

УДК 53.088.228

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУР В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО НЕИДЕАЛЬНОГО КОНТАКТА СПАЯ ТЕРМОПАРЫ И МАТЕРИАЛА

Г.В. Кузнецов, К.М. Мухаммадеев

Томский политехнический университет
E-mail: mukhammadeev@mail.ru

Приведены результаты численного моделирования температурных полей в спае термопары при идеальном контакте спае термопары с материалом и при наличии воздушного зазора у любой границы спае. Проведена оценка влияния воздушного зазора на точность определения температуры материала термопарой.

Ключевые слова:

Численное моделирование, нестационарная теплопроводность, термопарные измерения, погрешность, температурное поле.

Контроль температурных полей в твердых телах зачастую проводится термопарами [1]. Точность оценок локальных температур в местах установки термопар существенно зависит от значений характерных времен исследуемых процессов. При малых временах протекания физических процессов инерционность термопар приводит к значительным погрешностям в измерениях температур [2]. Но кроме этого хорошо известного источника погрешностей возможно появление ошибок за счет неидеальности контакта спае термопары с поверхностью вещества, в котором установлена термопара. Как правило, спай расположен на дне цилиндра, рассверливаемого, например, в металле или в композитном материале, или между двумя, соединенными между собой пластинами, если термопара зачеканивается в металл или сплав. В обоих случаях вероятность неидеального контакта достаточно велика. В первом случае идеальный контакт практически невозможен и минимальные погрешности реальны только при достаточно длительных измерениях. По этим причинам представляет интерес оценка ошибок в измерениях температур, связанных с отсутствием контакта между спаем и материалом на части поверхности спае. Аналогичная задача возникает, если такие зазоры заполняются каким-либо веществом (например, эпоксидной смолой) с существенно отличными (по сравнению с материалом, в котором устанавливаются термопары) теплофизическими характеристиками.

В ходе исследования ошибка, вносимая неидеальностью контакта спае термопары, определялась как разность температуры на поверхности термопары при идеальном и неидеальном контактах с материалом, в котором проводятся измерения.

Рассматриваемая задача имеет большое практическое значение, т. к. ее решение позволяет выработать рекомендации по длительности измерений, обеспечивающих минимальные погрешности, а также по достоверности получаемых результатов при исследовании быстропротекающих процессов.

Рассматривается задача теплопроводности для прямоугольной по внешнему контуру области, представляющей собой неоднородную среду, включающую воздушную полость малых размеров, внутри которой расположен спай термопары. В ре-

зультате образуется переменный по периметру спае зазор, толщина которого зависит от конфигураций воздушной полости и спае термопары.

На рис. 1 изображена геометрическая модель области решения при идеальном контакте спае термопары и материала.

Неидеальность контакта моделировалась наличием воздушного зазора у любой границы спае термопары. Рассмотрены следующие случаи зазоров:

- со стороны нагрева (рис. 2, а);
- с «холодной» стороны спае термопары (рис. 2, б);
- с двух сторон спае термопары (рис. 2, в);
- слева и справа от спае термопары (рис. 2, г);
- вокруг всего спае термопары (рис. 2, д).

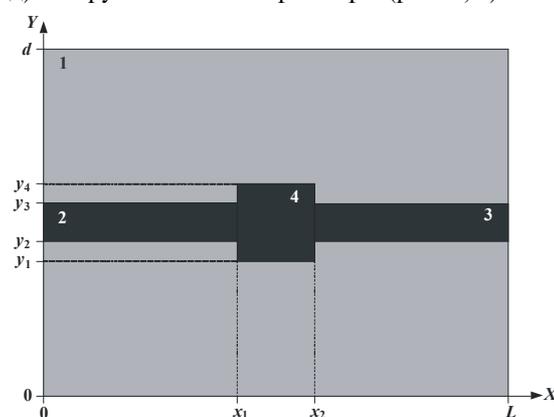


Рис. 1. Геометрическая модель области решения при идеальном контакте спае термопары и материала: 1) материал; 2) положительный термоэлектрод; 3) отрицательный термоэлектрод; 4) «горячий» спай термопары; d — геометрический размер твердого тела (элемента конструкции) по оси Y; L — геометрический размер твердого тела (элемента конструкции) по оси X

Нестационарный процесс переноса тепла теплопроводностью описывается уравнением, записанным в декартовой системе координат для двумерной задачи:

$$c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right),$$

$$t > 0, 0 < x < L, 0 < y < d,$$

где ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности.

