

УДК 556.556:621.311.25 (477.43)

В. М. Тимченко, О. В. Тимченко, О. А. Гуляева

Институт гидробиологии НАН Украины, г. Киев

ЭКОЛОГО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
ВОДОЁМА-ОХЛАДИТЕЛЯ ХМЕЛЬНИЦКОЙ АЭС

Рассматриваются экологически значимые элементы гидродинамики водоёма-охладителя Хмельницкой АЭС, а именно течения, волнение и вертикальное турбулентное перемешивание. Рекомендуется повысить эффективность охлаждения водных масс в водоёме путем создания направляющих дамб.

Ключевые слова: динамика водных масс, водообмен, течения, водоём-охладитель АЭС.

Известно, что динамика водных масс является одним из ведущих факторов функционирования экосистем водных объектов. Из всей совокупности динамических явлений в водоёмах основная роль в формировании состояния их экосистем и качества воды принадлежит переносу и перемешиванию. Перенос обеспечивает водообмен между отдельными участками водоёмов, распределение по акватории тепла, растворенных и взвешенных веществ, живых организмов, а перемешивание — массо- и теплообмен между отдельными слоями и объемами воды [1].

Перенос водных масс обусловлен в основном течениями (градиентными, стоковыми, ветровыми и др.). Оценка режима течений в водоёмах обычно осуществляется натурными измерениями. Для получения общей картины течений в водоёме часто используются зависимости или математические модели, основанные на эмпирических соотношениях или теоретических гидродинамических законах [1].

Большинство математических моделей исходит из положений теории Экмана [2] и теории полных потоков Штокмана [3] и Свердруп [4]. Наибольшее практическое применение для расчёта течений во внутренних водоёмах получили так называемые двухмерные в горизонтальной плоскости модели. Типичным представителем таких моделей является гидродинамическая стационарная модель ветровых течений, которая позволяет рассчитывать циркуляции вод при переменном значении коэффициента вертикального турбулентного обмена [5]. В разных модификациях она нашла применение при исследованиях на Черном, Каспийском и Белом морях, Невской губе, на Ладожском, Онежском и других озерах, на водохранилищах и лиманах. Наш многолетний опыт оценки влияния течений на функционирование экосистем водоёмов Украины показывает, что большинство экологических задач на континентальных водоёмах вполне достоверно решается при использовании модели ветровых течений в том виде, в котором она представлена для случая малых глубин [5—7]. Более того, наши исследования дают основание

считать ее приемлемой к малым внутренним водоёмам — пойменным озёрам, лиманам, заливам, прудам и т. д. Некоторые ограничения, обусловленные стационарностью этой модели, при эколого-гидрологических оценках и прогнозах негативной роли практически не играют.

Основные положения метода «полных потоков», с помощью которого реализуется модель, состоят в следующем.

Функция полных потоков ψ , т. е. функция тока интегрального по вертикали переноса воды, определяется из уравнения

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{H^3} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{H^3} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = \frac{1}{2A_z} \cdot \text{rot}_z \frac{\mathbf{T}}{H}, \quad (1)$$

где A_z — коэффициент вертикального турбулентного обмена, $\text{см}^2/\text{с}$; H — глубина водоёма, м; \mathbf{T} — тангенциальное напряжение ветра, $\text{Н}/\text{м}^2$.

Составляющие тангенциального напряжения ветра по осям координат T_x и T_y определяются через скорость ветра по формулам

$$T_x = \gamma_b \cdot w \cdot w_x; \quad T_y = \gamma_b \cdot w \cdot w_y,$$

где γ_b — параметр трения ветра, принятый для морей равным $3,25 \cdot 10^{-6} \text{ г}/\text{см}^3$; w , w_x и w_y — модуль и составляющие скорости ветра по осям x и y , м/с.

