

## Литература

1. Levin B.W., Kaistrenko V., Kharlamov A. et al. // Proc. IUGG/IOC Int. Tsunami Symp. Wakayama, Japan, 1993. P. 309.
2. Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на восточном побережье Тихого океана. М., 1974.
3. Носов М.А. // Вулканология и сейсмология. 1997. № 2. С. 95.
4. Носов М.А., Иванов П.С. // Вулканология и сейсмология. 1997. № 1. С. 102.
5. Островский Л.А., Папилова И.А. // Акуст. журн. 1974. 20, № 1. С. 79.
6. Доценко С.Ф. // Исследования цунами. 1988. № 3. С. 7.
7. Hammack J.L. // J. Phys. Oceanogr. 1980. 10, No. 9. P. 1455.
8. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. // Limnology and Oceanography. 1997. 42, No. 1. P. 1.
9. Носов М.А. // Тез. докл. Всеросс. научн. конф. «Взаимодействие в системе литосфера–гидросфера–атмосфера». М., 1996. С. 70.
10. Левин Б.В., Носов М.А., Павлов В.П., Рыкунов Л.Н. // ДАН. 1998. 358, № 3. С. 1.
11. Filonov A.E. // EOS. 1997. 78, No. 3 P. 21.

УДК 551.465.553;529.2+541.144.8

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПРОЦЕССЫ КОНВЕКТИВНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОДОЕМА

Н. С. Блохина, А. Е. Орданович

Исследуется влияние поверхностных загрязнений на процессы конвективного перемешивания в верхнем слое водоема при различных гидрометеороусловиях. Поставленная задача исследуется на разработанной авторами математической модели циркуляций Ленгмюра (ЦЛ). Показано, что наличие загрязнений уменьшает интенсивность движения ЦЛ, вплоть до их подавления, особенно при больших скоростях ветра. При этом как скорости поверхностных течений, так и их перепад между зонами конвергенции и дивергенции в ЦЛ увеличиваются.

Процессы конвективного перемешивания в верхнем квазиоднородном слое водоема играют важную роль при формировании его термических и гидродинамических характеристик. Как показывают наблюдения и теоретические исследования, основной причиной возникновения конвекции является энерго-массообмен между атмосферой и водоемом (поток явного и скрытого тепла, поток влаги). Существенную часть этого обмена составляют потоки тепла за счет испарения, которые при подходящих гидрометеороусловиях дают основной вклад, охлаждая поверхность воды [1]. При этом наличие ветра над водоемом приводит к перестройке трехмерных конвективных ячеек в веретенообразные валы, вытянутые вдоль направления ветра — циркуляции Ленгмюра, которые охватывают весь квазиоднородный слой. Однако испарение с поверхности воды сильно зависит от ее загрязнения.

По оценкам [2–5] оно может уменьшиться до 60%, что в свою очередь влияет на температуру поверхности воды и устойчивость водных масс. Поэтому представляет интерес выяснить, как сильно и при каких гидрометеороусловиях поверхностные загрязнения (прежде всего нефтяные пленки) влияют на конвективные процессы в водоеме.

В настоящей работе поставленная задача исследуется на разработанной авторами математической модели циркуляций Ленгмюра [1, 6–11]. В этой модели считается, что циркуляции Ленгмюра представляют собой валиковые вихревые структуры, вытянутые вдоль направления ветра и занимающие весь квазиоднородный слой водоема. Возбуждение вихрей происходит за счет конвективной неустойчивости слоя воды.

В рассматриваемой математической модели процессы в водоеме описываются полной нелинейной системой уравнений термогидродинамики в приближении Буссинеска. Считается, 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, которое задается с помощью трех полуэмпирических соотношений:

для напряжения трения ветра

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

для потока явного тепла

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

для потока влаги в атмосферу при испарении

$$M_q = C_q (q - q_a) V, \quad (3)$$

для потока скрытого тепла, возникающего одновременно с потоком влаги,

$$Q_q = L M_q. \quad (4)$$

Здесь  $V$  — скорость ветра на некотором расстоянии от поверхности воды;  $\rho_a$  — плотность воздуха;  $c_p$  — теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $T$  и  $T_a$  — температура воды и воздуха соответственно;  $q_a$  — удельная влажность воздуха на некоторой высоте от поверхности воды;  $q$  — удельная влажность насыщенного водяного пара непосредственно вблизи поверхности воды, определяемая температурой ее поверхности:  $q = q(T)$ ;  $L$  — удельная теплота парообразования;  $C_U$ ,  $C_T$  и  $C_q$  — коэффициенты трения ветра, числа Стентона и Дальтона для переноса тепла и водяного пара соответственно.

