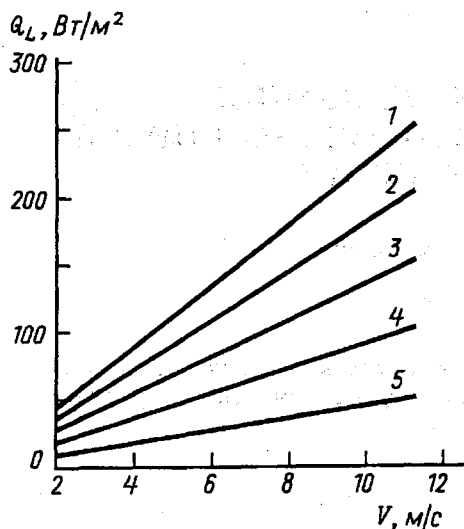


Рис. 5. Зависимость скрытого потока тепла  $Q_L$  от скорости ветра  $V$  при  $\eta = 1$  (1); 0,8 (2); 0,6 (3); 0,4 (4) и 0,2 (5)

баланс взаимодействия атмосферы и водоема. Отметим при этом, что небольшое изменение перепада температуры между поверхностью воды и воздухом при всех исследуемых режимах незначительно влияет на потоки скрытого и явного тепла.

Таким образом, из рассмотренных материалов следует, что циркуляции Ленгмюра, формирующие температуру верхнего слоя водоема, достаточно сильно реагируют на параметры, описывающие процессы в зоне контакта вода-воздух, и прежде всего на коэффициент Дальтона. Последний в свою очередь в значительной степени определяется наличием на поверхности воды загрязняющих веществ, в том числе нефтяных пленок.

Предложенная математическая модель позволяет, с одной стороны, моделировать различные термогидродинамические ситуации в водоемах, связанные с загрязнениями поверхности воды, а с другой стороны, оценивать на основе данных натурных измерений параметры (в частности,  $C_q$ ), учитывающие наличие загрязнений, а также их влияние на круп-

номасштабные процессы взаимодействия океана и атмосферы. Таким образом, циркуляции Ленгмюра можно считать важным индикатором состояния водоемов и, в частности, использовать измеренные характеристики циркуляций для количественной оценки параметров загрязнений и мониторинга водной среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 96-01-01118, 96-05-65856, 96-05-64547).

#### Литература

1. Взаимодействие океана с окружающей средой // Под ред. А.И. Дуванина. М., 1983.
2. Бельский В.С., Ткалин А.В. // Труды ВНИИЦ. Л., 1980. Вып. 92. С. 1.
3. Богородский В.В., Кропоткин М.А. // Водные ресурсы. 1984. №1. С. 161.
4. Проблемы загрязнений вод Мирового океана. Влияние загрязнений поверхностного слоя на тепло-, газо- и влагообмен океана с атмосферой / Под ред. Э.К. Бюгнер, А.С. Дубова. Л., 1985. Т.3.
5. Рянжин С.В., Филатов Н.Н., Михайлов Ю.Д. и др. // Термические процессы в глубоких озерах. Л., 1981. С. 45.
6. Ковалев В.А., Орданович А.Е. Деп. ВИНТИ №27-81 Деп. М., 1981.
7. Глуховская Т.Б., Орданович А.Е. // Метеорология и гидрология. 1987. №2. С. 62.
8. Блохина Н.С., Орданович А.Е. // Там же. 1992. №3. С. 31.
9. Блохина Н.С., Орданович А.Е. // Там же. 1992. №10. С.56.
10. Блохина Н.С., Орданович А.Е. // Там же. 1993. №1. С. 15.
11. Блохина Н.С., Орданович А.Е. // Изв. АН, ФАО. 1994. 30, №5. С. 686.
12. Блохина Н.С., Кочуров А.Г., Орданович А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. География. 1995. №5. С. 39.
13. Когерентные структуры и самоорганизация океанических движений / Под ред. Г.И. Баренблата, Д.Г. Сеидова, Г.Г. Сутырина. М., 1992.
14. Глуховская Т.Б., Орданович А.Е. // Изв. РАН, Механика жидкости и газа. 1993. №6. С. 49.

Поступила в редакцию  
22.11.96