Функция полных потоков связывается с динамическими уклонами поверхности водоёма соотношениями

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = -\frac{3T_x}{2g\rho H} - \frac{3A_z}{g\rho H^3} \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial y} = -\frac{3T_y}{2g\rho H} - \frac{3A_z}{g\rho H^3} \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (3)$$

где $\partial \zeta / \partial x$ и $\partial \zeta / \partial y$ — уклоны водной поверхности по осям x и y ; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; ρ — плотность воды, $\text{г}/\text{см}^3$.

Горизонтальные составляющие скорости течения по осям x и y (соответственно u и v) определяются величинами динамических уклонов:

$$u = \frac{T_x}{A_z} \cdot (H - z) + \frac{\rho g \cdot (H^2 - z^2)}{2A_z} \frac{\partial \zeta}{\partial x}; \quad (4)$$

$$v = \frac{T_y}{A_z} \cdot (H - z) + \frac{\rho g \cdot (H^2 - z^2)}{2A_z} \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad (5)$$

где z — глубина расчетного горизонта.

Расчет поля полных потоков сводится к решению уравнения (1) в конечно-разностной форме методом релаксаций. При этом значения функции полных потоков в предельных точках (на контуре водоёма) принимаются равными нулю. На жидких границах, т. е. на участках, через которые осуществляется внешний водообмен (реки, каналы, проливы), значения функции отвечают значениям притока или оттока. По уравнениям (4) и (5) находят значения уклонов водной поверхности и скоростей течения на отдельных горизонтах.

При использовании уравнений (2)—(5) необходимо уточнять ряд параметров и условий. В частности, при определении коэффициента вертикального турбулентного обмена, для чего обычно используется формула

$$A_z = \frac{\gamma_b}{4\rho a_0} \cdot w \cdot H,$$

где ветровой коэффициент a_0 (соотношение между скоростью ветра и скоростью вызванного им дрейфового течения) мы предлагаем, как и для морей, принимать равным 0,0125 [1].

При установлении шага сетки (детальности) расчетов следует учитывать реальные особенности конфигурации береговой линии и морфометрии водоёма.

Необходимым условием использования метода математического моделирования течений является его верификация применительно к конкретному водоёму. Следует отметить, что во многих разработках по расчёту течений методом «полных потоков» отмечается удовлетворительное совпадение рассчитанных и наблюдаемых параметров течений.

Применение метода «полных потоков» на водоёме-охладителе Хмельницкой АЭС, результаты расчетов по которому приведены ниже, фактически является одной из первых попыток его реализации в антропогенно стратифицированном континентальном водоёме. В качестве исходной информации использованы справочные гидрометеорологические материалы и техническая документация службы эксплуатации АЭС. В итоге получены схемы течений (циркуляций вод) при разных погодных

и эксплуатационных условиях. Заметим, что изолинии функций токов на схемах указывают на интегральное (суммарное по глубине) направление перемещения водных масс, а их густота пропорциональна интенсивности перемещения.

Рассмотрены ситуации, когда эксплуатируется один или два энергоблока АЭС в летний период. Учтены глубины и форма береговой линии, направление и скорость ветра, а также объемы воды, которые принимают участие в производственном цикле АЭС. Во время работы одного блока АЭС расход воды в районе водозабора принят равным $55 \text{ м}^3/\text{с}$, такой же объем воды одновременно возвращается в водоём. Средний расход воды во время эксплуатации двух энергоблоков принят равным $110 \text{ м}^3/\text{с}$.

Итак, в безветренную погоду водные массы, которые сбрасывает АЭС, согласно рассчитанным схемам циркуляций вод (рис. 1, а), перемещаются лишь по северо-восточной части водоёма-охладителя и попадают на водозабор станции. Повышение мощности работы АЭС влияет только на интенсивность этого транзитного потока, но не меняет общую схему течений, хотя потоки охватывают более обширную часть акватории (рис. 1, б).

