

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко В.П. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
2. Мурин Г.А. Теплотехнические измерения. – М.: Энергия, 1979. – 364 с.
3. Бахтин А.Г., Смердов А.А., Таирова Л.П. Моделирование термонапряженного состояния композитных отсеков и обтекателей ракет-носителей на образцах // Ракетно-космическая техника. Фундаментальные и прикладные проблемы механики: Матер. Междунар. научной конф., посвященной 90-летию В.И. Феодосьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – С. 144.
4. Баранов А.Н., Давыдова В.В., Попова Т.А. и др. Методические погрешности измерения термодатчиками температуры тонкостенной металлической конструкции // Труды ЦАГИ. – 2004. – Вып. 2658. – 80 с.
5. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
6. Герашенко О.А., Городов А.Н., Лах В.И. и др. Температурные измерения: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1984. – 494 с.
7. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1005 с.
8. Справочник по электротехническим материалам / Ред. Ю.В. Корицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т. 2. – 464 с.

Поступила 11.03.2009 г.

УДК 536.2:532.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОДОЕМОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Г.В. Кузнецов, В.В. Литвак, В.И. Максимов

Томский политехнический университет
E-mail: elf@tpu.ru

Представлены результаты математического моделирования гидродинамики, теплообмена и развития фитопланктона в типичном водоеме-охладителе тепловой электрической станции в различные времена года. Исследованы режимы смешанной конвекции и фотосинтетическая способность фитопланктона в открытом водоеме для различных термических периодов. Получены распределения гидродинамических параметров, температур и определена фотосинтетическая способность фитопланктона в водоеме-охладителе ТЭС в различные времена года. Установлено, что структура течений в различные времена года существенно не меняется, а в открытом водоеме-охладителе даже в зимний период фотосинтетическая активность биопланктона достаточна для биологического загрязнения воды до уровня, превышающего допустимый.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, гидродинамика, теплообмен, смешанная конвекция, фотосинтетическая способность фитопланктона, водоем-охладитель тепловой электрической станции, биологическое загрязнение.

1. Введение

Существенное влияние на технико-экономические показатели тепловых электростанций оказывает эффективность работы систем технического водоснабжения, обеспечивающих охлаждение конденсаторов турбин. В настоящее время для большинства Российских ТЭС в качестве охладителей используются естественные и искусственные водоемы [1]. Для эффективного охлаждения воды, такие водоемы имеют обширную свободную поверхность и небольшую глубину (3...7 м). Средняя температура воды (независимо от времени года) достигает 25...30 °С [2]. По этим причинам в водоемах-охладителях создаются условия, которые в значительной мере воздействуют на его гидробиологическое состояние — с одной стороны ускоряя биологические процессы, с другой — создавая селективные условия для выживания определенных групп организмов [3, 4]. Дисбаланс поступления и выноса органических веществ из водоема-охладителя приводит к усиленному развитию отдельных представителей гидробионтов и зарастанию высшей

водной растительностью [3–6]. В его экосистеме ежегодно увеличиваются площади зарастания высшей водной растительностью, а также цветения воды представителями сине-зеленых водорослей. Эффективность таких водоемов-охладителей заметно снижается и появляется необходимость предпринимать дополнительные меры для борьбы с бактериями и водорослями, а также проводить мероприятия по очистке водоема, что может приводить к временной остановке технологического процесса [7]. Интенсивная борьба с бактериями также приводит к экологическому загрязнению окружающей среды.

Для того что бы спрогнозировать развитие сообществ фитопланктона и бактериальных сообществ водоемов возникает необходимость использования методов математического моделирования. Использование таких методов для анализа пресноводных экосистем получило широкое распространение [8–10]. Тем не менее, моделей экосистем водохранилищ известно сравнительно немного [6, 9]. Исследования затрудняются тем, что очень часто

искусственные водоемы ТЭС представляют собой экосистемы, не достигшие состояния гомеостаза, находящиеся в стадии развития и подвержены постоянному антропогенному воздействию [6, 8]. В этой ситуации математические модели, позволяющие не только спрогнозировать экодинамику водоемов, но и проверить конкретные альтернативные гипотезы относительно принципов функционирования их экосистем, приобретают особую ценность. При разработке математических моделей возникает необходимость рассмотрения комплекса факторов, определяющих условия функционирования водных экосистем и учитывающих следующие процессы [6]:

1. Экологические, описывающие биогидрохимические круговороты веществ и энергии в экосистемах.
2. Гидрологические, характеризующие перенос воды, биоты и растворенных веществ в водоемах в зависимости от их поступления, с водосбора и процессов внешнего водообмена.
3. Гидродинамические, определяющие структуру потоков и распределения веществ в экосистемах.
4. Антропогенные, задающие нагрузки на водоемах, воздействие на них в результате деятельности ТЭС.
5. Гидрометеорологические, характеризующие условия перемешивания водных масс и их переноса внутри водоемов.