Математическая модель включает начальное условие – при $t=0$ $T=T_0$ и граничные условия – равенство нулю градиентов температур на всех границах, за исключением одной, параллельной оси термоэлектродов:

$$\begin{aligned} x = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x} &= 0; \\ x = L; \quad \frac{\partial T}{\partial x} &= 0; \\ y = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y} &= 0. \end{aligned}$$

На границе $y=d$ задаются граничные условия третьего рода:

$$y = d; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \cdot (T_v - T_1|_{y=d}).$$

При решении дифференциального уравнения в частных производных использовался метод конечных разностей [3]. Разностные аналоги исходных дифференциальных уравнений в частных производных решены локально-одномерным методом. Для решения одномерных разностных уравнений использовалась неявная итерационная четырехточечная разностная схема. В ходе решения применялась неравномерная разностная сетка со сгущением в зоне непосредственных термопарных измерений.

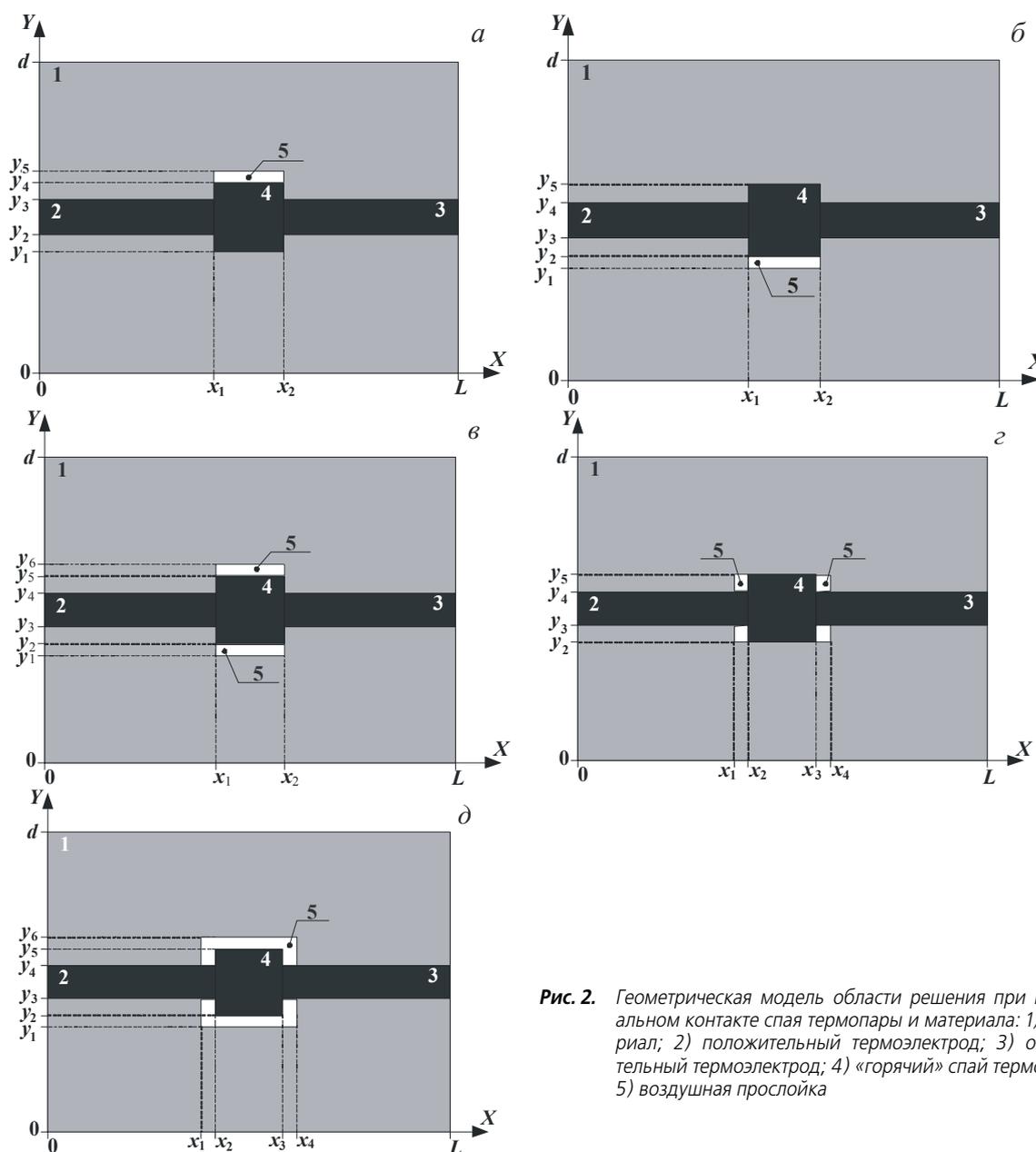


Рис. 2. Геометрическая модель области решения при неидеальном контакте спая термопары и материала: 1) материал; 2) положительный термоэлектрод; 3) отрицательный термоэлектрод; 4) «горячий» спай термопары; 5) воздушная прослойка

Цель численного моделирования – сравнение результатов решения задачи теплопроводности для условий идеального и неидеального контакта спая термопары с материалом, температура которого измеряется. Проведены исследования для типичных условий работы хромель-алюмелевых термопар [4].

