

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОВЫХ СОСТОЯНИЙ  
ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Аннотация.** Система имитационного моделирования водных объектов, разработанная в Институте кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, включает подсистемы моделирования изменений кислородного режима и переноса загрязнений в водотоках, процессов в подземных водоносных горизонтах, токовых состояний в водоемах и интеллектуализированного способа обработки, сжатия и восстановления с гарантированной точностью массивов числовых данных с использованием аппарата наилучшей чебышевской аппроксимации, применяемой во всех подсистемах. Модели для конкретных водных объектов Украины созданы впервые. Система «открыта» для включения новых моделей и объектов. Описана подсистема моделирования токовых состояний в водоемах.

**Ключевые слова:** моделирование, подсистема, водный объект, токовые состояния в водоемах.

**ВВЕДЕНИЕ**

Исследования по созданию имитационных систем моделирования гидродинамических состояний водных объектов в условиях техногенных нагрузок, проводимые в Институте кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, направлены на разработку и реализацию проблемно-ориентированных подсистем моделирования. Цель таких работ — получение комплексных оценок экологических состояний конкретных водоемов и водотоков на основе системного подхода к созданию методов математического и имитационного моделирования, а также программного обеспечения их компьютерной реализации с использованием аппаратно-программных комплексов автоматизации [1–3].

В результате проведенных работ была создана Система имитационного моделирования водных объектов (СИМВО), в состав которой входят проблемно-ориентированные подсистемы моделирования изменений кислородного режима (WODA), переноса загрязнений (STREAM) в водотоках, процессов в подземных водоносных горизонтах (FEFLOW), стационарных стоково-ветровых течений в водоемах «мелкой» воды на отдельных глубинных горизонтах (ПОТОК) и подсистема аппроксимации (APPROXIMATION) интеллектуализированного способа обработки, сжатия и восстановления с гарантированной точностью массивов числовых данных с использованием аппарата наилучшей чебышевской аппроксимации. Подсистема APPROXIMATION, инвариантная составляющая во всех подсистемах, применяется для предварительной обработки числовых массивов исходных данных в целях их замены с высокой точностью различными аналитическими выражениями. Она используется также в случаях, когда для компьютерной реализации процесса моделирования не хватает количества значений натуральных исходных данных в узлах недостаточно густой начальной сетки и возникает необходимость измельчения сетки для увеличения количества узлов. В таких ситуациях эта подсистема обеспечивает получение с гарантированной точностью дополнительных расчетных значений исходных данных в новых узлах более густой сетки, что значительно повышает точность результатов моделирования [4–10].

Для получения комплексных оценок состояний водных объектов в рамках работы СИМВО используются результаты моделирования всех входящих в нее

подсистем. Модели гидродинамических состояний водных объектов должны быть ориентированы только на конкретные гидрообъекты, каждый из которых уникален независимо от своей географической принадлежности. Поэтому все известные аналогичные модели, разработанные для некоторых других гидрообъектов, не могут использоваться в Украине.

На основе исследования состояний водоемов и водотоков Украины в Институте кибернетики созданы и впервые реализованы все входящие в СИМВО подсистемы, что с учетом международного значения этих водных объектов обуславливает актуальность таких разработок.

Структурно СИМВО является модульной, она «открыта» для включения новых моделей и объектов. Наряду с СИМВО в Институте кибернетики выполнялись работы по определению и уточнению структур и оценок параметров численных реализаций отдельных моделей внутриводоемных процессов при наличии соответствующей исходной информации по методу группового учета аргументов (МГУА) под руководством академика А.Г. Ивахненко [11]. Несмотря на то что эти разработки не входят в состав СИМВО, они носят самостоятельный научный характер и использовались в рамках совместного выполнения научно-исследовательских работ по ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы. По их результатам был подготовлен и утвержден совместный отчет.

Описания проблемно-ориентированных подсистем WODA, STREAM и FEFLOW в составе СИМВО приведены в [12–14]. В данной статье рассматривается подсистема РОТОК.

Важное значение подсистемы РОТОК в СИМВО заключается не только в широких возможностях ее применения, но и в необходимости использования в других подсистемах, таких как WODA и STREAM.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

К наиболее распространенным видам течений в водоемах относятся ветровые, генерируемые касательным воздействием воздушного потока на водную поверхность. Эти течения захватывают не только поверхностные, но и глубинные слои. Мощность слоя, перемещаемого ветром, и скорость его перемещения определяются характеристиками ветра и морфологией водоема. В результате формируются так называемые циркуляции, имеющие существенное значение в водообмене внутри водоема, смешивании воды, распространении тепла, загрязнений и т.д.