В настоящее время математических моделей такого уровня в России и за рубежом нет.

Целью данной работы является численное моделирование смешанной конвекции, развития фитопланктона и бактериальных сообществ в типичном открытом водоеме-охладителе тепловой электрической станции.

2. Физическая модель

Рассматривается течение несжимаемой вязкой жидкости и теплообмен в полости имеющей две вертикальные, одну горизонтальную стенки конечной толщины и одну свободную поверхность, с двумя участками ввода и вывода жидкости. На внешних границах области заданы неоднородные граничные условия. Неоднородность обусловлена различными теплофизическими характеристиками сред и условиями теплообмена на границах области решения. Отток массы с верхней границы за счет испарения не учитывается, так как интенсивность этого процесса не настолько велика, чтобы он мог изменить конфигурацию полости заполненной водой, или её размеры.

При моделировании процессов биологического загрязнения предполагается, что основное влияние на развитие фотосинтеза оказывают такие факторы как освещённость, температура и скорость перемещения водной среды [6]. Годовой термический

цикл водохранилищ распадается на четыре периода, качественно отличных друг от друга [4]. Периоды подразделяются по временам года: весенний, осенний, зимний, летний. Основные отличия этих периодов это температура окружающей среды и освещённость. Так как температура окружающей среды существенно влияет на гидротермические процессы в водоеме, а освещённость оказывает влияние на биопланктон, то проводится моделирование смешанной конвекции жидкости и фотосинтеза в водоеме-охладителе для всех периодов. Прогнозируется развитие наиболее типичных представителей фитопланктона пресноводной экосистемы сине-зелёных водорослей. Они же являются и основными биологическими загрязнителями водоемов-охладителей тепловых электростанций.

3. Математическая модель и метод решения

Процесс переноса массы, количества движения и энергии описывается системой нестационарных уравнений Навье-Стокса для жидкой фазы и уравнением теплопроводности для твердой фазы [11, 12]. Задача решалась в безразмерной постановке.

Для приведения системы уравнений неразрывности, движения и энергии к безразмерному виду использовались следующие соотношения:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, \tau = \frac{t}{t_0}, U = \frac{u}{V_{in}}, V = \frac{v}{V_{in}},$$

$$\Theta = \frac{T - T_0}{\Delta T}, \Psi = \frac{\psi}{\psi_0}, \Omega = \frac{\omega}{\omega_0},$$

$$\Delta T = T_{in} - T_0, \psi_0 = V_{in} L, \omega_0 = \frac{V_0}{L},$$

где x, y – размерные координаты; X, Y – безразмерные координаты, соответствующие x, y ; L – длина полости по оси x ; t_0 – масштаб времени; τ – безразмерное время; u, v – скорости по осям x, y соответственно; U, V – безразмерные скорости, соответствующие u, v ; V_{in} – масштаб скорости (скорость жидкости на входе); Θ – безразмерная температура; T_0 – температура жидкости и твердого тела в начальный момент времени; T_{in} – температура жидкости на входе; ψ – функция тока; ψ_0 – масштаб функции тока; Ψ – безразмерный аналог ψ ; ω – вихрь скорости; ω_0 – масштаб вектора скорости; Ω – безразмерный аналог ω .

Соответственно безразмерные уравнения Навье-Стокса в приближении Буссинеска в переменных «вихрь скорости – функция тока – температура» для жидкой фазы (режим смешанной конвекции) и уравнение теплопроводности для твердой фазы будут иметь вид:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial X} \right),$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right),$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = \Omega,$$

$$\frac{1}{Fo} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2},$$

здесь $Gr = (g\beta L^3 \Delta T) / \nu^2$ – число Грасгофа; β – температурный коэффициент объемного расширения; g – ускорение, создаваемое массовыми силами; $Re = (2VL) / \nu$ – число Рейнольдса; $Pr = \nu / a$ – число Прандтля; $Fo = at_0 / L^2$ – число Фурье; a – коэффициент температуропроводности; ν – коэффициент кинематической вязкости.