Как следует из соотношений (1)–(4), взаимодействие с атмосферой определяется коэффициентами обмена  $C_U$ ,  $C_T$  и  $C_q$ . При этом, как показывают наблюдения и теоретические оценки, в наибольшей степени от загрязнения зависит число Дальтона  $C_q$ . Не вникая в детали зависимости коэффициента  $C_q$  от величины загрязнения, в данной работе полагается, что фактическое значение коэффициента Дальтона  $C_q = \eta C_{q\max}$ , где  $C_{q\max}$  — коэффициент Дальтона для чистой воды. Таким образом, характеристикой загрязнения в данной работе считается число  $\eta$ , в зависимости от которого и будут рассматриваться результаты моделирования. Это число изменяется от  $\eta = 1$  при чистой воде до  $\eta = 0$  при полном загрязнении поверхности.

Модель конвективного перемешивания водоема с учетом возникающих в нем циркуляций Ленгмюра подробно описывалась в ряде работ авторов [1, 7–11] и здесь не приводится. Отметим только основные моменты: теория основана на представлении о том, что все процессы в жидкости происходят в условиях полной турбулизации среды; интенсивность турбулентности (и, следовательно, микроперемешивание, которое определяет коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности в среде) вычисляется в процессе решения задачи из уравнения баланса турбулентной энергии.

Как следует из указанных работ, усиление ветра увеличивает как коэффициент турбулентного обмена, так и потоки скрытого и явного тепла. При больших скоростях ветра ( $V > 10$ – $16$  м/с) условия возбуждения конвекции нарушаются за счет роста коэффициента турбулентной вязкости. При меньших скоростях ветра (4–8 м/с) для чистой воды потоки явного и скрытого тепла достаточно велики, чтобы поддерживать конвекцию. Однако наличие загрязнений может существенно уменьшить потоки скрытого тепла, что приводит к подавлению конвекции и даже, в некоторых случаях, к «срыву» конвективных циркуляций. При этом существенно изменяются скорости, распределение температуры в воде, а также перемешивание,

что снижает насыщение воды кислородом и вызывает другие нежелательные последствия.

Приведенные рассуждения иллюстрируются результатами расчета по предложенной математической модели.

На рис. 1 изображена одна из наиболее важных характеристик процесса перемешивания в водоеме — максимальная вертикальная скорость в конвективных циркуляциях  $W_{\max}$  в зависимости от загрязнения (параметр  $\eta$ ) при различных значениях скорости ветра  $V$  над водоемом. Цифрами на кривых обозначены значения скорости ветра (в м/с).

$W_{\max}$ , см/с

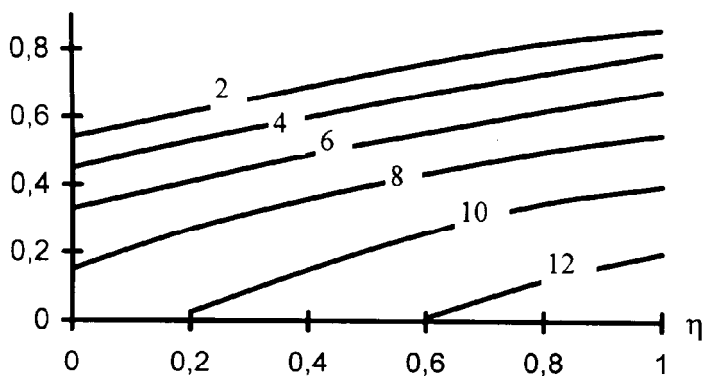


Рис. 1

Увеличение скорости ветра на поверхности водоема без наличия загрязнений ( $\eta = 1$ ) приводит к тому, что интенсивность движения циркуляций Ленгмюра уменьшается. Так, при скорости ветра  $V = 2$  м/с вертикальная скорость  $W_{\max}$  в конвективных структурах приблизительно в 4 раза больше, чем при  $V = 12$  м/с. Наличие загрязнений сильно влияет на интенсивность циркуляций Ленгмюра, особенно при больших скоростях ветра. При скорости ветра  $V = 12$  м/с и  $\eta = 0,6$  (что соответствует уменьшению испарения на 40%), циркуляции Ленгмюра прекращают свое существование. При  $V = 10$  м/с вихри исчезают только при  $\eta < 0,2$  (т.е. при уменьшении испарения более чем на 80%). При меньших скоростях ветра даже при полном отсутствии испарения ( $\eta = 0$ ) циркуляции Ленгмюра существуют за счет явного потока тепла из водоема в атмосферу.

Представляет интерес анализ течения, возбуждаемого циркуляциями Ленгмюра на поверхности водоема. Это течение, направленное вдоль скорости ветра, имеет различное значение в различных зонах циркуляций. Так, в зонах конвергенции (рис. 2) эта скорость может быть существенно больше, чем в зонах дивергенции. Наличие загрязнений существенно влияет как на среднюю скорость воды на поверхности водоема, так и на перепад скоростей между зонами конвергенции и дивергенции ( $\Delta U = U_{\text{con}} - U_{\text{div}}$ ).