Отметим еще одну группу процессов, относящихся к гидродинамике водоемов: колебания уровня воды; поверхностные и внутренние волны. Такие процессы влияют на режим основных гидродинамических характеристик, а именно на скорость, направление переноса и интенсивность смешивания, имеющих наибольшее значение в формировании состояний закрытых гидрозкосистем.

Для решения большинства проблем, связанных с анализом и прогнозом экологических состояний гидрообъектов, необходимо целостное представление о внутренней динамике водоемов, в том числе общая схема циркуляции воды. Кроме того, часто требуются данные о режиме течений в условиях, когда невозможно провести натурные измерения и спрогнозировать характеристики течений. Решить такие проблемы можно математическим моделированием и вычислительными методами, позволяющими определять как отдельные элементы внутренней динамики, так и общие закономерности течений и циркуляции воды во внутренних водоемах.

Наибольшее практическое использование при расчетах ветровых течений во внутренних водоемах имеют двумерные в горизонтальной плоскости модели.

К этому классу относится, например, гидродинамическая модель расчета ветровой циркуляции при переменном значении коэффициента вертикального турбулентного обмена, разработанная в общей постановке в [15].

Поскольку водоемы, водохранилища и лиманы Украины относятся к водоемам «мелкой воды», для определения их гидродинамических характеристик (функций полных потоков, компонентов скорости течения на различных горизонтах глубины, колебаний уровня) используются математические модели «мелкой воды», разработанные с учетом особенностей конкретных водоемов Украины.

Применение таких моделей оправдано для определения средних по глубине скоростей в мелководных водоемах произвольной формы с переменной глубиной. В этих случаях приемлема линеаризация придонного трения, что существенно упрощает вычислительные расчеты.

#### **ОПИСАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ**

Подсистема РОТОК в составе СИМВО предназначена для расчета течений и функций полных потоков на разных глубинах в водоемах с криволинейной границей и позволяет получать схемы течений и интегральной циркуляции вод для широкого класса водоемов на каждом заданном горизонте.

Для реализации математических моделей «мелкой воды» в данной подсистеме для расчета стационарных течений в водоемах используется модификация метода полных потоков применительно к водоемам малых глубин.

При математическом моделировании течений в водоемах Северо-Западного Причерноморья используется возможность метода полных потоков раскрывать пространственную структуру течений с учетом влияния дна и берегов, проточности водоемов и неоднородности ветрового влияния на поверхность воды в различных его частях. При решении задач эколого-гидрологической оценки, и особенно прогноза абиотических компонентов экосистем исследуемых водных объектов, ряд ограничений, обусловленных стационарностью модели «мелкой воды», не имеют отрицательного значения.

Определяемые по данному методу послойные токовые состояния функций полных потоков и интегральная циркуляция вод, полученные для разных направлений и скоростей ветра, позволяют прогнозировать скорость течения и водообмен на разных глубинах водоема в зависимости от скорости и направления установившегося ветра.

При расчетах течений методом полных потоков возможно допустимое совпадение рассчитанных и натуральных параметров течений. Однако в силу специфики использования моделей (дискретный ввод параметров, морфология водоемов, сложность учета неравномерности поля ветра над акваторией и другие особенности) их верификация является обязательным этапом использования в каждом отдельном случае. В то же время рассчитанные величины значений размера и токовых состояний основных циркуляционных зон с достаточной точностью подтверждаются материалами натуральных наблюдений.

Верификация точности расчетных данных о состояниях водных объектов Украины с использованием подсистемы РОТОК, выполненная Институтом гидробиологии НАНУ, показала сравнимость расчетных данных с натурными замерами, что подтверждает эффективность разработанных моделей.

Применение метода полных потоков открывает широкие возможности для определения гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик как для водоема в целом, так и для отдельных его частей.

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМОВ

При разработке моделей, входящих в РОТОК, использовалась двумерная плановая модель стационарных ветровых течений Фельзенбаума [15] применительно к динамическим характеристикам конкретных водоемов с учетом разных граничных донных условий (прилипания и придонного трения).

