

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНОГО ОБЪЕКТА ПУТЕМ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФфуЗИИ

МУРАВЬЕВА И.С., ЧАЙНИКОВ С.И.

Рассматривается метод расчета кратности основного разбавления при моделировании воздействия сбросов на качество воды в водоемах. Реализуется численное моделирование, основанное на решении уравнения турбулентной диффузии. Проводится оценка воздействия водоема-охладителя атомной электростанции на водный объект.

Сброс сточных вод в водные объекты является одним из видов специального водопользования и осуществляется на основании разрешений, выдаваемых органами Минэкоресурсов Украины. Промышленные воды из водоемов-охладителей ТЭС и АЭС также относятся к категории сточных вод.

Нормирование сбросов загрязняющих веществ в окружающую природную среду производится путем установления предельно допустимых сбросов (ПДС) нормированных веществ со сточными водами в водные объекты.

ПДС – масса вещества в сточных водах, максимально допустимая к отведению с установленным режимом в данном пункте водного объекта в единицу времени в целях обеспечения норм качества воды в контрольном пункте. ПДС устанавливаются с учетом предельно допустимых концентраций (ПДК) в местах водопользования, ассимилирующих способности водного объекта и оптимального распределения массы сбрасываемых веществ между водопользователями, сбрасывающими сточные воды.

Продувкой водоемов-охладителей называют смену водных масс в них в целях улучшения качества циркуляционной воды. В соответствии с Водным кодексом Украины, статья 74 “Предприятия, учреждения и организации, имеющие накопители загрязненных сточных или шахтных, карьерных, рудничных вод обязаны внедрять эффективные технологии для их обезвреживания и утилизации и осуществлять рекультивацию земель, занятых этими накопителями.

Сброс этих вод в поверхностные водные объекты осуществляется в соответствии с индивидуальным регламентом, согласованным с государственными органами охраны окружающей природной среды”.

Целью данного исследования является реализация численного моделирования процесса распространения субстанции в жидкой среде на основе уравнения турбулентной диффузии.

Задача исследования – выполнение расчета кратности основного разбавления при моделировании воздействия сбросов на качество воды в водном объекте.

Для расчета переноса или полей концентрации растворенных веществ в мелководных водоемах (водохранилищах) наиболее адекватной моделью, наиболее широко применяемой на практике, является двумерное полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \sigma \varphi = \mu \Delta \varphi + f$$

с начальными условиями: $\varphi = \varphi_0$ при $t = 0$;

граничными условиями на жидкой границе: $\varphi = \varphi_s$ на Σ при $u_n < 0$;

граничное условие на береговом контуре и на жидком контуре с отрицательным притоком:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \text{ на } \Sigma \text{ при } u_n \geq 0,$$

где $\varphi(x, y, t)$ – интенсивность субстанции, мигрирующей вместе с потоком жидкости в водоеме; $U = u\bar{i} + v\bar{j}$ – вектор скорости частиц жидкости, $\bar{i}, \bar{j}$ – единичные векторы в направлении осей x, y ; $\mu \geq 0$ – горизонтальный коэффициент диффузии; $\sigma \geq 0$ – величина, обратно пропорциональная времени; $f(x, y, t)$ – функция, описывающая источники рассматриваемой субстанции; φ_0 и φ_s – заданные функции; u_n – проекция вектора U

на внешнюю нормаль к поверхности S ; $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ – производная по направлению внешней нормали к Σ ; Σ – боковая поверхность.

Численный метод моделирования переноса растворенной примеси построен на основе схемы расщепления по физическим процессам [1]. В результате решение исходной задачи сводится к поочередному решению трех более простых задач.

На первом этапе решается уравнение переноса субстанций вдоль траекторий или уравнение адвекций:

$$\begin{aligned} \varphi_{i,j}^{n+1} = & (1 - a_{i,j}^2 - b_{i,j}^2) \bar{\varphi}_{i,j} + \frac{1}{2} a_{i,j} [(a_{i,j} - 1) \bar{\varphi}_{i-1,j} + (a_{i,j} + 1) \bar{\varphi}_{i+1,j}] + \\ & + \frac{1}{2} b_{i,j} [(b_{i,j} - 1) \bar{\varphi}_{i,j-1} + (b_{i,j} + 1) \bar{\varphi}_{i,j+1}] + \\ & + \frac{1}{4} a_{i,j} b_{i,j} (\bar{\varphi}_{i+1,j+1} - \bar{\varphi}_{i+1,j-1} - \bar{\varphi}_{i-1,j+1} + \bar{\varphi}_{i-1,j-1}), \end{aligned}$$

где $a_{i,j} = -\frac{u_{i,j} \Delta t}{\Delta x}$, $b_{i,j} = -\frac{v_{i,j} \Delta t}{\Delta x}$.