Численный анализ температурных полей проводился при теплофизических характеристиках, приведенных в таблице.

Таблица. Теплофизические характеристики материалов конструкции [5, 6]

№ элемента	Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	Плотность ρ , кг/м ³
1	Твердое тело (элемент конструкции) – сталь 20	40,00	430	7800
2	Алюмель	32,70	942	8625
3	Хромель	16,00	451	8750
4	Спай термопары	24,35	696	8688
5	Воздух	0,02	1005	1,205

При численном моделировании приняты значения геометрических параметров: геометриче-

ский размер твердого тела по оси Y – d принят равным 10 мм; по оси X – L – 40 мм, размеры спая термопары 1×1 мм, толщина термоэлектродов 0,5 мм.

Рассматривались тепловые режимы, в которых температура внешней среды изменялась от 800 до 1200 °С. Также рассматривалось влияние толщины воздушного зазора и коэффициента теплоотдачи на расхождение значений температуры в центре спая термопары при идеальном и неидеальном контакте.

При численном моделировании исследуемых процессов установлены зависимости точности вычислений от шага по времени h_t (рис. 3) и числа узлов координатной сетки (рис. 4). Точность вычислений принималась как отклонение полученного температурного поля при изменении сеточных параметров. Установлено, что погрешность вычислений уменьшается с увеличением числа узлов пространственной сетки и уменьшением h_t . Численный анализ показал, что точность вычислений в большей степени определяется выбором шага по времени и в меньшей степени от шагов по координатам.

На рис. 5–8 представлены типичные результаты численного моделирования.