Для расчета основных характеристик гидродинамического режима, таких как компоненты скорости течения, колебания уровня, средняя скорость течения, скорости течения на отдельных горизонтах, водообмен между частями водоема и другие, используется упрощенное уравнение «мелкой воды» для функции полных потоков. Полученные расчетные значения функции полных потоков, поля скоростей, величин и направлений векторов течений в виде информационных массивов являются результатом решения первой краевой задачи для эллиптического уравнения. При этом определение установившегося течения в водоемах малой и средней глубины сводится к интегрированию дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка для функции полных потоков, в результате чего определяются динамические наклоны (колебания) поверхности водоема и горизонтальных составляющих скоростей течений на отдельных горизонтах.

Основными исходными данными для подсистемы РОТОК, определяющими установившуюся циркуляцию водных масс, являются: направление и скорость ветра, объем проточных вод (притоков и истоков), обмен количеством движения воды по вертикали, значения глубин водоема и толщина донных отложений (илов) в различных точках сетки. В случаях, когда исходных данных недостаточно для вычислительной реализации с хорошей точностью процесса моделирования, используется подсистема APPROXIMATION. В результате увеличивается количество узлов сетки и значения дополнительных исходных данных в новых узлах определяются с помощью разработанных алгоритмов наилучшей чебышевской аппроксимации, при этом их точность не ниже точности значений исходных данных.

Для получения токовых состояний водоемов расчеты выполнялись на основе сведения к итерационному решению конечноразностной краевой задачи для уравнений эллиптического типа на прямоугольных сетках. Результатами расчетов является информация об интегральной циркуляции воды (полных потоках), о повышении ее уровня и о скоростях течения на разных глубинах при различных параметрах поля ветра. Кроме этого, разработанные модели позволяют рассчитывать двухслойные стратифицированные течения, для которых существенно отличаются коэффициенты турбулентного обмена.

При моделировании послойных токовых состояний водоемов используется метод полных потоков, реализуемый в упрощенном варианте. В этом случае не учитывается ряд незначительных для рассматриваемых водоемов возмущений (инерционные воздействия, горизонтальный турбулентный обмен, сила Кориолиса, непостоянство плотности воды и т.д.), что допустимо для количественной и качественной оценки гидродинамической обстановки исследуемых водоемов. При этом функция полных потоков определяется как решение эллиптического уравнения

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{A}{H^3} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{H^3} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{rot} \frac{\tau}{H}, \quad (1)$$

где  $\psi(x, y)$  — функция полных потоков,  $A$  — коэффициент вертикального турбулентного обмена,  $H(x, y)$  — глубина водоема (как функция горизонтальных координат  $x, y$ ),  $\operatorname{rot} \tau$  — вихрь тангенциального напряжения ветра,

$$\operatorname{rot} \frac{\tau}{H} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_y}{H} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_x}{H}.$$

Компоненты вектора  $\tau$  равны  $\tau_x = \gamma W^2 \cos \alpha$ ,  $\tau_y = \gamma W^2 \sin \alpha$ , где  $W$  — модуль скорости ветра,  $\alpha$  — угол, отсчитываемый против часовой стрелки от оси  $x$  до направления ветра.

Коэффициент турбулентного обмена  $A$  определяется по формуле  $A = \frac{\gamma}{4K} WH$ , где  $\gamma, K$  — числовые коэффициенты, принятые на основании натуральных наблюдений для данных водоемов.

Уравнение (1) решается методом сеток: по определенному алгоритму строится прямоугольная неравномерная сетка. Водоем, являющийся односвязной областью с криволинейной границей, покрывается такой сеткой с шагом  $h$ , граничные условия переносятся с контура водоема на узлы сетки, ближайшие к истинной границе области. Глубины задаются в узлах сеточного прямоугольника, при этом в узлах, находящихся вне области, значение глубины следует задавать равным минимальному значению глубины внутри области. Внутренний узел сетки с координатами  $(x_i, y_j)$  обозначается как  $(i, j)$ , производные в точке  $(i, j)$  заменяются разностными выражениями с использованием промежуточных точек между узлами. При необходимости увеличения количества узлов сетки и получения дополнительных расчетных значений на отдельных глубинных горизонтах традиционно используется подход с применением подсистемы APPROXIMATION.

По известной функции полных потоков определяются уклоны  $\frac{\partial \xi}{\partial x}$  и  $\frac{\partial \xi}{\partial y}$  поверхности водоема соответственно по осям  $x, y$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial x} &= -\frac{3A}{\rho g H^3} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{3}{2} \frac{\tau_x}{\rho g H}, \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} &= -\frac{3A}{\rho g H^3} \frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{3}{2} \frac{\tau_y}{\rho g H}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность воды,  $g$  — ускорение силы тяжести.