Начальные условия:

$$\Psi(X, Y, 0) = 0,$$

$$\Omega(X, Y, 0) = 0,$$

$$\Theta(X, Y, 0) = 0.$$

Граничные условия:

- на внешнем контуре рассматриваемой области (кроме свободной поверхности жидкости) задаются граничные условия второго рода $\partial \Theta / \partial n = Ki$;
- на свободной поверхности жидкости:

$$\Psi = 0, \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = \tau_z,$$

$$\frac{\partial \Theta_f(X, Y)}{\partial Y} = Bi \cdot \Theta_f(X, Y) + Bi \cdot \frac{T_0 - T_e}{T_{in} - T_0} + K_i;$$

- на внутренних границах раздела твердой и жидкой фазы, параллельных оси OY:

$$\Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_w = \Theta_f \\ \frac{\partial \Theta_w}{\partial X} = \lambda_{w,f} \frac{\partial \Theta_f}{\partial X} \end{array} \right.$$

- на внутренних границах раздела твердой и жидкой фазы, параллельных оси OX:

$$\Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_w = \Theta_f \\ \frac{\partial \Theta_w}{\partial Y} = \lambda_{w,f} \frac{\partial \Theta_f}{\partial Y} \end{array} \right.$$

- участок ввода жидкости:

$$\Theta = 1,$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 1;$$

- участок оттока жидкости:

$$\frac{\partial \Theta(X, Y)}{\partial Y} = 0,$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 1;$$

здесь $Ki = \frac{qL}{\lambda_w(T_{in} - T_0)}$ – число Кирпичева;

$Bi = \frac{\alpha_k L}{\lambda_f}$ – число Био; $\tau_z = \frac{\tau_z L}{V_{in} \mu}$ – безразмерное

касательное напряжение; $K_i = \frac{WQ_i L}{\lambda(T_{in} - T_0)}$ – безраз-

мерное число испарения; τ'_z – касательное напряжение на свободной поверхности; μ – динамическая вязкость жидкости; α_k – коэффициент теплообмена между внешней средой и рассматриваемой областью решения; T_e – температура окружающей среды; λ_w и λ_f – коэффициенты теплопроводности твердой и жидкой фаз; $\lambda_{w,f} = \lambda_w / \lambda_f$ – относительный коэффициент теплопроводности; q – тепловой поток на внешних границах области решения;

$W = \frac{A(P_n - P'')}{\sqrt{\frac{2\pi R_g}{M} \cdot T_{pb}}}$ – массовая скорость испарения;

Q_i – теплота фазового перехода; P_n – давление насыщения; P'' – парциальное давление испаряющихся компонентов; R_g – газовая постоянная; M – молекулярный вес; A – коэффициент accommodation; T_{pb} – температура испарения.

Система нестационарных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями решена методом конечных разностей [11].

Для моделирования развития бактерий в водоеме использовали полуэмпирические уравнения [6]:

$$P = 2P_1 \cdot I / 2IK / (1 + (1 / 2IK)^2),$$

$$IK = 0,8P_1 / \alpha_1,$$

$$P_1 = P_{I\text{top}} f_T,$$

$$f_T = (VT)^{XT} \cdot \exp(XT(1 - VT)),$$

$$VT = (T_{\max} - T) / (T_{\max} - T_{opt}),$$

$$XT = (WT)^2 (1 + \sqrt{1 + 40 / WT})^2 / 400,$$

$$WT = \ln(Q10) \cdot (T_{\max} - T_{opt}).$$

Здесь P – фотосинтетическая способность фитопланктона; I – среднесуточное значение энергетической экспозиции; T – температура; α_1 – экспериментальное значение наклона кривой фотосинтеза; $P_{I\text{top}}$ – наиболее высокая фотосинтетическая способность при оптимальной среднесуточной энергетической экспозиции и температуре; T_{\max} – максимальная температура, при которой реакция фотосинтеза прекращается; $Q10$ – относительная разница в скорости протекания процесса при повышении температуры на 10° .

4. Анализ результатов численного моделирования

Численные исследования были проведены при следующих значениях безразмерных и размерных величин: $Pr=7,1$; $Re=1000$; $Gr \leq 10^5$; $T_0=293$ К; $T_{in}=343$ К;

$263 \leq T_c \leq 297$ К. Рассматривался открытый водоем глубиной 5 и длиной 10 м, толщина бетонных стенок 1 м. Ширина входного и выходного канала 0,3 м.