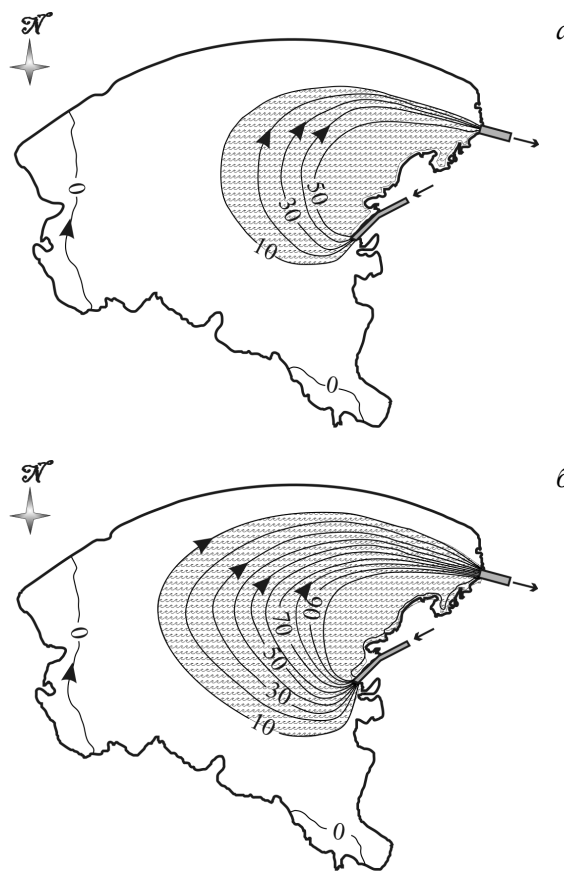


Рис. 1. Схема течений (функции токов, $\text{м}^3/\text{с}$) в водоёме-охладителе Хмельницкой АЭС при отсутствии ветра (штриховкой показана зона транзита нагретых вод):