Компоненты скорости течения на горизонте  $z$  определяются по формулам

$$\begin{aligned} u &= \frac{\tau_x}{A} (H - z) + \frac{\rho g}{2A} (H^2 - z^2) \frac{\partial \xi}{\partial x}, \\ v &= \frac{\tau_y}{A} (H - z) + \frac{\rho g}{2A} (H^2 - z^2) \frac{\partial \xi}{\partial y}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $z$  — расстояние от поверхности воды до рассматриваемого горизонта.

При задании расходов воды в устьях рек и проливах выполняется условие постоянства объема воды в водоеме, согласно которому алгебраическая сумма всех притоков и истоков должна равняться нулю.

Для сравнительно небольших размеров конкретных исследуемых водоемов с учетом таких особенностей, как односвязность их области с криволинейной границей, постоянство объема воды, однородность поля ветра, а также условия  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$  для пресноводных водоемов и значения ветрового коэффициента  $K = 0,0125$  решение исходного эллиптического уравнения (1) сводится к решению разностного уравнения с применением итерационного процесса Либмана.

Положим  $\psi_{i,j}^{(0)} = 0$ ,  $\psi_{i,j}^{(1)} = -2KhF_{i,j}$ . Критерием конца итерационного процесса является выполнение условия

$$\left| \frac{\psi_{i,j}^{(n+1)} - \psi_{i,j}^{(n)}}{\psi_{i,j}^{(n+1)}} \right| < 0,001,$$

где  $\psi_{i,j}^{(n+1)}$ ,  $\psi_{i,j}^{(n)}$  — последовательные приближения значений функций полных потоков в узловой точке  $(i, j)$ ,  $h$  — минимальное значение шага сетки,  $n$  — количество итераций. Полученные значения  $\psi_{i,j}$  в узлах сетки выдаются на печать в форме водоема, включая границу.

При разбиении границы  $\Gamma$  водоема на участки  $\Gamma_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , значение функции  $\psi$  на  $i$ -м участке определяется как  $\psi / \Gamma_i = \sum_{i=1}^{j-1} Q_i$ , где  $Q_i$  — расход воды на  $i$ -м участке.

В разностной форме уравнения (2) для уклонов поверхности водоема по осям  $x$ ,  $y$  определяются так:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)_{i,j} &= -\left(\frac{3w\gamma}{4KgH^2}\right)_{i,j} \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1}}{2h} - \left(\frac{3\gamma w^2 \cos \alpha}{2gH}\right)_{i,j}, \\ \left(\frac{\partial \xi}{\partial y}\right)_{i,j} &= -\left(\frac{3w\gamma}{4KgH^2}\right)_{i,j} \frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}}{2h} - \left(\frac{3\gamma w^2 \sin \alpha}{2gH}\right)_{i,j}, \end{aligned}$$

где  $\gamma = 3,25 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^2$ ,  $K = 0,0125$ ,  $w$  — вектор скорости течения.

Аналогично, уравнения (3) для значений компонентов скорости течения на горизонте глубины  $z$  в разностной форме определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} u_{i,j} &= \left(\frac{4Kw \cos \alpha}{H}\right)_{i,j} (H_{i,j} - z) + \left(\frac{2gK}{\gamma w H}\right)_{i,j} (H_{i,j}^2 - z^2) \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)_{i,j}, \\ v_{i,j} &= \left(\frac{4Kw \sin \alpha}{H}\right)_{i,j} (H_{i,j} - z) + \left(\frac{2gK}{\gamma w H}\right)_{i,j} (H_{i,j}^2 - z^2) \left(\frac{\partial \xi}{\partial y}\right)_{i,j}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для однородного поля ветра система (4) принимает более простой вид

$$\begin{aligned} u_{i,j} &= 4Kw \cos \alpha \left(\frac{1}{H}\right)_{i,j} (H_{i,j} - z) + \frac{2gK}{\gamma w} \left(\frac{1}{H}\right)_{i,j} (H_{i,j}^2 - z^2) \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)_{i,j}, \\ v_{i,j} &= 4Kw \sin \alpha \left(\frac{1}{H}\right)_{i,j} (H_{i,j} - z) + \frac{2gK}{\gamma w} \left(\frac{1}{H}\right)_{i,j} (H_{i,j}^2 - z^2) \left(\frac{\partial \xi}{\partial y}\right)_{i,j}. \end{aligned}$$