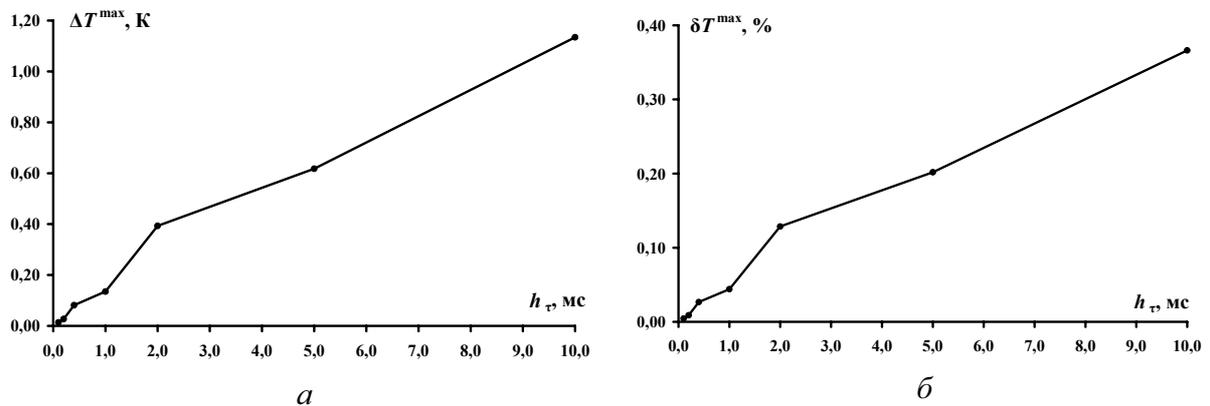


Рис. 3. Зависимость точности расчета от изменения шага по времени h_t : Отклонение: а) абсолютное ΔT^{\max} ; б) относительное δT^{\max}

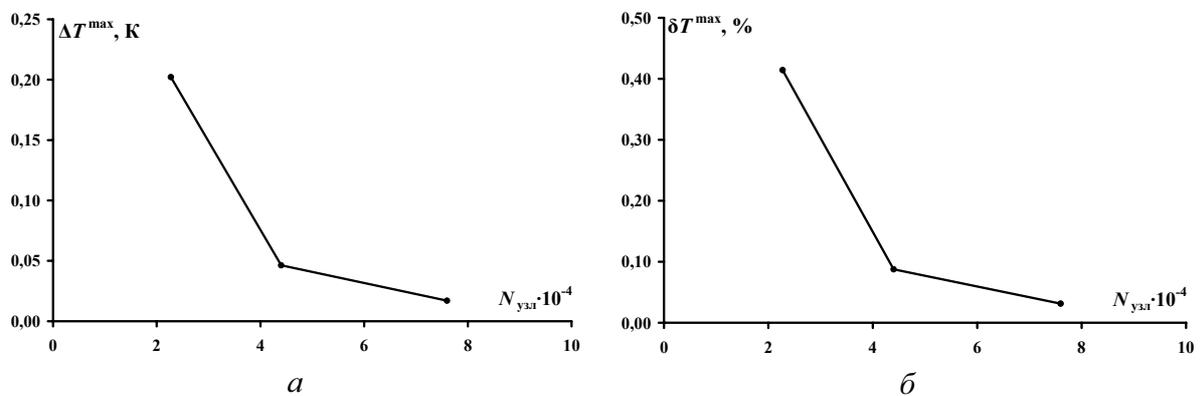


Рис. 4. Зависимость точности расчета от числа узлов координатной сетки. Отклонение: а) абсолютное ΔT^{\max} ; б) относительное δT^{\max}

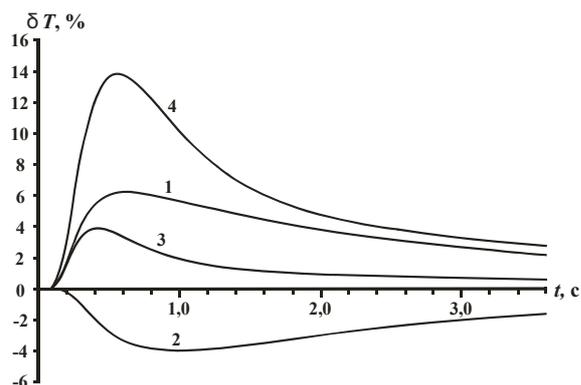


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения температуры термопарой от времени при различном месторасположении воздушного зазора: 1) со стороны нагрева; 2) с «холодной» стороны спая термопары; 3) с двух сторон спая; 4) вокруг всего спая

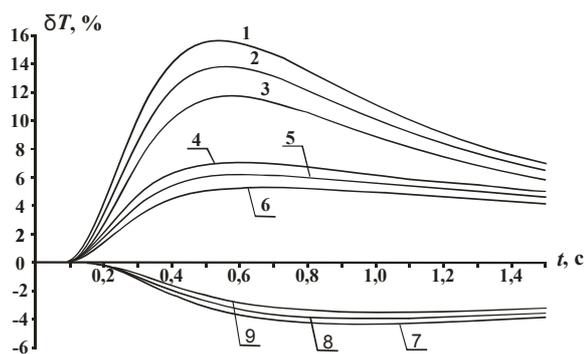


Рис. 8. Зависимость погрешности измерения температуры термопарой от времени при различной температуре внешней среды: 1–3) зазор вокруг всего спая термопары; 4–6) зазор со стороны нагрева; 7–9) зазор с «холодной» стороны спая; 1, 4, 7) $T_{вн}=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2, 5, 8) $T_{вн}=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3, 6, 9) $T_{вн}=800\text{ }^{\circ}\text{C}$