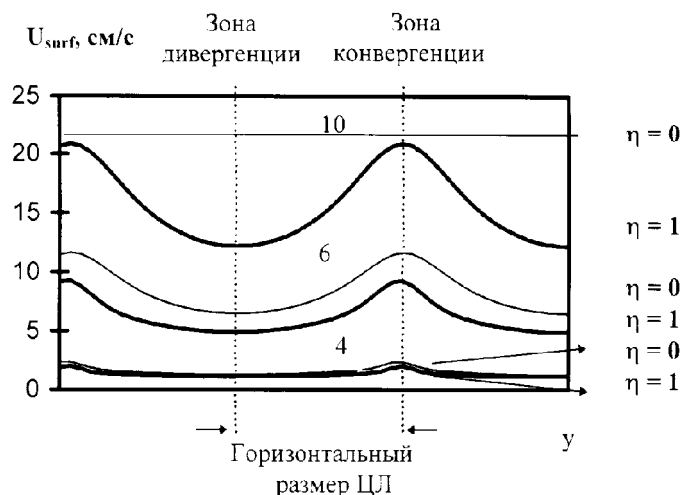


Рис. 2

На рис. 3 изображен график зависимости средней скорости поверхностного течения  $U$  в зависимости от скорости ветра  $V$  при разной степени загрязнения поверхности воды (параметра  $\eta$ ).

При небольших скоростях ветра ( $V \leq 4$  м/с) поверхностная скорость незначительно зависит от параметра  $\eta$ . При больших скоростях ветра и полностью загрязненной воде ( $\eta = 0$ ) скорость поверхностного течения становится заметно больше по сравнению со случаем  $\eta = 1$  (отсутствие загрязнений). При  $V = 10$  м/с различие составляет около 6 см/с (более 30%).

Рисунок 2 дает представление о величинах перепада  $\Delta U$ . На нем представлено распределение поверхностной скорости  $U_{\text{surf}}$  в разных зонах циркуляций Ленгмюра в зависимости от параметра  $\eta$  при различных значениях скорости ветра. Цифрами при кривых обозначены значения скорости ветра (в м/с). Верхняя граница области соответствует  $\eta = 0$  ( $C_q = 0$ ), а нижняя —  $\eta = 1$  ( $C_q = C_{q\text{max}}$ ).

При скоростях ветра  $V = 4$  м/с скорости течения воды в циркуляциях Ленгмюра на поверхности мало зависят от параметра  $\eta$ . Увеличение скорости ветра приводит к возрастанию как средней скорости дрейфа, так и перепада скоростей  $\Delta U$  в различных зонах течения. Так, при  $V = 6$  м/с перепад скоростей  $\Delta U$  составляет около 4 см/с, но не сильно зависит от  $\eta$ . Картина резко меняется при  $V = 10$  м/с. При  $\eta = 1$  циркуляции Ленгмюра существуют и перепад скорости  $\Delta U$  достигает 9 см/с, а при  $\eta = 0$  циркуляции «срываются» и поверхностное течение становится одинаковым по всей поверхности водоема.

Таким образом, проведенные вычислительные эксперименты говорят о сильной зависимости

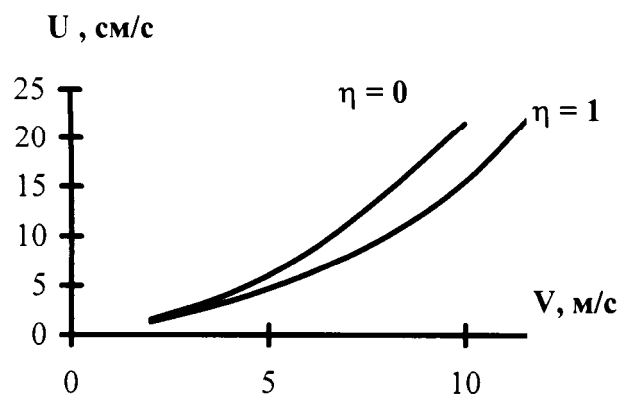


Рис. 3

интенсивности циркуляций Ленгмюра от загрязнения поверхности водоема. Связано это прежде всего с уменьшением при загрязнении испарения с поверхности воды и, следовательно, с уменьшением притока энергии, которая идет на возбуждение циркуляционных структур. В ряде случаев это может привести к полному подавлению конвекции и прекращению перемешивания в верхнем слое водоема.

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

#### Литература

1. Блохина Н.С., Орданович А.Е. // Изв. АН, ФАО. 1994. **30**, № 5. С. 686.
2. Взаимодействие океана с окружающей средой // Ред. А.И. Дуванин. М., 1983.
3. Бельский В.С., Ткалин А.В. // Некоторые аспекты изучения загрязнения вод Мирового океана: Тр. Дальневост. научн.-исслед. ин-та. Л., 1980. Вып. 92. С. 3.
4. Богородский В.В., Кропоткин М.А. // Водные ресурсы. 1984. № 1. С. 161.
5. Проблемы загрязнений вод Мирового океана. Влияние загрязнений поверхностного слоя на тепло-, газо- и влагообмен океана с атмосферой. // Ред. Э.К. Бютнер, А.С. Дубов. Л., 1985. Т. 3.
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. 55.
10. Блохина Н.С., Орданович А.Е. // Там же. 1993. №1. С. 15.
11. Блохина Н.С., Орданович А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. №3. С. 52 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 3).