На рисунке приведены типичные результаты решения сформулированной задачи в различные термические периоды. Видно образование двух вихрей разных размеров и интенсивности. Верхний

вихрь существует за счет сил естественной и вынужденной конвекции. Поток жидкости, охлаждаясь за счет теплоотвода с верхней и частично с левой границы полости, опускается по левой стенке, оттесняя основной поток вниз. Нижний вихрь образован за счет вынужденной конвекции в результате движения основного потока и естественной

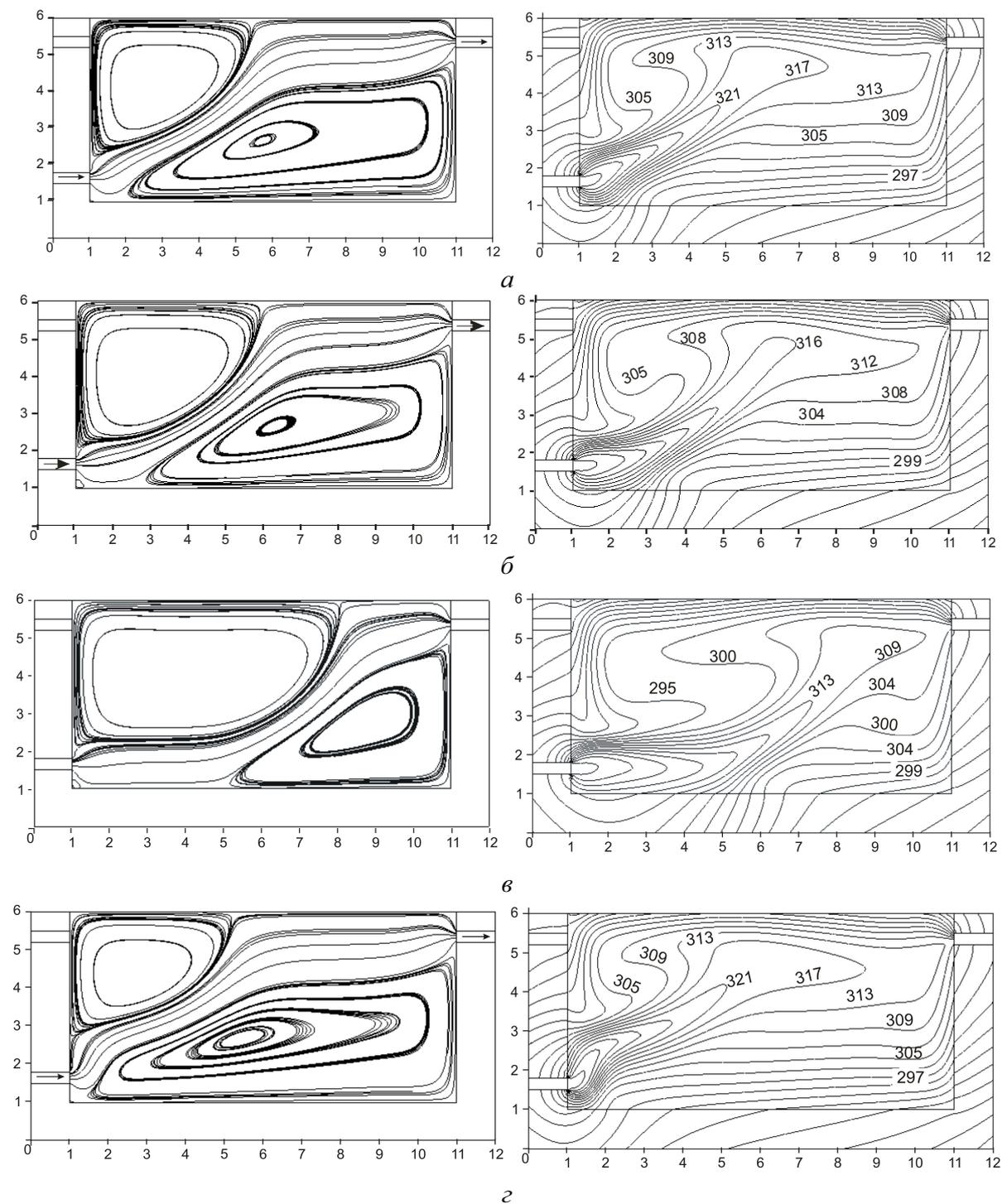


Рисунок. Структура течения и поле температур для модели смешанной конвекции в водоеме-охладителе в летний (а), осенний (б), зимний (в), весенний (г) периоды. Размеры приведены в м, температуры – в К

конвекции при охлаждении жидкости теплоотводом с правой и нижней границы полости. Вихрь в нижней области масштабнее вихря в верхней, т. к. размер верхнего вихря ограничивается поднимающимся потоком горячей жидкости. Распределение температуры в этом случае существенно неравномерное. В верхней части полости температура на 50° выше, чем в нижней. Происходит это за счет того, что охлаждаемая жидкость в нижней части полости практически не смешивается с основным нагретым потоком. В зимний период (рисунок, в) верхний вихрь становится обширнее и даже больше нижнего. Поток жидкости, интенсивно охлаждаясь за счет теплоотвода с верхней и левой границы полости, опускается по левой стенке, прижимая входной поток вниз.