По составляющим  $u_{i,j}$ ,  $v_{i,j}$  определяются модуль вектора скорости течения и угол относительно оси:

$$w_{i,j} = \sqrt{u_{i,j}^2 + v_{i,j}^2}, \quad \alpha = \text{arctg} \frac{v_{i,j}}{u_{i,j}}.$$

Результатами вычислений являются числовые информационные массивы значений величин функции тока и значений поля скоростей в виде величин векторов и их направлений в каждой внутренней точке  $(i, j)$  водоема. Полученные числовые значения используются для определения интегральной циркуляции водных масс при заданных исходных значениях параметров.

Графическое представление массивов значений формируется соответственно в виде изолиний для функции тока и векторного поля скоростей в форме каждого конкретного водоема с учетом его конфигурации.

На рис. 1–4 приведены схемы циркуляций вод в некоторых водных объектах при разных гидрометеорологических условиях.

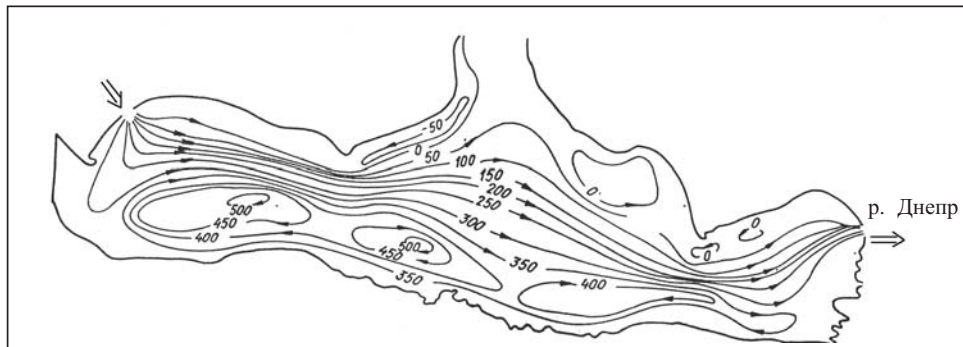


Рис. 1. Схема циркуляции вод в Днепровско-Бугском водохранилище при слабом северном ветре со скоростью 3–5 м/с

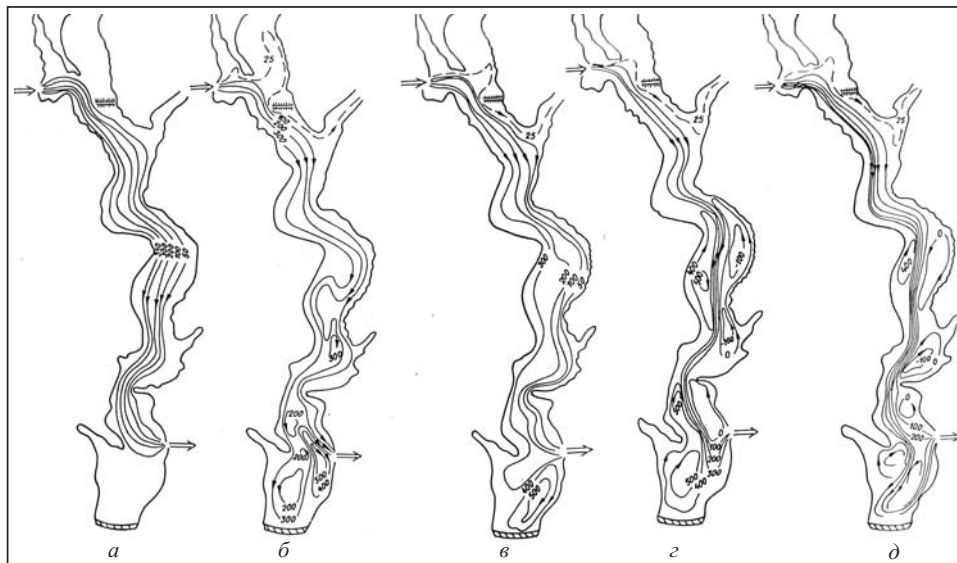


Рис. 2. Схемы циркуляции вод в Тилигульском водохранилище (транзитный расход воды  $360 \text{ м}^3/\text{с}$ ) при штиле (а), северном (б), восточном (в), южном (г) и западном (д) ветре со скоростью 5 м/с