В соответствии с методом расщепления по физическим процессам второй этап представляет собой задачу о диффузии субстанции на интервале Δt . Соотношение, позволяющее найти решение двумерной задачи о диффузии субстанции, имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_{i,j}^{n+1} = & \left\{ 1 - \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left(\mu_{i+\frac{1}{2},j} + \mu_{i-\frac{1}{2},j} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \left(\mu_{i,j+\frac{1}{2}} - \mu_{i,j-\frac{1}{2}} \right) \right\} \varphi_{i,j} + \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \mu_{i+\frac{1}{2},j} \varphi_{i+1,j} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \mu_{i-\frac{1}{2},j} \varphi_{i-1,j} + \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \mu_{i,j+\frac{1}{2}} \varphi_{i,j+1} + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \mu_{i,j-\frac{1}{2}} \varphi_{i,j-1}. \end{aligned}$$

Третий этап представлен уравнением, описывающим трансформацию примесей.

Оператор, позволяющий получить решение двумерного уравнения трансформации, может быть задан следующим образом:

$$\varphi_{i,j}^{n+1} = \frac{\varphi_{i,j} + \frac{2\Delta t}{H_{i,j}} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta s} \right)_{i,j} f_{i,j}}{1 + 2\Delta t \left[\sigma + \frac{1}{H_{i,j}} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta s} \right)_{i,j} \right]},$$

где ΔQ — расход притока в узле (ij); Δs — площадь ячейки; $f_{i,j}$ — концентрация примеси в источнике; σ — коэффициент распада (или коэффициент самоочищения), учитывающий неконсервативные свойства вещества. Для консервативного вещества $\sigma = 0$.

Объект исследования - водоем-охладитель АЭС, из которого осуществляется продувка в Каховское водохранилище в целях улучшения качества циркуляционной воды.

Система охлаждения циркуляционной воды АЭС включает, кроме водоема-охладителя, брызгальные бассейны неответственных потребителей и две градирни. Подпитка системы охлаждения, компенсирующая расходную часть водного баланса, осуществляется за счет сбросов подогретых вод.

Расчет кратности основного разбавления N при моделировании воздействия сбросов в водоемы и прибрежные зоны моря может быть выполнен на основе решения уравнения турбулентной диффузии специализированным методом, описывающим стационарные процессы установившихся полей ветровых течений и переносимых ими масс нормированных веществ.

Специализированные методы отличаются существенно более высокой степенью адекватности описания процессов переноса веществ в водоемах и прибрежных частях моря. Однако они требуют значительного объема информации, включающей морфологические данные об очертании водного объекта, рельефа дна, метеорологические данные, начальные гидрохимические и гидрологические условия как на исследуемой акватории, так и во входных и выходных потоках, примыкающих к ней.

Для решения задачи используются широко известный метод расчета полей установившихся скоростей ветровых течений Фельзенбаума [2] и метод расчета полей установившихся концентраций веществ. Оба метода относятся к классу двумерных, так как описывают осредненные по глубине характеристики ячеек, на которые разбивается водный объект.

Методика расчета кратности основного разбавления при моделировании воздействия сбросов на качество воды в водоемах и прибрежных зонах морей состоит из четырех этапов:

- 1) разбиение водного объекта на ячейки с размерами, позволяющими наиболее подробно описать водный объект и достаточными для решения поставленной задачи (при расчете ПДС размер ячеек должен быть таким, чтобы их как можно больше уместилось на расстоянии 250 м для моря и 500 м для поверхностных водных объектов). При этом каждая ячейка должна быть обеспечена требуемой исходной информацией;
- 2) определение полей установившихся скоростей ветровых течений водного объекта;
- 3) определение начального разбавления сбросов в водный объект, если таковое имеется;
- 4) определение основного разбавления сбросов в водный объект, которое в зависимости от поставленной задачи и полноты знания требуемых характеристик водного объекта заключается в использовании специализированного метода расчета полей установившихся концентраций веществ.

На четвертом этапе рассчитываются так называемые поля нормированных концентраций от каждого источника в отдельности. При этом расчете концентрация в исследуемом источнике задается равной единице, а в остальных источниках и входных потоках — равными нулю. Расходы воды во всех источниках, равно как и во входных и выходных потоках, остаются на фактическом уровне. В полученном в результате расчета поле концентраций выделяются ячейки, удаленные от исследуемого источника на требуемое расстояние (при расчете ПДС для моря расстояние равно 250 м, для поверхностных водных объектов — 500 м). Среди выделенных ячеек находится ячейка с максимальной концентрацией. Искомая кратность основного разбавления исследуемого источника определяется как обратная величина концентрации в найденной ячейке. По определению она не может быть меньше единицы.

На рис. 1 представлена гидрографическая схема участка Каховского водохранилища в районе расположения водоема-охладителя и выпуска сточных вод. В рассматриваемом районе имеется крупный сброс подогретых вод в Каховское водохранилище.

При расчете ПДС или моделировании качества воды в водном объекте с несколькими источниками загрязнения ячейка, определяющая положение контрольного створа, должна быть задана одна для

всех источников исходя из водо-охранной ситуации. Процедура определения кратности основного разбавления выполняется для всех источников. Далее искомые допустимые концентрации источников определяются итерационным путем последовательного снижения их концентраций в пропорциях, определяемых разработчиком.