В таблице приведена фотосинтетическая способность фитопланктона в типичном водоеме-охладителе ТЭС Западно-Сибирского региона в различные времена года.

Таблица. Фотосинтетическая способность фитопланктона в различные термические периоды для Беловского водоема-охладителя (Кузбасс)

Параметры	Термические периоды			
	Весенний	Летний	Осенний	Зимний
Температура окружающей среды, К	288	297	285	263
Среднесуточное значение энергетической экспозиции, Дж/(см ² ·сут)	500	750	460	300
Фотосинтетическая способность фитопланктона $P/P_{\text{Топ}}$	0,25	0,10	0,38	0,55

Активное развитие планктона начинается в весенний период и достигает своего максимума летом. Это связано с тем, что в весенне-летний пе-

риод достигается максимальная годовая солнечная активность и оптимальная температура жидкости в водоеме. В осенний же период фотосинтетическая активность планктона падает и достигает своего минимума зимой.

Необходимо отметить, что даже в зимний период в определенных зонах технологических водоемов сохраняются условия для развития биопланктона. Соответственно остается достаточно высокой и вероятность его попадания в охладительные тракты основного оборудования ТЭС. В связи с этим полученные результаты дают основания для вывода о необходимости реализации профилактических мероприятий по борьбе с биологическим загрязнением водоемов-охладителей ТЭС не только летом, но и зимой. Эта работа должна проводиться в зонах наиболее благоприятных условий существования водорослей или биоорганизмов (локально), и её проведение может существенно повысить надёжность энергетических систем и агрегатов тепловых электрических станций.

Заключение

Теоретически исследованы гидродинамика, теплообмен и развитие фитопланктона в типичном водоеме-охладителе ТЭС Западно-Сибирского региона в различные времена года. Установлено, что структура течений в различные времена года существенно не меняется, а в открытом водоеме-охладителе даже в зимний период фотосинтетическая активность биопланктона достаточна для загрязнения воды до уровня, превышающего допустимый. Полученные результаты являются основанием для вывода о необходимости подхода к прогностическому моделированию процессов биологического загрязнения водоемов-охладителей ТЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водохранилища и водооградительные сооружения ГАЭС, ТЭС и АЭС / Под ред. Т.П. Доценко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
2. Попов В.М., Рябцев В.И., Рябцев Г.А. О тепловом загрязнении окружающей среды выбросами и сбросами ТЭС и ТЭЦ // Безопасность жизнедеятельности. – 2002. – № 4. – С. 26–28.
3. Морозова О.Г., Гаевский Н.А. и др. Влияние затопленных растительных остатков на формирование гидрохимического режима водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1. Влияние альгофлоры водоема-охладителя на качество воды // Химия растительного сырья. – 2001. – № 3. – С. 123–126.
4. Мордухай-Болтовской Ф.Д. Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов (обзор) // Экология организмов водохранилищ-охладителей. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 27. – Л.: Наука, 1975. – С. 7–9.
5. Серяков С.А. Альгоиндикация изменения химизма воды в пресноводных водоемах из-за антропогенского влияния // Химия, технология и экология: X регион. Каргинские чтения. Обл. научно-техн. конф. молодых ученых. – Тверь, 2003. – С. 45–50.
6. Страшкраба М., Гнаук А. Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. – М.: Мир, 1989. – 376 с.
7. СНиП 2.04.02-84. Строительные правила и нормы водоснабжения, наружных сетей и сооружений / Министерство строительства Российской Федерации; – М., 2001. – 239 с.
8. Иваненко С.А., Корявов П.П. Динамика вод и распространение загрязняющих веществ в водохранилище // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14. – № 6. – С. 105–118.
9. Алексеев Л.П. Изучение и методы расчета крупномасштабной турбулентности глубоководного водоема: по материалам исследований на оз. Байкал. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 128 с.
10. Фурсова П.В., Левич А.П. Математическое моделирование в экологии сообществ. Проблемы окружающей среды // ВИНТИ. – 2002. – № 9. – 112 с.
11. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
12. Лыков А.В., Алексашенко А.А., Алексашенко В.А. Сопряженные задачи конвективного теплообмена. – Минск: Наука и техника, 1971. – 346 с.

Поступила 20.04.2009 г.