Программный комплекс подсистемы РОТОК разработан в Институте кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины на языках ФОРТРАН, ПАСКАЛЬ и состоит из таких функционально независимых частей:

- базовое прикладное программное обеспечение для расчетов стационарных стоково-ветровых течений, функций полных потоков, послойных токовых состояний с использованием подсистемы APPROXIMATION для представления числовых массивов исходных данных аналитическими выражениями и оптимизации размеров сетки в целях повышения точности результатов [16, 17];

- системное программное обеспечение для подготовки, уточнения, ввода, накопления, формирования исходных данных и вывода результатов — информационных массивов и их визуализации в виде изолиний функции полных потоков и векторных полей скоростей хранения, а также формирования баз данных и получения справочной информации.

В дальнейшем планируются работы по включению в состав Базового прикладного программного обеспечения (БППО) кластерного комплекса СКИТ библиотек по программной реализации перечисленных подсистем в составе СИМВО на языке C++.

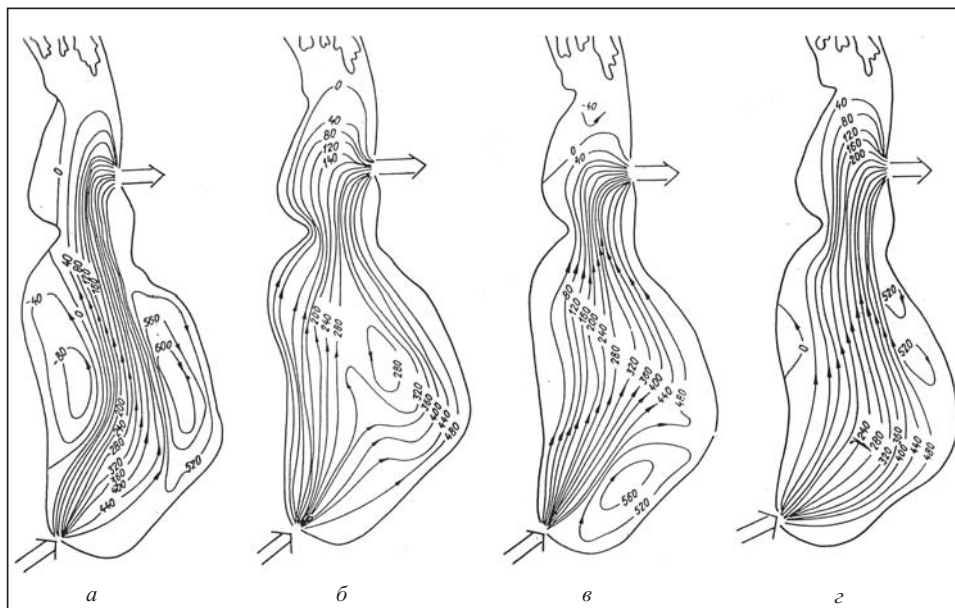


Рис. 3. Схемы циркуляции вод в Сасыкском водохранилище (транзитный расход дунайской воды  $500 \text{ м}^3/\text{с}$ ) при среднем ветре северного (а), южного (б), восточного (в) и западного (з) направлений