а — работает один энергоблок;
б — работают два энергоблока

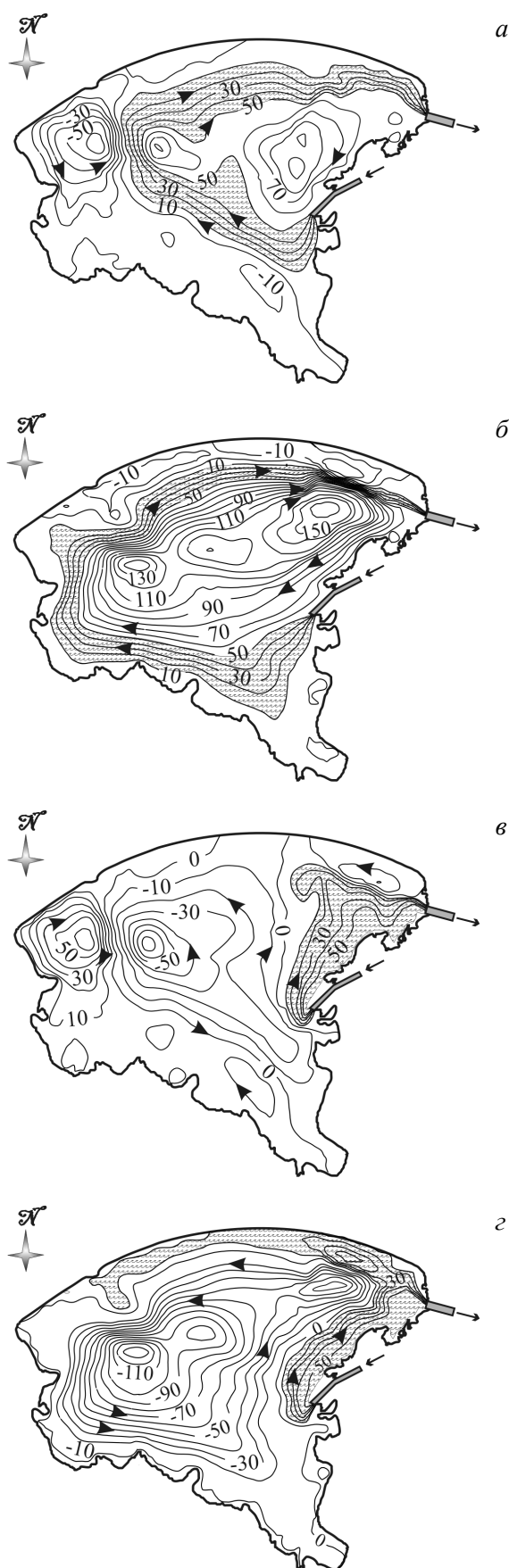


Рис. 2. Схема течений в водоёме-охладителе Хмельницкой АЭС при ветре средней интенсивности (3 м/с) северного (а), восточного (б), южного (в) и западного (z) направлений

При ветре северного направления транзитный поток значительно удлиняется (рис. 2, а). От места сброса он направляется в западную часть водоёма, а затем, изменяя направление на восточное, оmyвает северный берег и попадает к водозабору АЭС. Кроме того, в восточной части водоёма образуется поле с антициклональным перемещением водных масс мощностью до 30 м³/с, а у западного берега — циклональным, мощностью до 50 м³/с.

Восточный ветер имеет самое благоприятное влияние на процесс охлаждения нагретых на станции водных масс. Он вынуждает транзитный поток двигаться по длинной траектории (рис. 2, б). Кроме того, в центральной части водоёма образуется большая антициклональная циркуляция мощностью до 100 м³/с, которая формируется за счёт северного транзитного потока. Тем самым значительно увеличивается время теплоотдачи вод в атмосферу.

Южный ветер вынуждает транзитный нагретый поток двигаться по короткой траектории (рис. 2, в). В таких условиях теплые сбросные воды АЭС почти сразу возвращаются в подводящий канал, тогда как основная центральная и западная части водоёма заняты несколькими замкнутыми циркуляциями. И хотя эти циркуляции довольно мощные (до 60 м³/с), их роль в процессе охлаждения воды для агрегатов станции невелика.

Западный ветер, как и южный, направляет сбросные нагретые воды сразу к водозабору, тем самым уменьшая срок и объём теплоотдачи водных масс (рис. 2, z). На всей акватории в это время властвует автономная циклональная циркуляция мощностью до 130—140 м³/с. Ее водные массы практически не принимают участия в процессе охлаждения воды, которая используется для АЭС.

Анализ результатов моделирования течений в водоёме-охладителе в условиях эксплуатации двух энергоблоков показал, что при любом ветре, как и в штилевую погоду, циркуляции вод остаются идентичными описанным для одного энергоблока. Усиливается лишь мощность потоков. Заметим, что это усиление не пропорционально увеличению сбросных расходов, ибо перемещение вод в водоёме генерируется не только транзитным стоком, но и ветровой (дрейфовой) составляющей.

Безусловно, рассмотренные схемы циркуляций вод не могут претендовать на абсолютно точную характеристику режима течений в водоёме-охладителе Хмельницкой АЭС. Причин здесь несколько. Это, например, указанные выше особенности применения самой модели, в том числе ненадлежащий учёт ею влияния граничных условий (берег, дно и др.), отсутствие учёта горизонтальной и вертикальной температурной (плотностной) стратификации вод, характерной для водоёмов-охладителей энергетических объектов. Определённые проблемы связаны со статичностью модели —

в ней не учтена динамика гидрологических и ветровых условий. Остаётся не совсем решённым вопрос верификации расчётной модели как относительно водоёма-охладителя Хмельницкой АЭС, так и водоёмов подобного типа вообще.