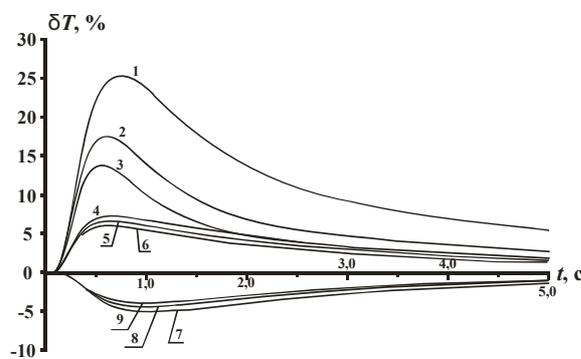


Рис. 6. Зависимость погрешности измерения температуры термопарой от времени при различной толщине воздушного зазора: 1–3) зазор вокруг всего спая термопары; 4–6) зазор со стороны нагрева; 7–9) зазор с «холодной» стороны спая; 1, 4, 7) толщина зазора равна толщине спая; 2, 5, 8) толщина зазора равна 50 % толщины спая; 3, 6, 9) толщина зазора равна 30 % толщины спая

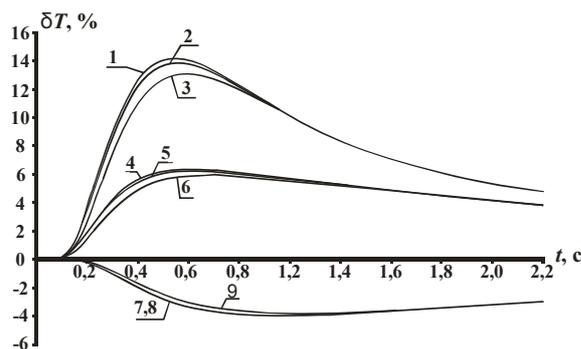


Рис. 7. Зависимость погрешности измерения температуры термопарой от времени при различных коэффициентах теплоотдачи: 1–3) зазор вокруг всего спая термопары; 4–6) зазор со стороны нагрева; 7–9) зазор с «холодной» стороны спая; 1, 4, 7) $\alpha=500\text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; 2, 5, 8) $\alpha=250\text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; 3, 6, 9) $\alpha=100\text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$

Анализ полученных температурных полей позволил сделать следующие выводы:

1. Наличие воздушного зазора оказывает существенное влияние на отклонение температуры спая термопары по сравнению со случаем идеального контакта. Зависимость относительной погрешности термопарных измерений при наличии воздушного зазора носит нелинейный характер. Эта зависимость характеризуется ярко выраженным экстремумом (рис. 5–8).
2. От местоположения зазора зависит знак отклонения температуры (рис. 5) спая по сравнению с температурой в той же точке при идеальном контакте спая термопары и материала: положительное отклонение температуры возникает при расположении зазора в случаях, соответствующих рис. 2, а, г, д; отрицательное отклонение температуры возникает в случае расположения зазора с «холодной» стороны спая термопары (рис. 2, б). Наибольшая величина ΔT возникает при расположении воздушного зазора вокруг всего спая термопары.
3. Толщина зазора также влияет на погрешность термопарных измерений (рис. 6). С увеличением толщины зазора увеличивается максимальная погрешность.
4. С увеличением коэффициента теплоотдачи на поверхности материала (рис. 7) погрешность термопарных измерений при наличии воздушного зазора увеличивается по модулю. Увеличение температуры внешней среды (рис. 8) увеличивает по модулю погрешность при наличии воздушного зазора. Установлено, что изменение температуры внешней среды вызывает более значительное изменение ΔT при наличии воздушного зазора по сравнению с изменением коэффициента теплоотдачи.

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