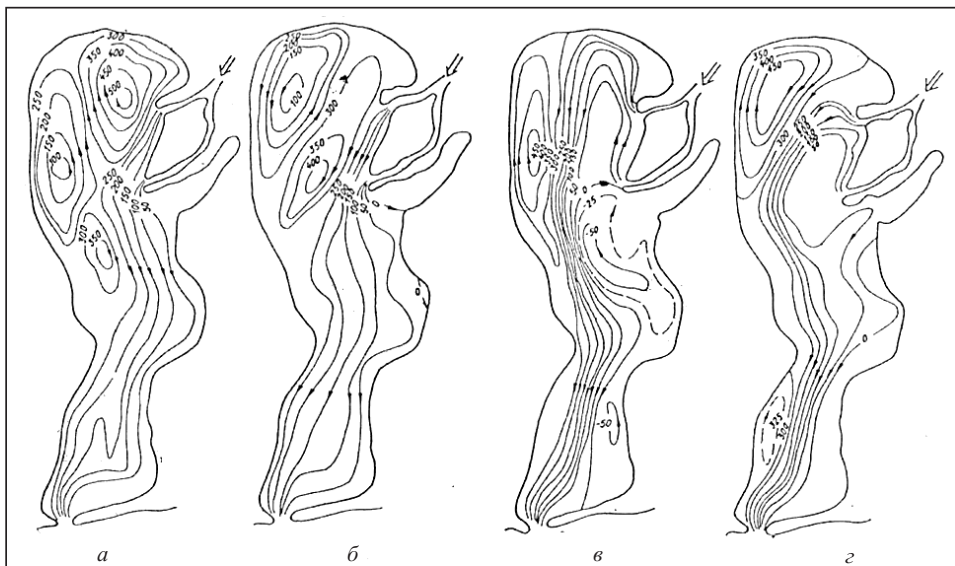


Рис. 4. Схемы циркуляции вод в Днестровском лимане при северном (а), восточном (б), южном (в) и западном (з) ветре со скоростью  $5 \text{ м/с}$  (транзитный расход воды  $300 \text{ м}^3/\text{с}$ )

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подсистема РОТОК использовалась для расчета стационарных стоково-ветровых течений в Киевском водохранилище и послойных токовых состояний при различных гидрометеорологических условиях для разных режимов Сасыкского водохранилища, водоема-охладителя Криворожской ГРЭС, водоемов и водохранилищ Днепровского каскада и четырех лиманов Северо-Западного Причерноморья — Днестровского, Тилигульского, Березанского, Днепровско-Бугского. Просчитано более 1000 вариантов для различных заданных синоптических ситуаций, разных направлений и скоростей ветра, в том числе безветрия.



Вычислительные работы проводились с использованием разработанной в Институте социально-экономических проблем (г. Ленинград) специализированной универсальной диалоговой системы «Среда», включающей тексты вопросов, инструкций, специализированные системные директивы, а также графическую обработку результатов в виде рисунков с изображением границ областей, островов и векторов направлений ветра с указанием масштаба сетки.

В результате компьютерной реализации подсистемы РОТОК осуществляется расчет значений течений и токовых состояний на разных глубинах в водоемах с криволинейной границей, что позволяет получать схемы как течений, так и интегральной циркуляции вод на каждом заданном горизонте для широкого класса водоемов. Результаты расчетов использовались в рамках проведения работ по ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы. Кроме того, данные по моделированию послонных гидродинамических состояний водоемов Днепровского каскада и лиманов Северо-Западного Причерноморья использовались в процессе разработки Межгосударственной Программы создания канала Дунай–Днепр.

Расчетные данные для конкретных водных объектов согласно верификации, проведенной Институтом гидробиологии НАНУ, соответствуют реальным данным.

На основе полученных результатов созданы архивы информационных массивов расчетных данных. Материалы в виде листингов, чертежей, изолиний функций тока и векторов скоростей переданы в Институт гидробиологии НАНУ для использования в работах по оценкам качества воды, биопродуктивности водоемов и прогнозирования их гидробиологических показателей.

Применение при разработке подсистемы РОТОК системного подхода к организации вычислительных схем гидродинамических моделей, получению информационных числовых массивов характеристик конкретных водоемов, созданию баз данных и разработке методических рекомендаций для принятия обоснованных решений обеспечивает повышение теоретического уровня научных исследований по изучению различных внутриводоемных процессов, что дает возможность оперативно прогнозировать с достаточно высоким уровнем достоверности состояние водных объектов в условиях антропогенных воздействий.

Значимость и эффективность использования подсистемы РОТОК для получения токовых состояний водоемов на различных горизонтах для разных направлений и скоростей ветра обусловлены тем, что значения токовых состояний при расчетах преобладающего ветра за различные месяцы, сезоны года и несколько лет позволяют проводить теоретические исследования в целях прогнозирования водообменов в водоемах Украины по известной скорости и направлению установившегося ветра. Это дает возможность определять наиболее часто встречающиеся динамические характеристики водоемов Украины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каленчук-Порханова А.О. Система моделирования стану водних об'єктів Північно-Західного Причорномор'я. *Зб. доп. II-го з'їзду гідробіологічного товариства України*. Київ, 1997. Т. 2. С. 207, 208.
2. Лаврик В.И., Каленчук-Порханова А.А. Имитационная система моделирования экологического состояния устьев рек, лиманов и озер северо-западного Причерноморья. *Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря: Сб. тр. науч. конф.* Севастополь, 1997. С. 88, 89.
3. Басок Н.В., Хибина М.А., Хильченко В.Й., Юрачківська Л.М. Система моделювання стану водних об'єктів. *Технічні та системні засоби екологічного моніторингу*. Київ: Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 1998. С. 46–51.
4. Каленчук-Порханова А.А. Аппроксимация функций одной и многих переменных. Численные методы для многопроцессорного вычислительного комплекса ЕС. Москва: Изд-во ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1987. С. 366–395.
5. Каленчук-Порханова А.А., Вакал Л.П. Об одном способе преобразования экологической информации. *Технічні та програмні засоби систем екологічного моніторингу*. Київ: Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 1994. С. 76–80.