Тем не менее, результаты моделирования течений дают возможность охарактеризовать динамику вод в исследуемом водоёме как один из ведущих факторов функционирования его экосистемы. Так, уже сейчас можно заметить, что большую часть вегетационного периода здесь сохраняются не совсем благоприятные условия для охлаждения водных масс. Наибольшую повторяемость имеют ветры западного (39 %) и северо-западного (27 %) направлений [8], при которых циркуляции вод не обеспечивают максимального использования водоёма в его прямом назначении.

Моделирование циркуляций вод позволяет рассмотреть и рекомендовать один из способов повышения эффективности охлаждения водных масс в водоёме-охладителе Хмельницкой АЭС. Речь идёт об искусственном увеличении пути перемещения нагретых вод по акватории водоёма и, соответственно, времени их охлаждения, путём создания непосредственно в акватории направляющих дамб. На рис. 3 показаны рассчитанные циркуляции вод при возможных вариантах таких дамб. Из них следует, что при любых ветровых условиях нагретая на агрегатах АЭС вода вынуждена перемещаться по более обширной акватории водоёма, что значительно увеличивает суммарную теплоотдачу из воды в атмосферу.

Называя водоём-охладитель Хмельницкой АЭС антропогенно стратифицированным, мы имели в виду искусственную природу формирования здесь значительных вертикальных температурных градиентов. Разница температуры воды в поверхностном и придонном слоях на некоторых участках может достигать 6—8 градусов [9]. Эта особенность термического режима существенно ограничивает процесс вертикального турбулентного перемешивания в них водных масс.

Напомним, что характерная для озёр и иных внутренних водоёмов мелкомасштабная турбулентность генерируется поверхностными волнами, которые образуются под действием ветра. При наличии температурной (плотностной) стратификации процесс диффузии (перемешивания) становится анизотропным уже на малых глубинах, т. е. в более глубокие слои турбулентные вихри проникают слабо. С экологических и гидробиологических позиций это исключительно важно, ибо именно турбулентные вихри обеспечивают основной вертикальный перенос питательных веществ и продуктов жизнедеятельности гидробионтов между слоями.

Элементом гидродинамики водоёмов, несомненно, являются волновые (колебательные) движения водных масс. В водоёме-охладителе Хмельницкой

АЭС ведущим по экологической значимости типом волнового процесса, на наш взгляд, выступают ветровые волны. Они обуславливают вертикальную и горизонтальную миграцию веществ, усиливают самоочистительный потенциал водоёма, оказывают непосредственное воздействие на жизнедеятельность практически всех видов гидробионтов. К сожалению, ветровое волнение не является предметом стационарных и эпизодических наблюдений на водоёме-охладителе Хмельницкой АЭС. Не исследовалось и влияние процесса ветрового волнения на отдельные группы гидробионтов и экосистему водоёма в целом.

Расчёты элементов ветровых волн с использованием общепринятых методов [10] показывают, что средняя за вегетационный период высота волн в этом водоёме может составлять от 11 до 15 см. Это значит, что орбитальные знакопеременные перемещения частиц воды, взвесей и растворов здесь распространяются в среднем на глубину не более 0,5 м. Механическое воздействие на донные биоценозы при таких условиях ощущается приблизительно на 3 % дна водоёма. Это довольно узкие вдольбереговые полосы преимущественно южной части водоёма-охладителя. При ветре 5—7 м/с высота волн увеличивается до 25—30 см, соответственно увеличивается площадь дна (до 4—5 %), где волны оказывают динамическую нагрузку на дно, бентосные и иные виды гидробионтов.