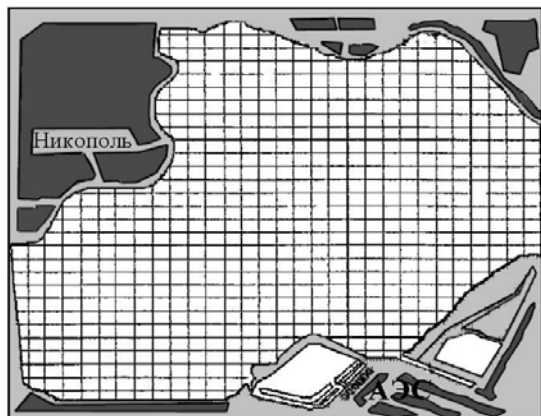


Рис. 1. Расчетная схема участка Каховского водохранилища в районе продувки пруда-охладителя Запорожской АЭС

Моделирование полей ветровых течений выполнялось по методу Фельзенбаума. Результаты такого моделирования приведены на рис. 2.

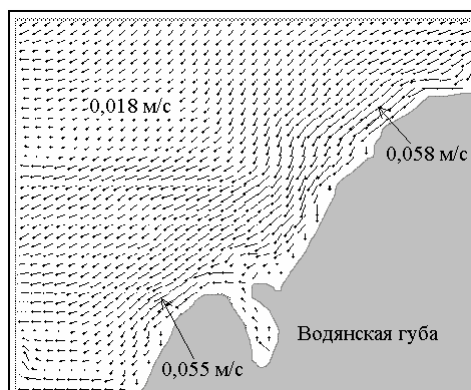


Рис. 2. Поле средних по глубине ветровых течений в Каховском водохранилище в районе продувки водоема-охладителя при транзитном расходе воды в водохранилище 1500 м.куб/с и восточном ветре силой 5 м/с

На основании результатов расчета ветровых течений проведено моделирование качества воды, которое образуется после сброса продувочных вод в Каховском водохранилище при характерных транзитных попусках 95% обеспеченности.

Кратность разбавления продувочных вод в контрольном створе водохранилища определялась путем моделирования процесса загрязнения поверхностных вод водохранилища источником загрязнения с концентрацией 1 мг/дм.куб с расходом воды 6 м.куб/с. Вместе расположения контрольного створа (в радиусе 500 м от устья Водянской губы) определялась расчетная концентрация. Значение, полученное путем деления единицы на расчетную концентрацию, является расчетной кратностью разбавления.

На рис. 3 приведена схема разбавления продувочных вод при восточном ветре силой 5 м/с.

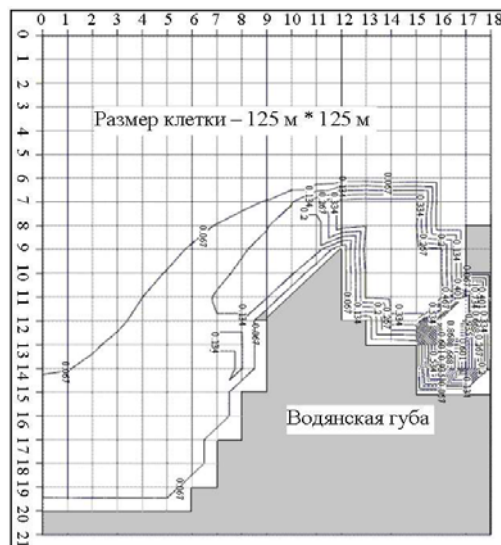


Рис. 3. Поле концентраций в Каховском водохранилище при транзитном расходе воды 1500 м.куб/с

Сравнение результатов расчетов качества воды с фактическими показало, что по ряду показателей имеют место существенные отклонения, что связано с отсутствием по большинству ингредиентов информации об их концентрациях в сточных водах объединенных очистных сооружений, промливневой канализации.

Заключение

Рассмотрен метод расчета кратности основного разбавления при моделировании воздействия сбросов технических объектов на качество воды в водоемах. На примере оценки воздействия водоема-охладителя АЭС на Каховское водохранилище реализовано численное моделирование, основанное на решении уравнения турбулентной диффузии. Определены наименее благоприятные метеорологические условия, при которых загрязняющая струя от продувки пруда-охладителя АЭС имеет наименьшую кратность разбавления водой Каховского водохранилища. Полученные допустимые концентрации химических веществ в продувочных водах, соответствующие предельно допустимым сбросам, для большинства показателей соответствуют прогнозным их концентрациям, не превышающим ПДК.

Литература: 1. *Муравьева И.С.* Расчет основного разбавления для водоемов // Радиоэлектроника и информатика. 2003. №2. 2. *Фельзенбаум А.И.* Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. М.: Изд. Академии наук СССР, 1960. 127с.

Поступила в редколлегию 14.12.2003

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Авраменко В.П.

Муравьева Ирина Сергеевна, аспирант кафедры системотехники ХНУРЭ. Научные интересы: экология, гидрология, системный анализ, автоматизация проектирования. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-06.

Чайников Сергей Иванович, доцент кафедры системотехники ХНУРЭ. Научные интересы: экология, гидрология, системный анализ, автоматизация проектирования. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-06.