6. Каленчук-Порханова А.А. Аппарат аппроксимации для анализа и синтеза сложных систем. *Пр. Міжнар. конф. «50 років Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України»*, Київ, 2008. С. 354–361.
7. Каленчук-Порханова А.А., Вакал Л.П. Аппарат аппроксимации в составе программного обеспечения суперкомпьютера с кластерной архитектурой. *Искусственный интеллект*. 2009. № 1. С. 158–165.
8. Каленчук-Порханова А.А. Наилучшая чебышевская аппроксимация функций одной и многих переменных. *Кибернетика и системный анализ*. 2009. № 6. С. 155–164.
9. Каленчук-Порханова А.А. Способы повышения эффективности вычислений с использованием аппарата наилучшей чебышевской аппроксимации. *Пр. конф. «Високопродуктивні обчислення HIGH PERFORMANCE COMPUTING HPC-UA 2012»*. Киев, 2012. С. 195–202.
10. Vakal L.P. Using genetic algorithm for solving boundary value problems. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2015. Vol. 47, N 8. P. 52–62.
11. Иващенко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. Киев: Наук. думка, 1985. 216 с.
12. Каленчук-Порханова А.А., Басок Н.В. Подсистема моделирования изменений кислородного режима в водотоках. *Компьютерная математика*. 2015. Вып. 1. С. 18–25.
13. Каленчук-Порханова А.А. Математическое моделирование переноса загрязнений в водотоках. *Комп'ютерні засоби, мережі і системи*. 2015. № 14. С. 16–25.
14. Каленчук-Порханова А.А., Басок Н.В. Моделирование процессов в подземных водоносных горизонтах. *Компьютерная математика*. 2015. Вып. 2. С. 139–149.
15. Фельзенбаум А.И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. Москва: Изд-во АН СССР, 1960. 89 с.
16. Vakal L.P. Seeking optimal knots for segment approximation. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. Vol. 48, N 11. P. 68–75.
17. Vakal L.P., Kalenchuk-Porkhanova A.A., Vakal E.S. Increasing the efficiency of Chebyshev segment fractional rational approximation. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2017. Vol. 53, N 5. P. 759–765.

Надійшла до редакції 09.07.2018

## А.О. Каленчук-Порханова

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТОКОВИХ СТАНІВ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

**Анотація.** Система імітаційного моделювання водних об'єктів, розроблена в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, складається з підсистем моделювання змін кисневого режиму і перенесення забруднень у водотоках, процесів у підземних водоносних горизонтах, токових станів у водоймах та інтелектуалізованого способу оброблення, стиснення і відновлення з гарантованою точністю масивів числових даних із застосуванням апарату найкращої чебишовської апроксимації, яка використовується в усіх підсистемах. Моделі для конкретних водних об'єктів України створено вперше. Система є «відкритою» для включення нових моделей і об'єктів. Описано підсистему моделювання токових станів у водоймах.

**Ключові слова:** моделювання, підсистема, водний об'єкт, токові стани у водоймах.

## А.А. Kalenchuk-Porkhanova

### SIMULATION OF FLOW STATES OF WATER OBJECTS

**Abstract.** The Simulation System of Water Objects software package was developed at the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics, National Academy of Sciences of Ukraine. It includes simulation subsystems of oxygen rate changes in water flow, pollutions transfer by water flow, filtration processes in underground water saturated layers, water reservoir flow states and intelligent processing, compressing and recovery with guaranteed precision of data arrays based on best Chebyshev approximation, which is used in all of other subsystems. All the models for some water objects of Ukraine were implemented for the first time. Simulation System of Water Objects is extensible and provides tools for integration of new models and objects. The simulation subsystem of water flow is described in the paper.

**Keywords:** modeling, subsystem, water-objects, flow states in water objects.

**Каленчук-Порханова Анжеліна Алексеевна,**  
кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Института кибернетики НАН Украины, Киев, e-mail: natalya.kalenchuk@ukr.net.