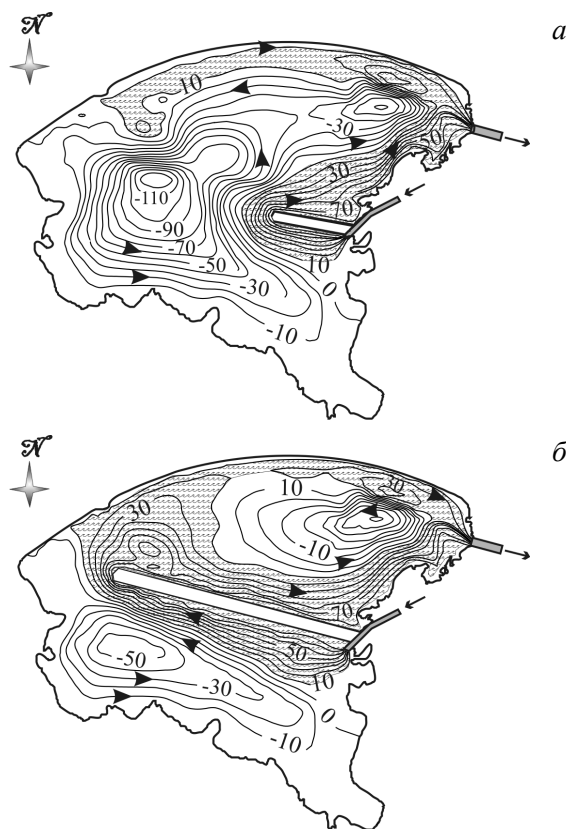


Рис. 3. Схема течений в водоёме-охладителе Хмельницкой АЭС при сооружении короткой (а) и длинной (б) направляющих дамб (западный ветер, 3 м/с)

Можно полагать, что в исследуемом водоёме могут проявляться и такие гидродинамические процессы, как сгонно-нагонные, сейшевые и иные колебания уровня воды с сопутствующими им перемещениями водных масс, вихри Ленгмюра, молярные перемещения водных частиц и т. д. Однако можно с уверенностью утверждать, что их роль в функционировании экосистемы водоёма не столь существенна.

В заключение отметим, что характер, особенности и степень влияния рассмотренных гидродинамических условий на отдельные абиотические и биотические компоненты экосистемы водоёма-охладителя Хмельницкой АЭС должны быть предметом специальных гидроэкологических и гидробиологических исследований. Некоторые аспекты этой проблемы уже нашли своё отражение в работах А. А. Протасова и его коллег [9].

Список использованной литературы

1. Тимченко В. М. Экологическая гидрология водоёмов Украины / В. М. Тимченко. — К. : Наук. думка, 2006. — 384 с. : рис., табл. — (Проект «Наукова книга»).
2. Allender Y. Model and Observed Circulation Throughout the Annual Temperature Cycle of Lake Michigan / Y. Allender, Y. Saylor // Phys. Ocean. — 1979. — V. 9, № 1. — P. 573—579.
3. Штокман В. Б. Избранные труды по физике моря / В. Б. Штокман. — Л. : Гидрометеиздат, 1970. — 336 с.
4. Праудмен Дж. Динамическая океанография / Дж. Праудмен. — М. : Изд-во иностр. л-ры, 1957. — 417 с.
5. Фельзенбаум А. И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений / А. И. Фельзенбаум. — М. : Изд-во Академии наук СССР, 1960. — 126 с.
6. Вольцингер Н. Е. Основные океанологические задачи теории мелкой воды / Н. Е. Вольцингер, Р. В. Пяковский. — Л. : Гидрометеиздат, 1968. — 299 с.
7. Shino-Kung Lin. Multidimensional numerical modeling of estuaries and coastal seas / Lin Shino-Kung, I. I. Leedertse // Adv. Hydrosci. — 1978. — Vol. 11. — P. 76—88.
8. Ліпінський В. М. Клімат України / В. М. Ліпінський, В. А. Дячук, В. М. Бабіченко; за ред. В. М. Ліпінського. — К. : Вид-во Раєвського, 2003. — 343 с.
9. Техно-екосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки / А. А. Протасов, В. П. Семенченко, А. А. Силаева и др.; под ред. А. А. Протасова. — Киев : Ин-т гидробиологии НАН Украины, 2011. — 234 с.
10. Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях. — М. : Гидрометеиздат, 1973. — 536 с.

Получено 19.03.2014